

*Уважаемые коллеги!*

*Вы держите в руках юбилейный – 50-й выпуск сборника научных трудов ученых нашего региона. В далёком уже сейчас 1997 году в условиях экономического спада в стране, когда заработная плата выплачивалась крайне не регулярно, мы приняли решение о выпуске I-го сборника, чтобы поддержать научную общественность и дать, прежде всего молодым учёным, возможность общения в научной печати.*

*Прошло 10 лет, сборник из небольшого малотиражного превратился в региональный с выпуском не менее 6 номеров в год. За это время в сборнике опубликовано 673 статьи учёных не только нашего региона, но и Киева, Харькова, Донецка, Запорожья и др.*

*У истоков создания сборника стоял совет, возглавляемый академиком НАН Украины Юрием Николаевичем Тараном-Жовниром. Со временем обновленный редакционный совет возглавил ректор академии профессор Величко А.Г. С момента основания сборника активное участие в работе совета принимает академик НАН Украины Гасик Михаил Иванович. В обновленный редакционный совет входят проректоры академии: профессор Иващенко В.П., профессор Пройдак Ю.С., профессор Шатоха В.И.. Другие организации представлены ведущими учеными нашей страны, такими как: профессор Бидюк П.И. (НТУУ-КПИ), профессор Бодянский Е.В. (ХНУРЭ), профессор Малайчук В.П., профессор Скалозуб В.В. (ДНТУЖТ-ДИИТ), профессор Хандецкий В.С. (ДНУ) и др. Бессменным ученым секретарем сборника является проректор ДГТУ профессор Коробочка А.Н.*

*Многим молодым учёным сборник открыл дорогу в научную жизнь, а опытным исследователям дал возможность стать профессорами и доцентами не только нашего Вуза, но и других Вузов нашей страны и других стран, в частности в сборнике*

*публиковались статьи учёных из России, Азербайджана, Молдовы и Белоруссии.*

*Представительность редакционных коллегий выпусков сборника за эти годы обеспечивали ведущие учёные страны: академик НАН Украины Пилипенко В.В., академик НАН Украины Шевченко Ю.С., член-корреспондент НАН Украины Мельник В.С., член-корреспондент НАН Украины Гудранович В.С.*

*Не оставили своим вниманием выдающиеся люди нашей страны – второй президент Леонид Данилович Кучма, вице-премьер Дубина Олег Викторович и другие.*

*С пожеланием научных успехов и творческих удач*

*Шеф-редактор сборника  
«Системные технологии»  
профессор,  
доктор технических наук*

*А.И. Михалёв*

## СИСТЕМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 519.2

А.А. Лигун, А.А. Шумейко, Д.В. Тимошенко

ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ЛИНИЙ НА  
ИЗОБРАЖЕНИИ

В задачах обработки изображений важное место занимает обнаружение и выделение линий и контуров [1]. Контурные области являются областями изображения с высокой концентрацией информации, мало зависящей от цвета и яркости, поэтому в последнее время возрос интерес к методам обработки визуальных данных, базирующихся на анализе контуров, а не на обработке каждого пикселя изображения [2]. Особый интерес такие задачи вызывают при обработке данных фотосъемок и обработке электронных документов [3,4]. На этапе векторизации электронного документа проводится разделение информационных слоев, одним из которых является слой деловой графики (векторная компонента).

Работу с линиями и контурами изображения можно условно разбить на три этапа:

- локализация местонахождения линий;
- формирование структуры линии;
- аналитическое описание линии.

Задаче обнаружения и описания линий посвящено большое количество работ (см., например, [1,5,6]). Чаще всего для выделения линий на изображении, применяют методы, основанные на свертке матрицы изображения с разностными операторами, что позволяет уловить скачек яркости или цвета у контуров. Обычно (см. [5]) для этой цели используют свертку с фильтрами Превитта:

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

или фильтрами Собела

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}.$$

Такого рода подходы позволяют получать простые и довольно эффективные методы выделения нитевидных структур на изображении в случае, если они достаточно контрастны на окружающих их фоне. Выделение слабоконтрастных, нечетких линий с использованием разностных (градиентных) фильтров приводит к тому, что места изображения, полученного в результате свертки, содержащие линии, имеют тот же уровень значений, что и места с шумом, что не позволяет автоматизировать процесс выделения и описания линий и контуров.

Для иллюстрации предлагаемых методов мы будем использовать фрагменты тестового изображения ISO-400 “Bicycle”.

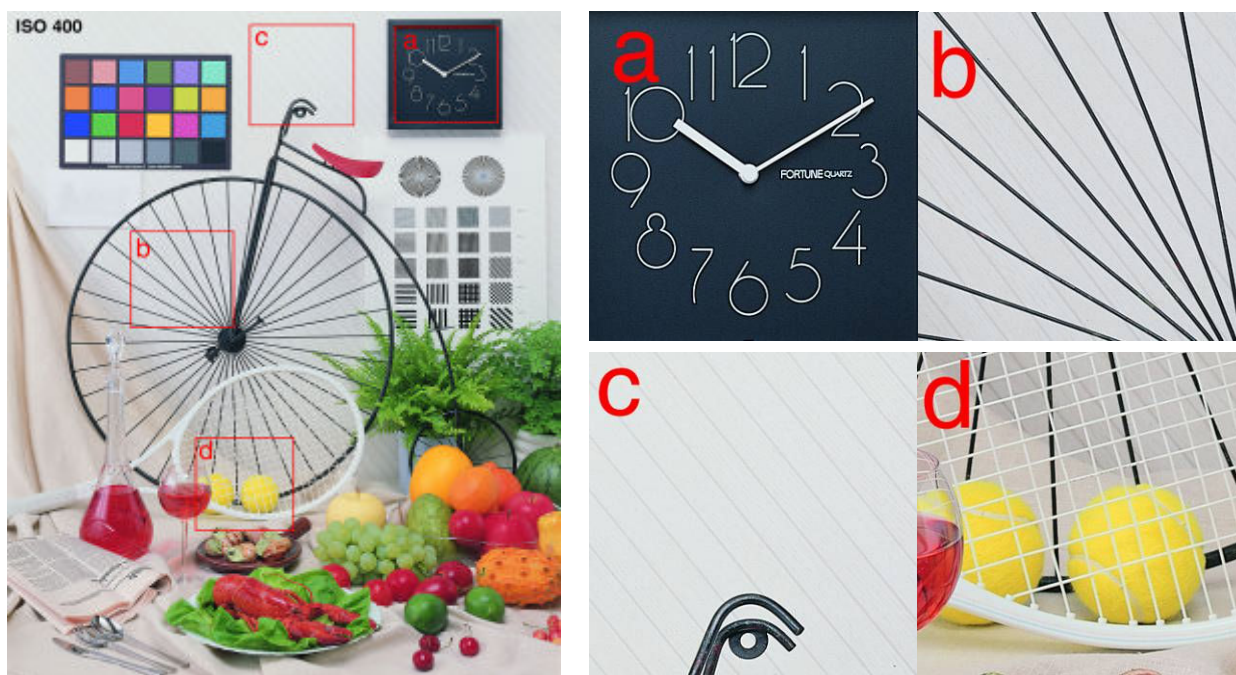


Рисунок 1 – Тестовый пример «Bicycle». На рис 1a и рис. 1b приведены примеры линий, контрастных на окружающем фоне, на рис. 1c и рис. 1d примеры линий, слабоконтрастных на окружающем фоне

На практике задачу выделения линий на изображении, можно разделить на два случая:

1. Выделение четких, контрастных линий, например, фрагменты чертежа или таблицы (рис. 1a, 1b). В этом случае они хорошо поддаются векторизации, и основная проблема состоит в эффективном аналитическом описании.
2. Локализация нечетких, слабоконтрастных линий, например, на отсканированных документах или данных фотосъемок (рис. 1c, 1d). В этом случае основная проблема сосредоточена в способе их обнаружения и выделения.

Целью данной статьи является локализация и формирование слабоконтрастных линий с нечетной структурой относительно фона близлежащих точек. Наши исследования состоят из трех этапов:

- формирование множества точек фона;
- формирование множеств контрастных относительно фона;
- формирование линий.

Формирование точек фона. Понятие локального фона является ключевым и интуитивно под фоном понимается множество точек изображения, каждая из которых имеет достаточное число соседей со схожей яркостью. При этом плохо различимые линии на изображении состоят из точек, которые по своей яркости очень близки к яркости соседних точек фона. Ниже эти понятия мы формализуем.

В дальнейшем мы будем работать с яркостной составляющей изображения, представляющей собой числовую матрицу  $Y = \{y_{i,j}\}_{i=1,j=1}^{W,H}$ , где компонента яркости определяется, например, следующим образом

$$y_{i,j} = \frac{1}{23}(7r_{i,j} + 14g_{i,j} + 2b_{i,j}),$$

здесь  $r_{i,j}, g_{i,j}, b_{i,j}$  цветовые компоненты (красный, зеленый и синий) пикселя с координатами  $(i, j)$ . Заметим, что вместо значения яркости можно использовать любую другую компоненту цвета.

Через  $C_{i,j}^R = \{(v, \mu) : (i-v)^2 + (j-\mu)^2 \leq R^2\}$  обозначим окрестность точки  $(i, j)$  радиусом  $R$  (в нашем случае рассматривалось  $R=3$ ) и каждой точке изображения поставим в соответствие среднюю яркость окрестности

$$b_{i,j}^R = \frac{1}{\sum \{1 \mid (v, \mu) \in C_{i,j}^R\}} \sum \{y_{v,\mu} \mid (v, \mu) \in C_{i,j}^R\}. \quad (1)$$

Для заданного  $\delta > 0$  определим множество

$$\mathfrak{R}(\delta) = \{(i, j) : |y_{i,j} - b_{i,j}^R| < \delta\}.$$

Все точки этого множества будем называть первичными точками фона по порогу  $\delta$ . При определении множества первичных точек фона, использовались точки, которые в дальнейшем не вошли в это множество, поэтому переопределим понятие окрестности, опираясь на информацию только о точках из  $\mathfrak{R}(\delta)$

$$\tilde{C}_{i,j}^R = \{(v, \mu) \mid (v, \mu) \in C_{i,j}^R, (v, \mu) \in \mathfrak{R}(\delta)\}.$$

Используя уточненное понятие окрестности первичной точки фона, заново найдем значение яркости фона в точке  $(i, j)$

$$\tilde{b}_{i,j} = \frac{1}{\sum \{1 \mid (v, \mu) \in \tilde{C}_{i,j}^R\}} \sum \{y_{v,\mu} \mid (v, \mu) \in \tilde{C}_{i,j}^R\}.$$

Значения яркости точек, принадлежащих линиям, слабоконтрастным относительно окружающего фона, более существенно отличаются от значений яркости фона, чем значения точек, не лежащие на подобных местах. При выделении линий естественно потребовать, чтобы точки, которые могут им принадлежать, не принимали участие в формировании яркости фона. Для этой цели построим следующую процедуру.

Для каждой точки окрестности  $\tilde{C}_{(i,j)}^R$  найдем ошибку описания ее яркости средним значением фона

$$e_{v,\mu}^{(i,j)} = |y_{v,\mu} - \tilde{b}_{i,j}|, \text{ где } (v, \mu) \in \tilde{C}_{i,j}^R,$$

и построим множество точек  $M_{(i,j)}^R$ , состоящее из  $\Theta$  – процентов точек  $(v, \mu) \in \tilde{C}_{i,j}^R$ , для которых значения ошибок  $e_{v,\mu}^{(i,j)}$  максимальны (например,  $\Theta \approx 20\%$ ). Вычислим новые средние значения, удалив точки с максимальным отклонением

$$\tilde{b}_{i,j}^M = \frac{1}{\sum \{1 \mid (v, \mu) \in \tilde{C}_{i,j}^R / M_{(i,j)}^R\}} \sum \{y_{v,\mu} \mid (v, \mu) \in \tilde{C}_{i,j}^R / M_{(i,j)}^R\}.$$

Аналогично предыдущему, собственно фоновыми точками будем считать точки, удовлетворяющие условию

$$|y_{i,j} - \tilde{b}_{i,j}^{M_{(i,j)}^R}| < \varepsilon, (i, j) \in \mathfrak{R}(\delta), \quad (2)$$

где  $\varepsilon > 0$  - параметр, регулирующий количество точек фона.

Все точки, удовлетворяющие условию (2), образуют множество точек фона  $\tilde{\mathfrak{R}}(\Theta, \delta)$ .

Формирование множеств точек, контрастных на фоне. Точки, принадлежащие множеству  $P^\delta = \mathfrak{R}(\delta) / \tilde{\mathfrak{R}}(\Theta, \delta)$ , будем называть точками, контрастными на фоне. Все эти точки подозрительны на предмет формирования линий. Через  $\{P_k^\delta\}_{k=1}^n$  обозначим множества связанных точек изображения, то есть, для которых выполняется условие связности двух точек  $(i, j)$  и  $(v, \mu)$

$$\max\{|i - v|, |j - \mu|\} = 1.$$

Мерой множества  $A$  будем называть величину

$$M(A) = \sum \{1 \mid (i, j) \in A\}.$$

Заметим, что во множество  $P^\delta$  могут попасть точки содержащие шум. Поэтому прежде чем, приступить к формированию линий на базе множества  $\{P_k^\delta\}_{k=1}^n$ , необходимо провести очистку изображения от шумов. Не останавливаясь на этом вопросе подробно, заметим, что фильтрация данных от шума является важной и интересной задачей, существуют различные алгоритмы очистки, в данном случае можно воспользоваться методом удаления элементов с малой мерой. Таким образом, в результате получаем множество  $\{P_k^\delta\}_{k=1}^m$  связанных точек, подозрительных на линии слабоконтрастные относительно фона (рис. 2b).

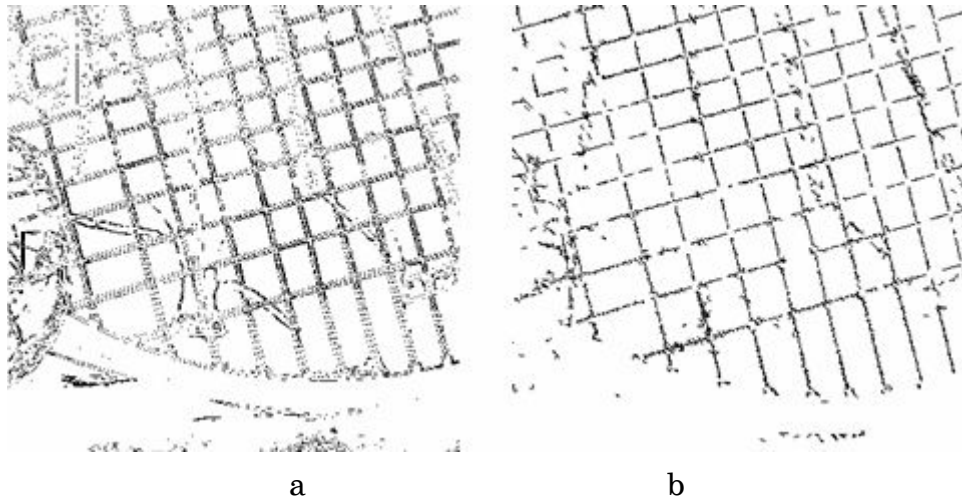


Рисунок 2 – а) выделение нечетких линий с помощью фильтров Собела; б) выделение нечетких линий с помощью предложенного подхода

Следующим этапом является формирование из множеств  $\{P_k^\delta\}_{k=1}^m$  собственно линий.

**Формирование линий.** Сложность топологической структуры множеств  $\{P_k^\delta\}_{k=1}^m$  не позволяет реализовать их эффективную обработку, поэтому является актуальным описание множеств  $\{P_k^\delta\}_{k=1}^m$  объектами более простой конструкции – линиями, чему посвящены дальнейшие наши построения.

Так как любое связанное множество можно представить в виде подмножества объединения кругов, то  $P_k^\delta \subset \bigcup_{(i,j) \in B_k} R_{(i,j)}$ . Связное

множество  $B(P_k^\delta) = \{(i_\nu, j_\nu)\}_{\nu=1}^{N_k}$  будем называть каркасом множества  $P_k^\delta$ , если оно дает решение следующей экстремальной задачи

$$\begin{cases} \sum_{(i,j) \in B_k} M(C_{(i,j)}^{R(i,j)}) \rightarrow \min ; \\ P_k^\delta \subset \bigcup_{(i,j) \in B_k} C_{(i,j)}^{R(i,j)} . \end{cases} \quad (3)$$

Каркас множества описывает геометрическое поведение множества в целом, поэтому для описания  $\{P_k^\delta\}_{k=1}^m$  воспользуемся их представлением через каркасы. Заметим, что получение каркаса множества с использованием решение задачи (3) трудоемко и, вообще говоря, не требуется для корректного описания множества. Поэтому рассмотрим далее способ построения множества, близкого к каркасу, конструирование которого существенно проще.

Граничной точкой множества будем называть точку, с которой соседствует, хотя бы одна точка, не принадлежащая этому множеству. Контуром будем называть такую замкнутую последовательность граничных точек, у которой  $\nu$  и  $(\nu+1)$ -я точка связаны, но каждая точка граничит не более чем с двумя граничными точками.

Под однопиксельной линией будем понимать связное множество, каждая точка (пиксел) которого соседствует не более чем с тремя точками множества (рис. 3б). Под строго однопиксельной линией будем понимать такую однопиксельную линию, у которой удаление любой точки, кроме концевой, приводит к потере связности (рис. 3а).

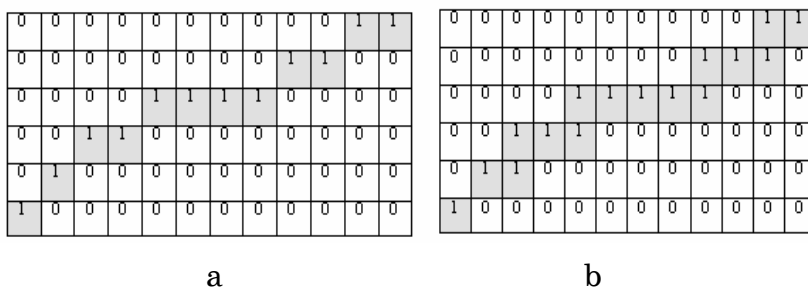


Рисунок 3 – а) строго однопиксельная линия; б) однопиксельная линия

Операцией депиляции над множеством  $A$  для заданной окрестности  $D_{i,j}^N$  будем называть присоединение к множеству всех точек окрестности  $D_{i,j}^N$ , построенной вокруг каждой точки  $(i, j)$  множества  $A$ .



$$D(A) = A \cup \{(v, \mu) \mid (v, \mu) \in D_{i,j}^N, \forall (i, j) \in A\}.$$

Операцией эпилляции  $E(A)$  над множеством  $A$  будем называть удаление из множества  $A$  всех граничных точек, которые не нарушают связность  $A$ .

Применение операции депиляции позволяет соединить несколько множеств в одно связное. Таким образом, последовательное применение эпилляции и депиляции улучшает структуру множеств, что есть подготовкой множества к построению каркасов.

Каркас множества будем искать в виде строго однопиксельной линии, путем последовательного изъятия из этого множества точек, не нарушая связность множества в целом.

Приведем алгоритм построение каркаса для множества точек  $A$ .

*Шаг 1. Построение маски множества.* Поставим в соответствие множеству точек  $A$  матрицу  $\{a_{i,j}\}_{i=1,j=1}^{W^A,H^A}$ , где

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, (i, j) \in A; \\ 0, (i, j) \notin A. \end{cases}$$

*Шаг 2. Нахождение контура множества.* Задаем правило обхода граничных точек. Для построения контура будем обходить каждую граничную точку в положительном направлении и при этом каждый элемент контура  $p_k$  будем характеризовать парой точек  $V(p_k)$  и  $U(p_k)$ , где  $V(p_k)$  координаты  $k$ -ой точки контура, а  $U(p_k)$  - координаты точки, из которой при заданном обходе была добавлена  $k$ -я точка, то есть  $U(p_k) = V(p_{k-1})$ .

Построение контура начинается с произвольной граничной точки множества  $A$ . Продвигаясь по направлению контура, присоединяем очередной элемент. Матрица  $\{a_{i,j}\}_{i=1,j=1}^{W^A,H^A}$  отображает влияние каждой точки на формирование контура. Добавляя  $k$ -й элемент в контур, увеличиваем на единицу значимость точки в матрице  $\{a_{i,j}\}_{i=1,j=1}^{W^A,H^A}$  с координатами  $(V(p_k)_x, V(p_k)_y)$ . По определению контур является замкнутым, поэтому процесс должен завершиться, когда в контур будет добавлен элемент, совпадающий с первым, то есть  $V(p_k) = V(p_1)$ . Но для корректной обработки ситуации петель этого сравнения не достаточно, поэтому необходимо сравнивать все характеристики элемента, то есть и  $U(p_k)$ . Ввиду того, что первый элемент не

обладает информацией о  $U(p_1)$ . Будем считать, что контур построен, если выполнено следующие условия

$$\begin{aligned}V(p_k) &= V(p_2); \\ U(p_k) &= U(p_2).\end{aligned}$$

Последние два добавленных элемента необходимы для алгоритмизации остановки формирования контура, то есть не должны влиять на формирование матрицы  $\{a_{i,j}\}_{i=1,j=1}^{W^A,H^A}$ .

*Шаг 3. Изымание контура множества из изображения.* После построения контура анализируем влияние каждой граничной точки при формировании контура. Заметим, что одна и та же граничная точка может присутствовать в нескольких элементах контура, в этом случае она существенна для связности множества  $A$  и не может быть удалена.

Для того чтобы эффективно анализировать вхождения каждой граничной точки в элементы контура, не используя дополнительный поиск, была введена матрица  $\{a_{i,j}\}_{i=1,j=1}^{W^A,H^A}$ . Исходя из ее значений, легко проанализировать влияние граничных точек на формирование контура. Элементы  $a_{i,j}$  могут принимать значения:

1 – если точка не входит в контур;

>2 – если точка входит в контур не один раз, а, значит, ее удаление; приведет к нарушению связности множества  $A$ .

2 – если точка, требует дополнительного анализа на удаление.

Удаление точки  $(i, j)$  сопровождается установкой значения элемента матрицы  $a_{i,j} = 0$ . Точки, соответствующие значениям 2 и имеющие среди соседей точки, которым соответствуют 1 – удаляются. При этом, возможен распад множества  $A$  на несвязанные подмножества. Подмножества, которые состоят из значений  $\geq 2$ , приводятся к строго однопиксельной линии. Заметим, что для строго однопиксельной линии легко находятся концы - это точки, которые имеют только одного соседа, принадлежащего линии. Очевидно, что разрыв связности может происходить в окрестности концов строго однопиксельных подмножеств. Для того чтобы избежать разрыва линии, каждый конец полученных фрагментов помещается в окрестность  $5 \times 5$ . Если в этой окрестности лежит хотя бы одна точка, равная 1, то возвращаем в этой окрестности ту точку, которая восстановит связность. Одновременно восстанавливаем точки,

которые имели в своих соседях более трех удаленных точек со значением 2.

Контур удаляется до тех пор, пока множество А не будет представлять собой строго однопиксельную линию. Рис. 4 иллюстрирует данный алгоритм.

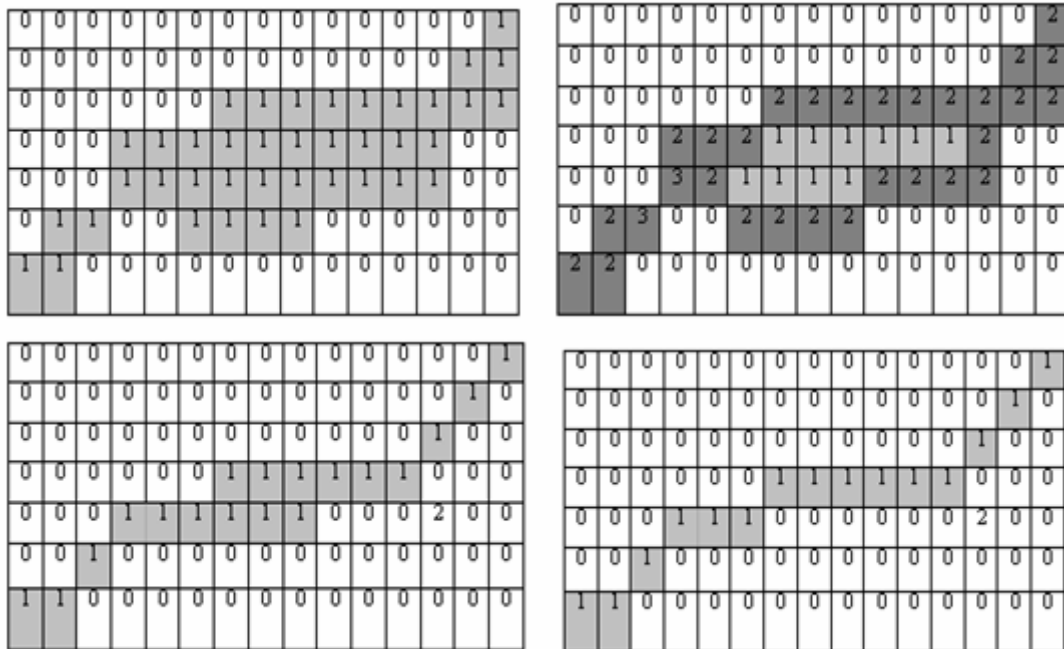


Рисунок 4 – Пример поэтапного удаления контура из множества  
Итогом данного этапа является построение каркаса множества (рис. 5).



Рисунок 5 – а) фрагмент нечетко выраженных линий; б) этот же фрагмент после обработки

### Выводы

Представленные подходы позволяет выделить линии, которые неявно выражены на окружающем фоне, и улучшить их представление для дальнейшего описания. Заметим, что алгоритм построение каркаса множеств может быть использован, например, в задачах обработки результатов аэрокосмических съемок, распознавания текста (в том числе и рукописного), анализа структуры дендритов и т.д.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов/ Я.А.Фурман, А.В.Кревецкий, А.К.Передреев, А.А.Роженцов, Р.Г. Хавизов, И.Л.Егошина, А.Н. Леухин. Под ред. Я.А.Фурмана. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 592 С.
2. Когут П.І., Сердюк М.Є. Алгоритмічний підхід до задач каркасної інтерполяції статичних зображень. // Математичне моделювання, 2 (16), 2007. – С. 21-25.
3. Лигун А.О., Шумейко О.О., Тимошенко Д.В. ALLDocument – технологія нового покоління для збереження, передачі та відображення електронних документів. – Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, №9 (103), Частина 1, 2006, С. 83-85.
4. Specification of DJVu Image Compression Format. AT&T, 1999, 39 P.
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений . – М.: Техносфера, 2005. – 1070 С.
6. Лигун А.А., Шумейко А.А. Асимптотические методы восстановления кривых. – К.: Институт математики НАН Украины, 1997. – 358 С.

Получено 19.04.2007 г.

УДК 629.4.016.12

В.В. Скалозуб, А.П. Иванов

## **УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО ОПИСАНИЯ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ**

Сокращение эксплуатационных расходов – важнейшее направление повышения эффективности работы железных дорог Украины

Железнодорожный транспорт один из значительных потребителей топливно-энергетических ресурсов Украины. В год только на тягу поездов потребляется более четырех миллиардов кВт·ч электроэнергии. Одним из эффективных путей экономии энергоресурсов является внедрение энергетически-оптимальных графиков движений поездов (расчет времен хода по участкам) и оптимальных режимных карт ведения поездов на главных направлениях железных дорог Украины.

Проблеме обеспечения энергетически-эффективного процесса перевозок посвящены многочисленные исследования в Украине и за рубежом [1,2] . В них рассматриваются вопросы формализации постановок задач, учитывающих разнообразные факторы и условия процесса движения поезда по переменному профилю пути, математические методы исследования возникающих при этом оптимизационных задач. Сложность задачи организации оптимального ведения поезда в первую очередь определяется полнотой учета совокупности факторов характеризующих участок, силы, модель поезда и т.д. В зависимости от полноты имеющихся данных для решения задачи расчета оптимальных режимов тяги применяются различные методы, основанные на моделях непрерывного и дискретного оптимального управления.

### **Построение нечеткой системы для выбора режимов управления движением поезда**

В моделях [1, 2] использовано множество величин, значения которых сложно точно получить, или же их измерение требует больших затрат. На практике надежной основой для оценки и расчетов рациональных режимов ведения поездов являются опытные поездки, представляющие выполненные фактически режимы тяги.

---

© В.В. СКАЛОЗУБ, А.П. ИВАНОВ, 2007

Рассмотрим задачу выбора рационального режима тяги локомотива на основе построения базы нечетких правил экспертных систем по данным опытных поездок и организации нечеткого вывода. Такие правила управления учитывают отклонения фактических состояний от оптимальной режимной карты для эталонного случая, рассчитанной для поезда заданной массы на заданном перегоне (эталонный режим). Эталонными режимами служат данные о фактических поездках или же расчеты согласно моделям в работах [1, 2]. Для моделирования опытных поездок использовались расчеты режимов тяги поездов с разными массами, разным напряжением на токоприемнике, при различных ограничениях по скорости и изменением других параметров.

При формировании правил установлены такие параметры:

$\Delta t_i$  – разница по времени движения на участке « $i$ », для характеристики которого введены значения нечетких величин  $T_r$ : «отставание (сильное, слабое, отсутствует)» и «опережение (отсутствует, слабое, сильное)»,  $\Delta v_i$  – отклонение скорости для участка « $i$ », величина  $V_p$  со значениями: «сильное, отсутствует, слабое».  $\Delta m$  – разница массы поезда опытной траектории и поезда из эталонной поездки, величина  $M_p$ .  $S_i$  – участок пути, или номера пикетов, величина  $S_p$ , где  $i = 0, 1..n$  – это количество точек опытной траектории для одного перегона.

Нечеткие правила имеют вид, подобный работе [3]:

**ЕСЛИ  $s_i$  есть  $S_p$  И  $\Delta m$  есть  $M_p$  И  $\Delta t_i$  есть  $T_r$  И  $\Delta v_i$  есть  $V_p$  ТО  $\Delta U_i$ ,**

где  $\Delta U_i$  – количество позиций контролера, относительно текущего положения, которые обеспечивают управление, близкое к оптимальному на некотором  $i$ -том участке пути. При построении модели управления в виде нечетких правил использована работа [3], а каждая нечеткая характеристика аппроксимируется  $N$  нечеткими величинами с треугольными функции принадлежности. Для нечеткой характеристики заданы минимальное и максимальное значение, интервала, в которых находятся её допустимые значения. Аппроксимирующие величины имели треугольную степень принадлежности: вершина лежит в центре, ей соответствует степень принадлежности 1, а две другие вершины по сторонам от нее со степенями принадлежности 0. Нечеткий вывод основывается на правиле нечеткой импликации, построенном на правиле Мамдани [3].

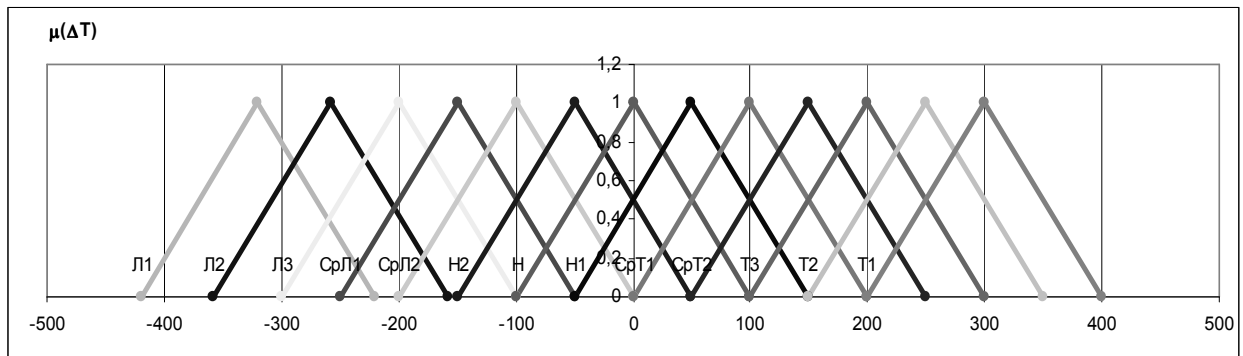
Рассмотрим величину  $M_p$  (разница масс поездов по отношению к эталонному поезду). Минимальное значение разницы масс равнялось -320 т., а максимальное 300т. Разбив этот интервал на 13 частей, имеем такие значения нечеткой величины, показанные в табл. 1.

Названия каждого значения даны таким образом: значения около 0 называются «Н» (нет отклонения), максимальные значения «Т» (тяжелее), минимальные значения «Л» (легче); между ними «СрЛ» (средне легче) и «СрТ» (средне тяжелее). Изображение этой величины в виде графиков функции принадлежности показано на рис. 1.

Таблица 1

Значения нечеткой величины  $M_p$  (масса поезда)

№	Название значения	$\alpha=0$	$\alpha=1$	$\alpha=0$
1	Л1	-420	-320	-220
2	Л2	-358	-258	-158
3	Л3	-300	-200	-100
4	СрЛ1	-250	-150	-50
5	СрЛ2	-200	-100	0
6	Н2	-150	-50	50
7	Н	-100	0	100
8	Н1	-50	50	150
9	СрТ1	0	100	200
10	СрТ2	50	150	250
11	Т3	100	200	300
12	Т2	150	250	350
13	Т1	200	300	400

Рисунок 1 - Функции принадлежности при аппроксимации нечеткой величины  $M_p$ 

Каждая аппроксимация была представлена нечеткими значениями, полученными при разбиении допустимого интервала на части рис.2-3.

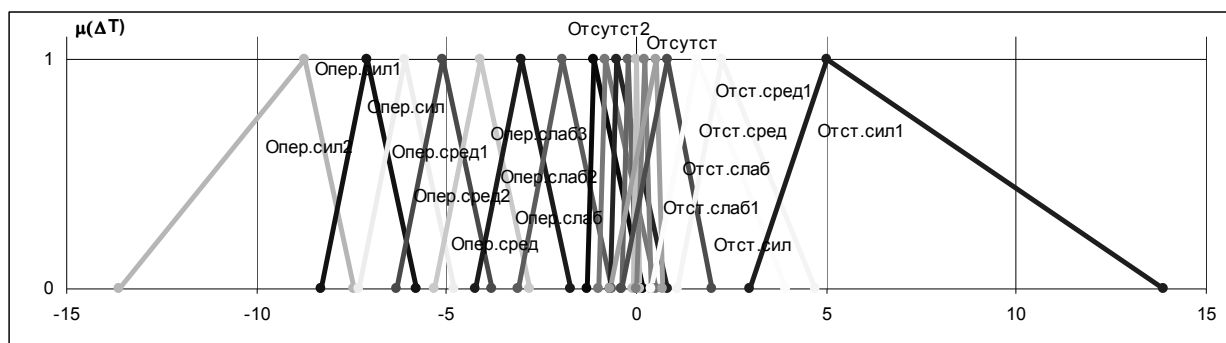


Рисунок 2 - Функции принадлежности при аппроксимаций нечеткой величины  $T_r$  (отставание по времени)

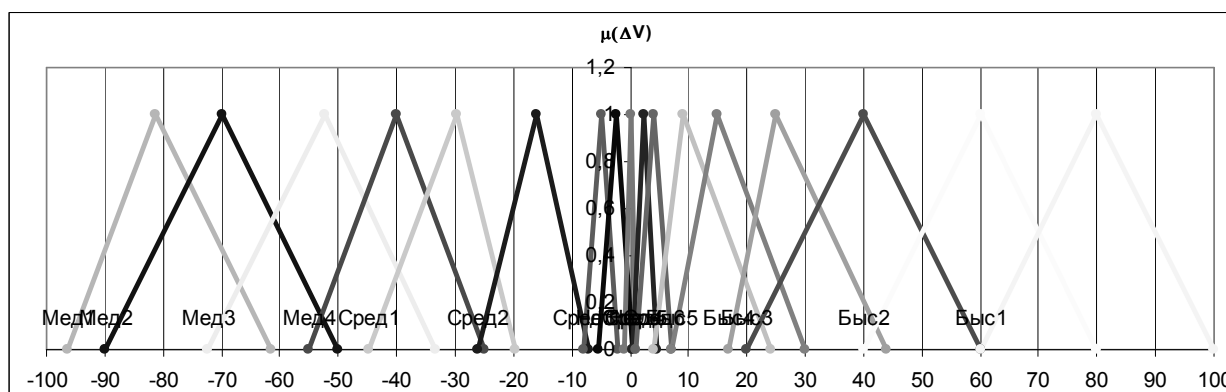


Рисунок 3 - Функции принадлежности при аппроксимаций нечеткой величины  $V_r$  (отклонение в скорости)

Разбиение каждой величины следовало откорректировать так, чтобы добиться наибольшего соответствия значениям, которые подаются на вход нечеткой модели.

На следующем шаге выполнено формирование базы правил. При этом каждое значение из обучающей выборки эталонных режимов тяги сопоставляется со значениями нечеткой характеристики и заменяется той, значения которой имеют максимальную степень принадлежности среди всех заданных в области. Например, значения отклонений  $\Delta m = 80$ ,  $\Delta t_i = -5$  и  $\Delta v_i = 30$ , а  $\Delta U_i = 3$  тогда получим такое правило:

**ЕСЛИ  $\Delta m$  есть «Н» И  $\Delta t$  есть «Опер.сред2» И  $\Delta v$  есть «Быс4» ТО  $\Delta U = 3$ .**

Для каждой точки опытной траектории получается несколько правил и возникает проблема их противоречивости: правила с одинаковыми послылками будут подтверждать разные выводы. Проблема решается приписыванием каждому правилу степени истинности. При появлении противоречивых правил проверяется их степень истинности и остается правило с наибольшей степенью



истинности. Такой способ уменьшает общее количество правил в базе и полностью устраняет противоречивость. Степень истинности вычисляем как произведение степени принадлежностей всех величин участвующих в правиле [3]. Построенная база правил имеет вид таблицы, в которой есть столбцы посылок, столбец вывод и степень истинности правила. В следующей таблице (таб. 2) представлена часть полученной базы правил.

Использование базы нечетки правил заключается в определении отображения входных посылок  $f(s_i, \Delta m, \Delta t_i, \Delta v_i) \Rightarrow \sim \Delta U_i$ , где  $\sim \Delta U_i$  – нечеткая величина, для определения количественного значения которой необходимо выполнять операцию дефаззификации [3]. В представленных результатах был использован метод дефаззификации по правилу среднего центра.

Таблица 2

Фрагмент полученной базы правил

Степень ист. правила	s	$\Delta m$	$\Delta t$	$\Delta v$	$\Delta U$
0,6310	61600	T2	Отст.слаб1	Нет	0
0,9465	62200	T2	Отст.слаб1	Нет	0
0,8051	63200	T2	Отст.слаб1	Нет1	0
0,4395	500	СрТ1	Отсутст2	Нет	-9
0,3863	1000	СрТ1	Отст.слаб	Сред2	-2
0,4016	1600	СрТ1	Отст.сред	Сред2	-4
0,5653	2000	СрТ1	Отст.сред	Сред2	-2
	.....		.....		
0,0231	61000	СрТ2	Опер.сил2	Сред4	2
0,0383	61200	СрТ2	Опер.сил2	Сред4	2
0,9800	167	Л2	Отсутст2	Нет	0
0,6517	334	Л2	Отсутст2	Нет	-2
0,5667	500	Л2	Отсутст2	Нет	-9

Результаты проведенного моделирования проиллюстрированы примером на рис.4., где изображен график зависимости скорости от пройденного расстояния для двух разных поездов.



Рисунок 4 - Скорость эталонного и контрольного поезда на заданном перегоне

Тонкая линия – скорость эталонного поезда, которая представляет рассчитанную согласно [2], идеализированную оптимальную траекторию. Исходными данными для построения базы правил являлись значения отклонений в скорости, времени хода, массе поезда от эталонной поездке. Жирная линия показывает контрольную расчетную поездку, информация о которой не попадала в обучающую выборку, которую нужно приблизить к эталонной поездке на основе базы нечетких правил.

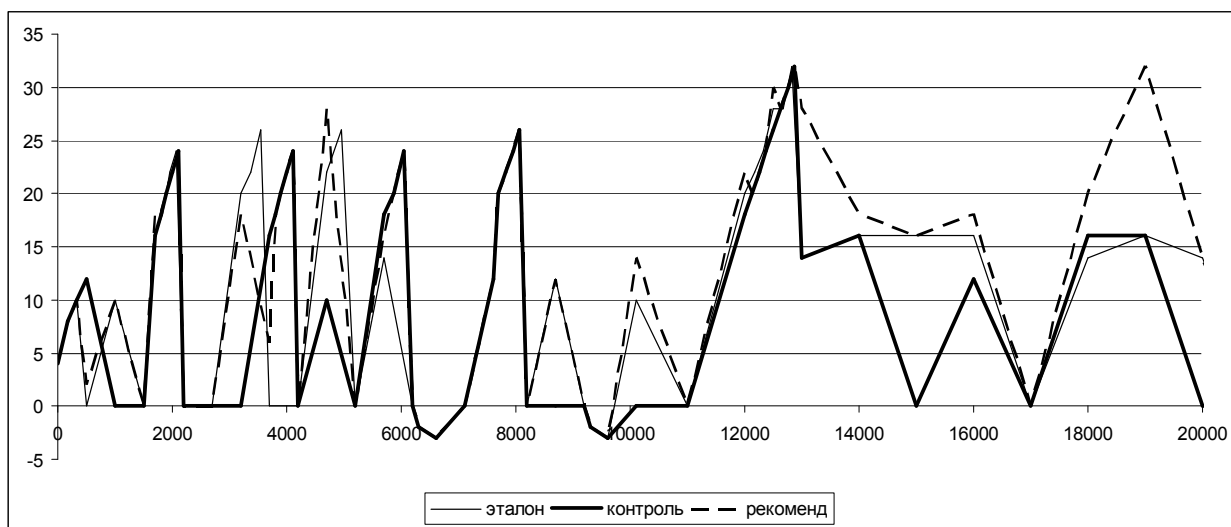


Рисунок 5 - Зависимость номера позиции контроллера от участка пути

На рис. 5. показано как система, основанная на выводе из базы нечетких правил, производила корректировку управления в контрольной поездке. Пунктирная линия представляет рекомендуемое управление, которое нужно задать машинисту локомотива, чтобы движение поезда приблизилось к показателям заданного эталонного управления. Из графика видно, что рекомендуемое системой управление стремится увеличить номер позиции контроллера, чтобы ускорить движение. Это связано с тем, что в качестве контрольной была взята поездка с опозданием, поэтому повышение скорости приближает ее к оптимальному управлению.

### Выводы

Проведенные исследования показали достаточную точность полученных режимов управления локомотивом. Построенную базу нечетких правил, заменяющую собой модель движения поезда,

можно использовать как советчик машиниста для выбора управления на очередном участке пути с учетом условий неопределенности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Блохин Е. П., Пшинько А. Н., Евдомаха Г. В., Скалозуб В. В., Землянов В. Б. Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов // Залізничний транспорт України, №6, 2001. С. 19 –22.
2. Скалозуб В. В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии // Транспорт. Зб. наук. праць, вип. 12. – Дніпропетровськ, 2002. – С. 148 – 157
3. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М: «Горячая линия – Телеком», 2004.

Получено 04.05.2007 г.

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ГІБРИДНОЇ НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ СИНТЕЗУ ІСППР В ЗАДАЧАХ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

**Вступ.** Керамічне виробництво традиційно характеризується значною часткою зворотного браку на різних етапах виконання технологічного процесу. Така ситуація обумовлена недостатньою повнотою теоретичних обґрунтувань фізико-хімічних процесів, а також низьким рівнем автоматизації технологічних процесів, що створює передумови для виникнення помилок при прийнятті управлінських рішень, погіршує їх якість і оперативність.

**Мета роботи.** Для вирішення задач прогнозу значень фізико-хімічних параметрів водної суспензії (керамічного шлікера) вивчити ефективність використання в якості компоненти гібридної структури з властивостями апроксимації динамічних нейронних мереж Елмана.

**Результати досліджень.** Як свідчать матеріали публікацій в галузі теорії та прикладного використання штучних нейронних мереж [1], гібридні структури при їх практичній реалізації, як правило, є більш ефективними у порівнянні з мережами, що базуються на основі окремих нейромережових парадигм. Даний факт пояснюється тим, що результуюча структура набуває нових властивостей, які не притаманні кожній парадигмі окремо. В статті [2] розглянуті питання синтезу і моделювання процесів навчання та отримані на їх основі результати для компоненти гібридної структури з властивостями самоорганізації (мапа Кохонена). Вагові коефіцієнти нейронів мапи Кохонена по закінченню процесу навчання були заморожені. Таким чином, вхідними сигналами для компоненти гібридної структури з властивостями апроксимації буде виступати множина пар векторів  $(u_i, y_i)$ , де  $u_i$  – вектор, складений з вихідних сигналів синтезованої мапи Кохонена, а  $y_i$  – вектор цільових значень оригінального відображення  $(z_i, y_i)$   $y = [y_1, y_2, \dots, y_K]^T$ ;  $K = 9$  (фізико-хімічні параметри водної суспензії), якому відповідає  $u_i$ ,  $z = [z_1, z_2, \dots, z_N]^T$  – вхідний вектор для мапи Кохонена, що містить 27 значень

технологічних параметрів процесу структуроутворення водної суспензії (керамічного шлікера).

В даній статті викладені результати досліджень щодо можливості застосування в якості компоненти гібридної структури з властивостями апроксимації динамічної рекурсивної мережі Елмана. Наявність зворотних зв'язків між нейронами різних шарів (включаючи нейрони вихідного шару) надає меражам даного типу позитивних властивостей, які не можуть бути досягнуті в статичних багат шарових мережах [3]. Типовими прикладами застосування зазначених мереж є імітація нелінійних динамічних об'єктів, зокрема – систем управління машинами, пристроями і динамічними процесами, для яких динамічна мережа виступає в ролі моделі, а алгоритм уточнення вагових коефіцієнтів – у ролі процедури ідентифікації параметрів даної моделі [4]. Мережа Елмана характеризується частковою рекурентністю в формі зворотнього зв'язку між прихованим і вихідним шаром, що реалізується за допомогою одиничних елементів запізнювання [5]. Це дозволяє формувати правильну стратегію управління за рахунок врахування передісторії процесів, за якими спостерігають.

Вхідними сигналами моделі будуть являтися виходи компоненти з самоорганізацією. Вихід моделі з самоорганізацією при подачі на її вхід вектора  $z$  являє собою розріджену матрицю зв'язності розмірності [27x27]. З метою усунення несуттєвої інформації, яка буде привносити зайвий шум у вхідні дані  $i$ , в принципі, може впливати на вихідний сигнал, виконано перетворення матриці зв'язності у вектор індексів класів (кластерів). Після перетворення номер кластеру відповідає номеру строки матриці зв'язності. Зв'язаними з вектором  $U$  є два вихідних вектори: вектор фактичних вихідних сигналів  $D$  і вектор цільових сигналів  $Y$ :

$$D = [d_0, d_{i,1}, d_{i,2}, \dots, d_{i,m}]^T \quad (1)$$

$$Y = [y_0, y_{i,1}, y_{i,2}, \dots, y_{i,m}]^T \quad (2)$$

Фактичним статистичним матеріалом при виконанні досліджень були дані виробничої діяльності, що накопичені в базі даних підприємства “Дніпрокераміка” за 5 останніх років.

Як відомо, рішення щодо остаточної структури моделі може бути прийнято тільки після виконання певної кількості циклів (epoch) її навчання і досягненні похибки узагальнення на рівні, який

признається задовільним. Однак однозначних підходів щодо визначення значення похибки узагальнення штучних нейронних мереж на даний час не сформовано. В роботі [5] запропоновано характеризувати її співвідношенням:

$$E(w) \approx E_L(w) + \varepsilon \left( \frac{p}{h}, E_L \right) \quad (3)$$

де  $E(w)$  – похибка узагальнення нейромережі;  $E_L(w)$  – похибка навчання;  $\varepsilon$  – довірчий інтервал;  $p$  – кількість навчальних вибірок.

При формуванні структури моделі також враховували, що мінімізація похибки узагальнення на малій кількості навчальних послідовностей відносно кількості вагових коефіцієнтів може спровокувати випадковий характер значень більшості вагових коефіцієнтів, що при переході від навчальних до тестових множин даних може стати причиною суттєвих відхилень фактичних значень  $D$  від очікуваних  $Y$ .

Найбільш широке застосування (у тому числі і при вирішенні прикладних задач теорії управління) знайшли багат шарові нейронні мережі, з функціями активації сигмоїдного типу. Останні дозволяють забезпечити задану точність апроксимації при меншій розмірності нейронної мережі. У нашому випадку на відміну від рекомендацій, викладених в роботі Наренди [6], досліджувались моделі з нелінійними вихідними нейронами, що описуються функцією гіперболічного тангенсу. Це дозволяє значно скоротити розмірність мережі, час її навчання і при певній обмеженості в кількості навчальних даних – покращити її узагальнюючі властивості.

При формуванні структури мережі серйозною проблемою є визначення кількості прихованих шарів і контекстних шарів та кількості нейронів у них [1]. З огляду на препроцесорну обробку вхідних даних компонентою з самоорганізацією, в дослідженнях вивчалась можливість застосування мережі Елмана, що складається з одного прихованого і одного контекстного шару нейронів (в які при необхідності будуть додаватися додаткові нейрони). Як відомо, основним завданням нейронів контекстного шару є генерація бажаного вихідного сигналу на підставі порівняння образу, що надійшов, і образу, що запам'ятовувався в контекстному шарі.

Мета навчання компоненти гібридної структури полягала в підборі таких значень вагових коефіцієнтів синаптичних зв'язків

нейронів, щоб при заданому вхідному векторі  $U$  відгук моделі відповідав значенням фактичних сигналів  $d_i$ , які з 94% точністю і більше будуть дорівнювати очікуваним значенням  $y_i$ , для  $i=1, 2, \dots, m$ . В якості функціоналу  $E$ , що характеризує якість навчання моделі, використовували:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{T_H} \sum_{i=1}^{S^l} \left( y_i^t - d_i^{tS^l} \right)^2 \quad (4)$$

де  $T_H$  – об’єм навчальної вибірки;  $l$  – кількість шарів мережі;  $t$  – номер вибірки;  $S^l$  – кількість нейронів вихідного шару;  $d_i^{tS^l}$  – вектор сигналу на виході мережі;  $y_i^t$  – вектор цільових значень сигналу на виході мережі для вибірки з номером  $t$ .

Градиент цільової функції обчислювали за алгоритмом Левенберга-Марквардта [7]. Корегування значень вагових коефіцієнтів і зміщень здійснювали за методом зворотного розповсюдження похибки.

Відомо, що на результати навчання моделі значний вплив спричиняє вибір початкових значень вагових коефіцієнтів. Ідеальною є ситуація, коли початкові значення вагових коефіцієнтів є достатньо близькими до оптимальних. У цьому випадку будуть усунуті затримки в точках локальних мінімумів, що, відповідно, призведе до значного прискорення процесу навчання моделі. Однак універсального методу вибору початкових значень вагових коефіцієнтів, який би гарантував знаходження найкращої початкової точки для вирішення задач даного класу не існує, тому ініціалізація моделі виконувалась випадковими значеннями розподіленими рівномірно в діапазоні  $[-1 +1]$ .

Виконані експериментальні дослідження з моделювання процесу навчання мереж Елмана різної структури показали, що оптимальною з точки зору узагальюючих властивостей є модель структури 3-9, що вміщує 3 нейрони у прихованому шарі і, відповідно, 3 контекстних нейрони. При збільшенні числа нейронів у прихованому шарі спостерігається явище перенавчання мережі. Вихідний шар вміщує 9 нейронів, що відповідає кількості фізико-хімічних параметрів водної суспензії, які необхідно прогнозувати. На рис 1. показані результати моделювання процесу навчання мережі.

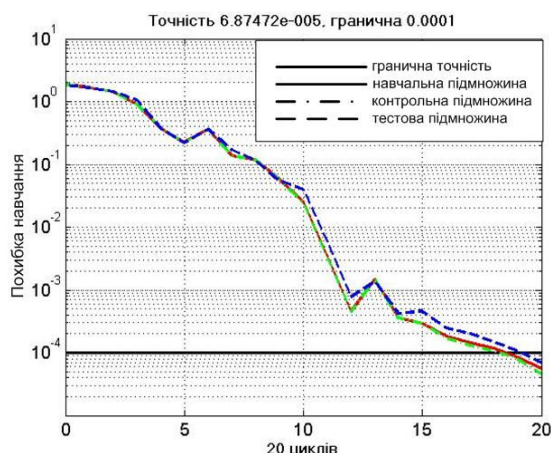


Рисунок 1 - Графік зміни похибки навчання моделі

Аналіз рис.1 свідчить, що необхідна відповідність між входом і виходом моделі забезпечується з середньоквадратичною похибкою 0,0001 на 18-му циклі навчання, при цьому похибки перевірки на контрольній і тестовій множині даних ведуть себе приблизно однаково, помітних тенденцій до перенавчання моделі не спостерігається.

Результати моделювання підсумкової нейромережі гібридної структури, що вирішує задачу прогнозу значень фізико-хімічних параметрів водної суспензії, наведено на рис. 2. Аналіз графіків свідчить, що апроксимаційні можливості мережі можна вважати задовільними: максимальне значення відносної похибки для контрольної підмножини складає 16,7% (середня відносна похибка моделі – 3,4%), для тестової підмножини – 5.7 % (середня відносна похибка моделі – 3,99%).

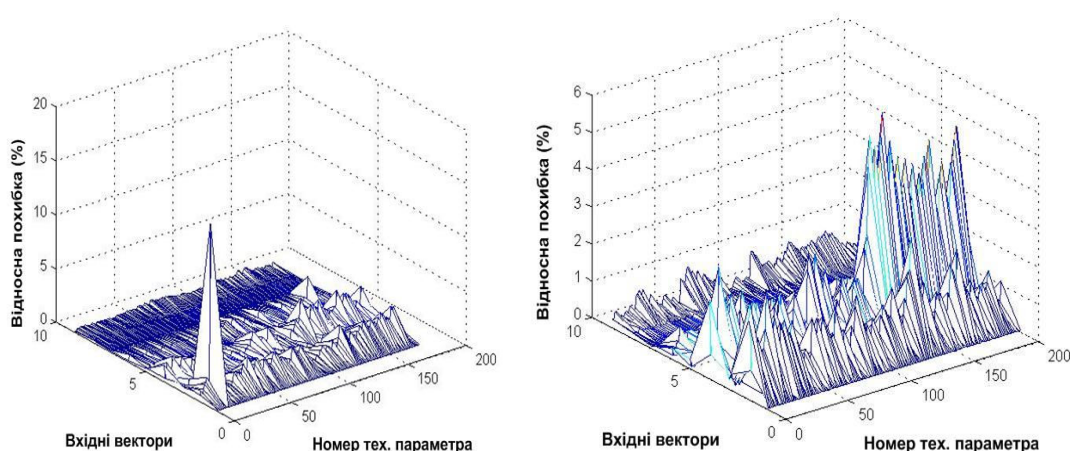


Рисунок 2 - Відносні похибки синтезованої моделі при пред'явленні на її вхід контрольної і тестової підмножин даних: а – контрольна; б – тестова підмножини вхідних даних



На заключеному етапі досліджень виконували порівняльний аналіз ефективності використання в якості компоненти гібридної структури з властивостями апроксимації мереж: прямого розповсюдження з повними послідовними зв'язками структури 3-9 та рекурентної мережі Елмана аналогічної структури. В обох випадках використовувались нейрони з функцією активації – гіперболічний тангенс, градієнт цільової функції обчислювали за алгоритмом Левенберга-Марквардта, корегування значень вагових коефіцієнтів і зміщень нейронів виконували за методом зворотного розповсюдження похибки.

**Висновки.** Аналіз отриманих результатів свідчить, що не дивлячись на певні переваги динамічних нейронних мереж, зокрема – їх можливості щодо прогнозування часових рядів, при вирішенні задачі прогнозування фізико-хімічних параметрів водних суспензій (керамічних шлікерів) в якості компоненти гібридної структури з властивостями апроксимації більш доцільно використовувати статичну мережу прямого розповсюдження з повними послідовними зв'язками: поперше – вона має кращі узагальнюючі властивості, по-друге – знімається проблема можливого виникнення її нестійких станів.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
2. Бешта О.С., Бабенко Т.В. Синтез компоненти гібридної нейромережі з властивостями самоорганізації // Науковий вісник НГУ. – 2007. – №3. – С. 61-63.
3. Руденко О.Г., Бодянський Є.В. Штучні нейронні мережі. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404с.
4. Tran Hoai L. Sieci neuronowe rekurencyjne - gradientowe algorytmy uczone i zastosowania w identyfikacji nieliniowych obiektow dynamicznych. Praca dyplomowa. – Warszawa: Politechnika Warszawska, 1997.
5. Haykin S. Neural networks, a comprehensive foundation. – N.Y: Macmillan Colege Publishing Company, 1994.
6. Narendra K. S., Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural networks // IEEE Trans. Neural Networks, 1990. – Vol. 1. - P. 4-27.
7. Marquardt, D., "An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters," SIAM J. Appl. Math, 1963. – Vol. 11. - P. 431-441.

Получено 03.04.2007 г.

УДК 004.773.3

О.С. Волковский, Е.В. Выборов

## **ЭВРИСТИКО-ЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ФИЛЬТРАЦИИ СПАМ-СООБЩЕНИЙ**

### **Постановка проблемы**

Электронная почта представляет собой современное и высокотехнологическое средство коммуникации. В настоящее время этот коммуникационный канал активно используется не только для обмена информацией, но и для продвижения товаров и услуг, в том числе и для рассылки спама.

Сейчас уже никого не надо убеждать в том, что спам – это негативное явление. Выпущены многочисленные спам-фильтры, позволяющие отфильтровывать до 85-95% нежелательной корреспонденции. Но данная проблема остается актуальной, так как даже при таком высоком проценте фильтрации большое количество спам-писем “пробивается” через фильтры и доходит до конечного пользователя, увеличивая время его работы с электронной почтой и принося тем самым большие финансовые убытки.

В данной статье описывается метод фильтрации почтовых спам-сообщений, основанный на статистическом анализе прямых и не прямых признаков спама, локализованный для русско(украино)-язычного спама и способный адаптироваться к тематике сообщений конкретного пользователя.

Обзор существующих методик.

В результате изучения существующей методологической базы фильтрации спама были выделены следующие основные методы:

1. Лингвистические методы, основанные на анализе содержания и автоматической классификации темы документа;
2. Лингвистические сигнатуры (анализ текстового содержания письма);
3. Формальные методы, основанные на анализе оформления технических заголовков писем и на наиболее надежных черных, белых и серых списках;
4. Обновления базы данных сигнатур и эвристик с базового сервера;

5. Обработка графических вложений в письма;
6. Вероятностные методы (метод Байеса, метод Фишера)
7. Статистические методы, фильтрующие спам на основе общих признаков.

Существуют также другие методы, которые не будут обсуждаться в данной статье.

Последнее время стали очень распространены вероятностные фильтры, основанные на теореме Байеса. Подобные фильтры отлично работают, но имеют ряд недостатков. В первую очередь это проблема переобучаемости. После определенного порога обучения их эффективность резко уменьшается (в среднем с 90% до 70-75%) и появляется большое количество ложных срабатываний (до 5-10%). Путей решения проблемы переобучения до сих пор не найдено. Кроме того, как показывает практика, для качественной работы вероятностных фильтров необходимо выделять дополнительные группы классификации для сообщений, таких как рассылки, а еще лучше рассылки определенной тематики. Иначе велика вероятность того, что такие сообщения будут отправляться в спам. Также такие фильтры не могут работать с графическим спамом, который можно отсеять только либо с использованием процессоров графического анализа, либо по непрямым признакам; и с различными трюками спамеров, такими как замаскированные слова, номера телефонов и т.д. Очень часто Байесовские фильтры называют «наивными» Байесовскими классификаторами. Слово «наивный» присутствует по той причине, что в используемой Теореме Байеса все признаки изначально принимаются статистически независимыми, что само по себе в спам-сообщениях не так.

Большинство недостатков фильтров, работающих на основе теоремы Байеса, отсутствуют в фильтрах, определяющих спам на основе общих его признаков. Но последние имеют свои минусы. Например, и в том, и в другом случае результатом оценки является, так называемый, “вес” письма. Однако при применении метода с использованием признаков спама “вес” письма вычисляется только на основе “плохих” признаков, что приводит к “обвинительному уклону” фильтра, и, как следствие, появляются ложные срабатывания.

Исходя из вышеописанного, существует необходимость создания фильтрующей системы, комбинирующей в себе преимущества вероятностных методов и методов, определяющих спам на основе его общих признаков.

### Обзор системы

Целью исследований являлась разработка системы фильтрации спам сообщений, основанной на статистическом анализе прямых и не прямых признаков спама, локализованной для русско(украино)-язычного спама и способной адаптироваться к тематике сообщений конкретного пользователя.

Созданная система, как альтернативу применению правила Байеса, использует собственную метрику признаков. Каждый признак имеет 2 показателя вероятностей:

- вероятность обнаружить этот признак в спам сообщении;
- вероятность обнаружить признак в корректном сообщении.

Эти вероятности задаются по умолчанию, но могут изменяться администратором системы вручную, либо путем обучения фильтра на готовом наборе писем пользователя. Весовой коэффициент  $i$ -го признака вычисляется по следующей формуле:

$$P_i = \frac{P_{спам} - P_{не\_спам}}{P_{спам}} \quad (1)$$

По умолчанию в системе заданы 3 результирующие категории сообщений: спам, нормальное письмо, сомнительное письмо. Эти категории разделяются в зависимости оттого, в какой интервал попала результирующая вероятность проанализированного письма. Интервалы заданы по умолчанию, но могут и должны изменяться администратором системы для получения более корректных результатов фильтрации.

Результирующая вероятность определяется по следующей формуле:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N} \quad (2)$$

где  $N$  – количество проанализированных признаков.

Письмо проверяется, начиная с наиболее важных признаков. Если один из важных признаков найден и его вероятность превышает

порог спама, то проверка останавливается и сообщение относится к категории спама.

Система использует следующие основные признаки, позволяющие классифицировать сообщение:

1. Набор слов, наиболее часто встречающихся в спаме. Список этих слов задан по умолчанию, но может переформировываться из существующей базы электронных сообщений пользователя, что позволяет адаптировать фильтр к тематике корректных/спам сообщений пользователя. Слова автоматически разделяются на группы однокоренных. Каждое из слов имеет как характеристику  $Z$  вероятности: вероятность появления слова с спам сообщении; вероятность появления слова в корректном сообщении; вероятность того, что это спам сообщение, если слово встретилось в замаскированной (преднамеренно искаженной) форме. Некоторым словам, таким как «рассылка», по умолчанию завышаются коэффициенты, так как их появление в сообщении с большой долей уверенности гарантирует, что это спам.

2. По умолчанию заданный набор словосочетаний, характеризующий данное письмо как спам. Этот набор так же может изменяться и добавляться администратором.

3. Наличие обратной связи. Это могут быть номера телефонов, адреса электронной почты, ссылки на веб-сайты, реже, почтовые адреса. Часто способы обратной связи маскируются, для того, что бы обойти вероятностные фильтры. Поэтому созданный фильтр ищет и распознает несколько уровней маскировки обратной связи (в частности телефонов), каждому из уровней присваивается своя вероятность того, что рассматриваемое сообщение - спам.

4. Визуальное выделение текста и фрагментов текста. Для обычных текстовых сообщений это выделение прописными буквами. Для HTML писем это выделение цветом, размером, стилем шрифта, цветом фона и т.д. Важным признаком является написание темы письма (поле Subject) прописными буквами.

5. Наличие замаскированного текста в HTML сообщениях, например, цвет которого задан цветом фона. Подобные трюки необходимы спамерам для обхода вероятностных фильтров, так как могут содержать в себе текст, характерный для корректных писем, либо делать не читаемыми для фильтров некоторые слова или даже

все письмо (например, невидимые символы ставятся вместо пробелов).

6. Отсутствие в списке получателей письма реального адреса получателя. Этот признак практически гарантирует, что сообщение является спамом.

7. Список получателей письма содержит адреса, начинающиеся с одинаковой комбинации букв. Этот признак обусловлен тем, что рассылка спам-сообщений часто производится по выборке из базы данных электронных адресов будущих получателей, которая упорядочена по алфавиту.

8. Другие, менее значительные, лингвистические и формальные признаки.

Нахождение всех лингвистических признаков в системе основано на регулярных выражениях (RegEx). Например, для нахождения замаскированных слов в сообщении используется генератор регулярных выражений, который строит их на основе так называемых алиасов (похожие по начертанию символы) знаков кириллицы. Алиасы могут добавляться/изменяться администратором системы. Например, для слова «рассылка» будет сгенерировано регулярное выражение:

```
[pPpPrR](\w?|W?|s?)[aAaA@](\w?|W?|s?)[cCcC\\(\\w?|W?|s?)[cCcC\\(\\w?|W?|s?)[ыЫI](\w?|W?|s?)[лЛlL](\w?|W?|s?)[кКkK](\w?|W?|s?)[aAaA@](\w?|W?|s?)
```

В результате в наборе сообщений будут найдены следующие слова: p@ссылк@, рассылка, R@ссыка и т.д. При этом, если в тех же местах текста регулярное выражение для поиска НЕ замаскированных слов ничего не нашло, то к общей вероятности прибавляется весовой коэффициент замаскированного слова, что практически гарантирует отнесение его к спам-сообщениям.

Также регулярные выражения используются для поиска замаскированных телефонных номеров. Нахождение телефонного номера, подобного этому «+38 (044) 4-5.5-9.9-9.9» практически гарантирует отнесение сообщения к спаму.

### Результаты экспериментов

Изначально, проводилось тестирование на 600 писем (500 – спам, 100 – корректные сообщения) без обучения и настройки. Все

значения использовались по умолчанию. Были получены следующие результаты:

Таблица 1

## Результаты эксперимента без обучения

	Корректные сообщения	Сообщения зоны неопределенности	Спам-сообщения
Спам (500)	1,2% (6)	5,6% (28)	93,2% (464)
Не спам (100)	92% (92)	6% (6)	2% (2)

Затем система была обучена на оттестированных сообщениях (500 – спам, 100 – корректные сообщения) и через неё был пропущен новый набор сообщений (также 500 – спам, 100 – корректные сообщения). В результате эксперимента были получены следующие результаты:

Таблица 2

## Результаты эксперимента после обучения

	Корректные сообщения	Сообщения зоны неопределенности	Спам-сообщения
Спам (500)	0,6% (3)	4,8% (24)	94,6% (473)
Не спам (100)	95% (95)	4% (4)	1% (1)

В первом и втором экспериментах был использован интервал классификации сообщения, заданный по умолчанию. Для устранения ложных срабатываний фильтра, эти значения были адаптированы под имеющийся набор сообщений: 0 – 0,4 – корректное сообщение; 0,41 – 0,75 – сомнительное сообщение; 0,76 – 1 – спам.

Кроме того, были повышены весовые коэффициенты для таких признаков, как слабо замаскированный номер телефона и заголовки письма прописными буквами. Изменения были обусловлены тем, что в корректных сообщениях из рассматриваемого набора такие признаки практически не встречаются, в отличие от спама.

В итоге, через систему был пропущен полный набор сообщений: 1000 спам сообщений и 200 корректных сообщений и в результате эксперимента были получены следующие результаты:

Таблица 3

## Результаты эксперимента после обучения и настройки

	Корректные сообщения	Сообщения зоны неопределенности	Спам-сообщения
Спам (1000)	0,5% (5)	5% (50)	94,5% (473)
Не спам (200)	96,5% (193)	3% (6)	0,5% (1)

### **Выводы**

Предложенный метод показал свою пригодность в задачах фильтрации спам-сообщений. Несомненным преимуществом метода является простота и гибкость реализации, дальнейшего администрирования и обслуживания, а также отсутствие необходимости привлечения сторонних лицензионных программных продуктов.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Paul Graham, Better Bayesian filtering, 2003.
2. Gary Robinson, A statistical approach to the spam problem, 2003.
3. А. Власова, К. Зоркий, Проблема намеренных искажений письменного текста в электронных рекламных рассылках (спаме). 2004.
4. И.С. Ашманов, А.Е. Власова, К.П. Зоркий, А.П. Иванов, А.Л. Калинин Технология фильтрации содержания для Интернет // Труды Международного семинара Диалог'2002 по компьютерной лингвистике и ее приложениям. Том 2. Москва 2002.

Получено 22.03.07



## ПРО ЗАДАЧУ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ЇХ КАРКАСНОЮ ІНТЕРПОЛЯЦІЄЮ

### Вступ

Сучасний стрімкий розвиток цифрової відеотехніки та технологій швидкісної передачі графічної інформації ставить проблему покращення зорової якості цифрових зображень внаслідок їх просторові інтерполяції як одну з найактуальніших в цій області. В основі її розв’язання лежить розробка нових підходів до побудови алгоритмів зміни просторової щільності пікселів. Одним із них є підхід, який ґрунтується на двоетапній схемі просторової інтерполяції. На першому етапі розв’язується задача каркасної інтерполяції, яка полягає у відтворенні інтерпольованого зображення в околі тієї частини топографічної карти, яка містить вихідний масив пікселів. Ця множина називається каркасом і має густо перфорований характер. На другому етапі проблема полягає у відтворенні результуючого зображення поза межами каркасу. Власне питанням постановки і розв’язності цієї задачі, яка називається задачею реконструкції цифрових зображень, і присвячена дана робота.

Позначимо через  $\Delta^{WH}$  рівномірну дискретну сітку на множині  $\bar{\Delta} = [0, W] \times [0, H]$ :  $\Delta^{WH} = \{(i, j) : i = 1, 2, \dots, N = [H], j = 1, 2, \dots, M = [W]\}$ . Надалі точки множини  $\Delta^{WH}$  будемо називати пікселами. Нехай  $\{P_{ij}(I)\}_{i=1, N}^{j=1, M} = P(I)$  є довільним цифровим малюнком деякого регулярного зображення  $I \in D'(\Delta)$  в шкалі сірих відтінків, для якого  $\text{supp } I = \Delta$ ,

$$\langle I, \varphi \rangle = \int_{\Delta} \tilde{I}(x, y) \varphi(x, y) dx dy \text{ для всіх } \varphi \in D(\Delta),$$

а породжуюча функція  $\tilde{I}$  задовольняє умову  $\tilde{I} \in BV(\Delta)$ . Тут через  $BV(Q)$  позначено лінійний простір всіх функцій з  $L^2(Q)$ , варіація яких на  $Q$  є обмеженою. Як відомо [3],  $BV(Q)$  є банаховим простором відносно норми,  $\|f\|_{BV(Q)} = \|f\|_{L^2(Q)} + \int_Q |Du|$ , де позначено

$$\int_Q |Du| = \sup \left\{ \int_Q u \operatorname{div} \varphi \, dx : \varphi \in C_0^1(Q, R^2), |\varphi(x)| \leq 1 \right. \\ \left. \int_Q |Du| = \sup \left\{ \int_Q u \operatorname{div} \varphi \, dx : \varphi \in C^1(Q; R^2), |\varphi(x)| \leq 1 \text{ для } x \in Q \right\} . \right. \quad (1)$$

Нехай  $\Omega$  - довільний допустимий каркас для  $I \in BV(\Delta)$ , а зображення  $I^* \in D'(\Delta)$  є відповідною каркасною інтерполяцією для  $I$ . Тобто його образ  $P(I^*)$  на піксельну сітку  $\Delta^{WH}$  співпадає з  $P(I)$ ,  $\operatorname{supp} I^* = \Omega$ , та існують функція  $\tilde{I}^* : \Omega \rightarrow R$  і диз'юнктивне розбиття множини  $\Omega = \bigcup_{i=1}^L \Omega_i$  ( $\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset, i \neq j$ ) такі, що  $\tilde{I}^* \in C(\overline{\Omega}_i) \cap H^2(\Omega_i)$   $\forall i = 1, \dots, L$  і

$$\langle I^*, \varphi \rangle = \int_{\Omega} \tilde{I}^*(x, y) \varphi(x, y) \, dx dy \text{ для всіх } \varphi \in D(\Omega).$$

Тоді проблемою реконструкції зображення  $I \in BV(\Delta)$  будемо називати задачу інтерполяції функції  $\tilde{I}^* : \Omega \rightarrow R$  на множину  $\Delta \setminus \Omega$ , або інакше задачу побудови функції  $u = Z[\tilde{I}^*] \in BV(\Omega)$  (тут  $Z : BV(\Omega) \rightarrow BV(\Delta)$  - оператор продовження), при якій результуюче зображення

$$\langle \tilde{I}, \varphi \rangle = \int_{\Omega} Z[\tilde{I}^*](x, y) \varphi(x, y) \, dx dy \quad \forall \varphi \in D(\Omega)$$

задовольняло б принципу “неперервного продовження” Gestaltist’a (the Good Continuation Principle of Gestaltist) [4]. Отже, реконструкція зображень передбачає відтворення значень функції  $\tilde{I}^*$  в області  $\Delta \setminus \Omega$  за її значеннями на каркасі  $\Omega$ . Оскільки проблема побудови будь-якого оператора продовження зазвичай є такою, що не має єдиного розв’язку, то дана робота ставить за мету започаткувати варіаційний підхід до розв’язання таких задач, навести формальну їх постановку та результати, щодо розв’язності проблеми реконструкції статичних зображень.

### Попередні теоретичні положення

Введемо наступні позначення:  $\tilde{\Omega} = \operatorname{int}(\Delta \setminus \Omega)$ ,  $B = \operatorname{int} \Omega$ . Ясно, що  $B$  та  $\tilde{\Omega}$  є відкритими множинами в  $R^2$  з кусково-гладкими границями і при цьому  $\overline{B} = \Omega$ . Розглянемо наступні функціональні простіри

$$X(Q) = \{ \theta \in L^\infty(Q, R^2) : \operatorname{div}(\theta) \in L^\infty(Q) \} \quad (2)$$

$$L_{BV}(Q) = \{ u \in L^2(Q) : T_k(u) \in BV(Q), \forall k > 0 \} \quad (3)$$

де  $k \geq 0$  довільне число, а оператор  $T_k$  означено як  $T_k(u) = [k - (k - u)^+] \text{sign}_0(u)$ . Ясно, що множина  $L_{BV}(Q)$  утворює лінійний підпростір простору  $L^2(Q)$ .

В роботі [2] показано, що для будь-якої функції  $z \in X(Q)$  її нормальна складова  $z \cdot \nu^Q$  має слабкий слід на границі  $\partial Q$ , тобто існує лінійний оператор  $\gamma: X(Q) \rightarrow L^\infty(\partial Q)$  такий, що  $\|\gamma(z)\|_{L^\infty(\partial Q)} \leq \|z\|_{L^\infty(Q, R^2)}$  і  $\gamma(z)(x) = z(x) \cdot \nu^Q(x) \quad \forall x \in \partial Q$  якщо  $z \in C^1(\bar{Q}, R^2)$ , де через  $\nu^Q(x)$  позначено зовнішню одиничну нормаль до границі  $\partial Q$  в точці  $x$ . Більше того, для довільної пари функцій  $w \in BV(Q)$  та  $z \in X(Q)$  має місце наступна формула Гріна [1].

$$\int_Q w \operatorname{div}(z) \, dx + \int_Q (z \cdot Dw) = \int_{\partial Q} z \cdot \nu^Q w \, d\mathcal{H} \quad (4)$$

Тут через  $(z \cdot Dw)$  позначено лінійний неперервний функціонал над простором  $C_0^1(Q)$ , дія якого визначається за правилом

$$\langle (z \cdot Dw), \varphi \rangle = - \int_Q \operatorname{div}(z\varphi) w \, dx \quad (5)$$

Нехай  $g \in L^\infty(\partial Q)$  - довільна фіксована функція така, що  $\|g\|_{L^\infty} < 1$ .

**Означення 1.** Будемо казати, що пара  $(u, v)$  належить графіку оператора  $\mathcal{B}$  (скорочено  $(u, v) \in \operatorname{Graph}(\mathcal{B})$ ), якщо  $u \in L_{BV}(Q)$ ,  $v \in L^\infty(Q)$  і при цьому існує розподілення  $z \in X(Q)$  таке, що

$$\operatorname{div} z = -v \quad \text{в } D'(Q) \quad (6)$$

$$z \cdot DT_k(u) = |DT_k(u)| \quad \forall k > 0, \quad (7)$$

$$z \cdot \nu^Q = g \quad \text{майже скрізь на } \partial Q \quad (8)$$

Неважко показати, що означена таким чином множина  $\operatorname{Graph}(\mathcal{B})$  завжди непуста, а оператор  $\mathcal{B}$  монотонний. Встановимо наступний результат.

**Твердження 1.** Оператор  $\mathcal{B}$  є секвенційно замкненим в добутку сильної топології на  $L^r(Q)$  ( $r \in [1, 2)$ ) та топології \*-слабкої збіжності на  $L^\infty(Q)$ , тобто, якщо  $(u_n, v_n) \in \operatorname{Graph}(\mathcal{B})$ ,  $u_n \rightarrow u$  в  $L^r(Q)$ , а  $v_n \overset{*}{\rightharpoonup} v$  в  $L^\infty(Q)$ , то  $(u, v) \in \operatorname{Graph}(\mathcal{B})$ .

**Доведення.** Нехай пари  $(u_n, v_n) \in \operatorname{Graph}(\mathcal{B})$  є такими, що  $u_n \rightarrow u$  в  $L^r(Q)$ , а  $v_n \overset{*}{\rightharpoonup} v$  в  $L^\infty(Q)$ . Покладемо  $f_n = u_n - v_n$ . Тоді  $f_n \overset{*}{\rightharpoonup} f = u - v$  в

$L^r(Q)$ . Означимо при кожному  $n$  функції  $\theta_n$  за правилом:  $\theta_n \in L^\infty(Q, R^2)$ ,  $|\theta_n| \leq 1$ ,  $\theta_n \cdot DT_k(u_n) = |DT_k(u_n)|$  і  $\theta_n \cdot \nu^Q = g$ . Ясно, що функції  $\theta_n$  утворюють рівномірно обмежену послідовність в  $L^\infty(Q, R^2)$ . Отже, згідно з теоремою Банаха-Алаоглу, можна вважати, що ця послідовність є \*-слабко збіжною в  $L^\infty(Q, R^2)$ , тобто знайдеться елемент  $\theta \in L^\infty(Q, R^2)$  такий, що

$$\int_Q \theta_n \psi dx \rightarrow \int_Q \theta \psi dx \quad \forall \psi \in L^1(Q).$$

За означенням оператора  $\operatorname{div}$  маємо

$$\int_Q \theta_n \cdot \nabla \varphi dx = - \int_Q \operatorname{div} \theta_n \varphi dx \quad \forall \varphi \in C_0^\infty(Q).$$

Отже, переходячи в співвідношенні  $\operatorname{div} \theta_n = -\nu_n$  до границі, коли  $n \rightarrow \infty$ , отримаємо  $\operatorname{div} \theta = -\nu$ . Тим самим показано, що співвідношення (6) для граничних елементів виконується.

Доведемо тепер властивість замкненості в (8). Нехай  $\varphi$  - довільна неперервна функція на  $Q$  включно до її границі  $\partial Q$ . Перепишемо співвідношення (6) у вигляді  $u_n + \operatorname{div} \theta_n = f_n$ , помножимо його на  $\varphi \in C(\bar{Q}) \cap C^1(Q)$  і скористаємося формулою Гріна. Отримаємо

$$\int_Q u_n \varphi dx - \int_Q \theta_n \cdot \nabla \varphi dx + \int_{\partial Q} \theta_n \cdot \nu^Q \varphi d\mathcal{H} = \int_Q f_n \varphi dx. \quad (9)$$

Враховуючи, що  $\theta_n \cdot \nu^Q = g$ , перейдемо в (9) до границі при  $n \rightarrow \infty$ . Маємо

$$\int_Q u \varphi dx - \int_Q \theta \cdot \nabla \varphi dx + \int_{\partial Q} g \varphi d\mathcal{H} = \int_Q f \varphi dx,$$

або скориставшись формулою інтегрування за частинами

$$\int_Q u \varphi dx + \int_Q \operatorname{div} \theta \varphi dx - \int_{\partial Q} (\theta \cdot \nu^Q - g) \varphi d\mathcal{H} = \int_Q f \varphi dx.$$

Оскільки  $u + \operatorname{div} \theta = f$ , то з попереднього знаходимо  $\int_{\partial Q} (\theta \cdot \nu^Q - g) \varphi d\mathcal{H} = 0$  при всіх  $\varphi \in C(\bar{Q}) \cap C^1(Q)$ .

Отже,  $\theta \cdot \nu^Q = g$  на  $\partial Q$ .

Таким чином залишається довести, що  $(\theta \cdot DT_k(u)) = |DT_k(u)|$ . Для цього залучимо наступну властивість напівнеперервності знизу (див. [3]): нехай  $\{f_j\}_{j \in \mathbb{N}} \subset BV(Q)$  - довільна послідовність, яка збігається в  $L^1_{loc}(Q)$  до деякої функції  $f$ . Тоді має місце нерівність

$$\int_Q |Df| \leq \liminf_{j \rightarrow \infty} \int_Q |Df_j|. \quad (10)$$

Отже,

$$\begin{aligned} & \int_Q |DT_k(u)| - \int_{\partial Q} gT_k(u) d\mathcal{H} \leq \liminf_n \left[ \int_Q |DT_k(u_n)| - \int_{\partial Q} gT_k(u_n) d\mathcal{H} \right] = \\ & = \liminf_n \left[ \int_Q (\theta_n \cdot DT_k(u_n)) - \int_{\partial Q} gT_k(u_n) d\mathcal{H} \right] = \\ & = \liminf_n \left[ - \int_Q \operatorname{div} \theta_n T_k(u_n) dx + \int_{\partial Q} \theta_n \cdot \nu^Q T_k(u_n) d\mathcal{H} - \int_{\partial Q} gT_k(u_n) d\mathcal{H} \right] = \\ & = - \liminf_n \int_Q \operatorname{div} \theta_n T_k(u_n) dx = - \int_Q \operatorname{div} \theta T_k(u) dx = \\ & = \int_Q (\theta \cdot DT_k(u)) - \int_{\partial Q} gT_k(u) d\mathcal{H} \leq \int_Q |DT_k(u)| - \int_Q gT_k(u) d\mathcal{H}. \end{aligned}$$

Звідки випливає, що  $\theta \cdot DT_k(u) = |DT_k(u)|$  для всіх  $k > 0$ . Тим самим включення  $(u, \nu) \in \operatorname{Graph}(\mathcal{B})$  доведено.

### Постановка задачі реконструкції зображень

Нехай  $I \in BV(\Delta)$  - довільне допустиме зображення, а  $I^* \in D'(\Delta)$  є його каркасною інтерполяцією, для якої виконуються умови

$$\langle I^*, \theta \rangle = \int_B \tilde{I}^*(x) \theta(x) dx \text{ для всіх } \theta \in D(B), \tilde{I}^* \in BV(B).$$

Тут, як і раніше, ми позначаємо  $\tilde{\Omega} = \operatorname{int}(\Delta \setminus \Omega)$ ,  $B = \operatorname{int}\Omega$ .

Нехай  $\theta^*$  є векторним полем градієнтів функції  $\tilde{I}^*$  на  $B$ , яке задовольняє наступні умови:

$$\theta^* \in L^\infty(B, R^2), |\theta^*| \leq 1, \operatorname{div} \theta^* \in L^\infty(B), \quad (11)$$

$$(\theta^*, D\tilde{I}^*) = |D\tilde{I}^*| \text{ як міри на } B. \quad (12)$$

Ми будемо завжди припускати, що  $\theta^*$  має слід на границі множини  $\Omega$ . Проте, за побудовою границя каркаса  $\partial B$  завжди підлягає декомпозиції на дві складові  $\partial B = \partial B_{ext} \cup \partial B_{int}$ , де  $\partial B_{ext} = \partial B \cap \partial \Delta = \partial \Delta$ . В зв'язку з цим вважатимемо, що є заданими дві функції  $g \in L^\infty(\partial B_{ext})$  та  $g_0 \in L^\infty(\partial B_{int})$  такі, що

$$\|g\|_{L^\infty(\partial B_{ext})} < 1; \quad \|g_0\|_{L^\infty(\partial B_{int})} < 1;$$

$\theta^* \cdot \nu^\Delta = g$  майже скрізь на  $\partial B_{ext}$ ,  $\theta^* \cdot \nu^B = g_0$  майже скрізь на  $\partial B_{int}$ .

Задача реконструкції зображення полягає в визначенні функції  $u: \Delta \rightarrow R$  та векторного поля  $u: \Delta \rightarrow R^2$  таких, що  $\theta$  є продовженням поля  $\theta^*$  на множину  $\tilde{\Omega}$ , при якому:

функція  $\theta \cdot \nu^B: \partial B_{int} \rightarrow R$  є близькою за метрикою  $L^\infty(\partial B_{int})$  до функції  $g_0$ ;

$|\theta(x)| \leq 1$  та  $\theta \cdot Du = |Du|$  майже скрізь на  $\Delta$ ;

кривизна ліній рівнів  $u(x) = \lambda$ ,  $\lambda \in R$  в області  $\Delta$  є мінімальною в наступному сенсі:  $\|\operatorname{div} \theta\|_{L^\infty(\Delta)} \rightarrow \inf$ .

Таким чином, поле  $\theta$  повинно, з однієї сторони, успадковувати геометрію поля градієнтів функції  $u$ , а з іншої, на границі  $\partial B_{\text{int}}$  бути близьким до поля  $\theta^*$ . Зауважимо також, що виконання умови  $|\theta(x)| = 1 \forall x \in \Delta$  в загальному випадку неможливо. Дійсно, якщо  $u(x) = \text{const}$ , що є типічним для ділянок зображення з постійною інтенсивністю, то  $\theta(x) = 0$ . Отже, його нормалізація за правилом  $\theta = Du / |Du|$ , що є типовим для гладких функцій, неможлива.

Для формальної постановки задачі введемо наступний функціональний простір

$$W_\xi(\Delta) = \{(u, \theta) : u \in BV(\Delta), \theta \in X(\Delta), \|\operatorname{div} \theta\|_{L^\infty(\Delta)} \leq \xi, \\ |\theta(x)| \leq 1, \theta \cdot Du = |Du|, \theta \cdot \nu^\Delta = g \text{ на } \partial\Delta\} \quad (13)$$

На елементах простору  $W_\xi(\Delta)$  означимо функціонал:

$$J(u, \theta) = \int_\Delta |\operatorname{div} \theta|^2 (\gamma + \beta |\nabla k * u|) dx + \alpha \int_\Delta |Du| - \alpha \int_{\partial\Delta} g u d\mathcal{H} + \\ \tau \operatorname{ess\,sup}_{x \in \partial B_{\text{int}}} |\theta \cdot \nu^B - g_0| + \lambda \int_B |u - \tilde{I}^*|^2 dx. \quad (14)$$

Тут  $\gamma, \alpha, \tau, \lambda, \beta$  - додатні вагові коефіцієнти,  $k \in C^1(\Delta)$  - регуляризуюче ядро таке, що  $k(x) > 0$  всюди на  $\tilde{\Omega}$ . Через  $\nabla k * u$  позначено оператор згортки

$$\nabla k * u = \int_\Delta \nabla k(x-y) u(y) dy.$$

**Означення 2.** Будемо казати, що зображення  $I^0 \in D'(\Delta)$  є результатом реконструкції за каркасною інтерполяцією його дискретних значень на дискретній сітці  $\Delta^{WH}$ , якщо  $\langle I^0, \varphi \rangle = \int_\Delta \tilde{I}^0(x) \varphi(x) dx$  для всіх  $\varphi \in D(\Delta)$ ,  $\tilde{I}^0 \in BV(\Delta)$ , де

$$\tilde{I}^0(x) = \begin{cases} u^0(x), & x \in \tilde{\Omega} \\ \tilde{I}^*(x), & x \in \Omega \end{cases} \quad (15)$$

а пара  $(u^0, \theta^0)$  є розв'язком наступної варіаційної задачі

$$J(u^0, \theta^0) = \inf_{(u, \theta) \in W_\xi(\Delta)} J(u, \theta). \quad (16)$$

Наведемо деякі пояснення щодо вибору структури цільового функціоналу (16). Наявність в ньому виразу  $\text{ess sup}_{x \in \partial B_{\text{int}}} |\theta \cdot \nu^B - g_0|$  продиктована принципом “неперервного продовження” Gestaltist’a [4], згідно з яким ті лінії рівня, які перетинають границю  $\partial B_{\text{int}}$  каркасу  $\Omega$  повинні зберігати свій напрям близьким до  $g_0 = \nabla \tilde{I}^* \cdot \nu^B$  на  $\partial B_{\text{int}}$ . Терм  $\lambda \int_B |u - \tilde{I}^*|^2 dx$  є релаксаційною формою умови близькості функцій  $u$  та  $\tilde{I}^*$  на множині  $B$ . Що торкається виразу  $M = \int_{\Delta} |\text{div } \theta|^2 (\gamma + \beta |\nabla k * u|) dx + \alpha \int_{\Delta} |Du|$ , то значення оператора дивергенції  $\text{div}: X(\Delta) \rightarrow L^\infty(\Delta)$  на розподіленнях  $\theta \in X(\Delta)$  зазвичай асоціюють з кривизною ліній рівня  $u(x) = \text{const}$  реконструйованого зображення. Отже, мінімізація виразу  $M$  передбачає такий спосіб реконструкції зображення, при якому кривизна ліній рівнів була би мінімальною.

### Про розв’язність задачі реконструкції зображень

Перш ніж перейти до доведення розв’язності задачі умовної мінімізації (16), наведемо деякі попередні результати. Позначимо через  $B_r(x)$  кулю в  $R^2$  радіусом  $r$  з центром в точці  $x$ . Нехай  $A$  – довільна підмножина  $B_r(x)$ . Позначимо через  $|A|$  міру Лебега множини  $A$ . Нехай  $x$  – довільна точка границі  $\partial \Delta$ . Ведемо до розгляду функцію  $q: \partial \Delta \rightarrow R$  за наступним правилом

$$q(x) = \limsup_{r \rightarrow 0^+} \{ \text{Per}^{-1}(A, \Delta) \int_{\partial \Delta} \chi_A d\mathcal{H} : A \subset B_r(x), |A| > 0 \}. \quad (17)$$

Тут  $\text{Per}(A, \Delta)$  є периметром множини  $A$  відносно  $\Delta$ , тобто

$$\text{Per}(A, \Delta) = \int_{\Delta} |D\chi_A(x)| = \sup \{ \int_A \text{div } \varphi dx : \varphi \in C_0^1(\Delta; R^2), |\varphi(x)| \leq 1 \}.$$

Оскільки границя множини  $\Delta$  кусково-гладка за побудовою, то легко бачити, що  $q(x) = 1$  при всіх  $x \in \partial \Delta$ . Нехай  $g \in L^\infty(\partial \Delta)$  – довільна функція, яка задовольняє умову  $\|g\|_{L^\infty(\partial \Delta)} < 1$ . Тоді знайдеться  $\sigma > 0$  таке, що

$$\|gq\|_{L^\infty(\partial \Delta)} = 1 - 2\sigma < 1.$$

Отже, у відповідності до леми 1.2 з роботи [3], маємо:

$$\left| \int_{\partial \Delta} g w d\mathcal{H} \right| \leq (1 - \sigma) \int_{\Delta} |Dw| + C \int_{\Delta} |w| dx \quad \forall w \in BV(\Delta),$$

де константа  $C$  може залежати лише від  $\sigma, g$  та  $\Delta$ .

З іншої сторони, за лемою 2.2 з [3], знайдеться константа  $\varepsilon_0 > 0$  така, що для кожного  $\delta > 0$  можна вказати величину  $c(\delta) > 0$ , при якій буде виконуватися нерівність

$$\left| \int_{\partial\Delta} g w d\mathcal{H} \right| \leq (1 - \varepsilon_0) \int_{S_\delta} |Dw| + c(\delta) \int_{S_\delta} |w| dx \quad \forall w \in BV(\Delta), \quad (18)$$

де позначено  $S_\delta = \{x \in \Delta : d(x, \partial\Delta) < \delta\}$ .

Тепер наведемо основний результат даного розділу.

**Теорема 1.** Нехай  $\gamma, \alpha, \tau, \beta$  - задані додатні величини ( $\beta \geq 0$ ),  $k \in C^1(\Delta)$  - довільна функція. Тоді при кожному значенні  $\xi > 0$  знайдеться  $\lambda > 0$  таке, що множина розв’язків задачі (16) є не пустою.

**Доведення.** Перш за все покажемо, що функціонал  $J = J(u, \theta)$  обмежений знизу на множині допустимих розв’язків  $W_\xi(\Delta)$ . Дійсно, виходячи з нерівності (18) маємо

$$\begin{aligned} J(u, \theta) &\geq \alpha \int_\Delta |Du| - \alpha(1 - \varepsilon_0) \int_{S_\delta} |Du| - \alpha c(\delta) \int_{S_\delta} |u| dx + \lambda \|u - \tilde{I}^*\|_{L^2(B)}^2 \geq \\ &\geq \alpha \varepsilon_0 \int_{S_\delta} |Du| - \alpha c(\delta) \int_{S_\delta} |u| dx + \lambda \|u - \tilde{I}^*\|_{L^2(B)}^2. \end{aligned} \quad (19)$$

Оскільки  $\delta$  - довільна величина, то оберемо її так, щоб виконувалося включення  $S_\delta \subset B$ . За означенням допустимого каркасу таке включення є завжди можливим. Отже, за виконання умови  $\|u - \tilde{I}^*\|_{L^2(B)} \neq 0$ , існує можливість вибору параметра  $\lambda > 0$ , при якому права частина співвідношення (19) буде завжди невід’ємною. Таким чином,  $J(u, \theta) > 0$  при всіх  $(u, \theta) \in W_\xi(\Delta)$ . В результаті

$$\inf_{(u, \theta) \in W_\xi(\Delta)} J(u, \theta) \geq 0.$$

Якщо ж при деякому  $\mathfrak{k} \in BV(\Delta)$  виконується співвідношення  $\|\mathfrak{k} - \tilde{I}^*\|_{L^\infty(B)} = 0$ , то в силу включення  $S_\delta \subset B$  величина

$$\alpha \varepsilon_0 \int_{S_\delta} |D\mathfrak{k}| - \alpha c(\delta) \int_{S_\delta} |\mathfrak{k}| dx = \mathfrak{C}$$

є сталою. Отже  $J(\mathfrak{k}, \theta) \geq \mathfrak{C}$  для всіх  $(\mathfrak{k}, \theta) \in W_\xi(\Delta)$ . Тим самим обмеженість знизу функціоналу  $J$  на множині  $W_\xi(\Delta)$  доведена.

Нехай  $\{(u_n, \theta_n) \in W_\xi(\Delta)\}$  - мінімізуюча послідовність в задачі (16), тобто

$$\lim_{n \rightarrow \infty} J(u_n, \theta_n) = \inf_{(u, \theta) \in W_\xi(\Delta)} J(u, \theta).$$



Тоді числова послідовність  $|J(u_n, \theta_n)|$  є обмеженою. Отже, знайдеться константа  $C > 0$  така, що

$$\|\operatorname{div} \theta_n\|_{L^\infty(\Delta)} \leq \xi, \quad (\int_\Delta |Du_n| - \int_{\partial\Delta} g u_n d\mathcal{H}) \leq C,$$

$$\|\theta_n \cdot \nu^B - g_0\|_{L^\infty(\partial B_{\text{int}})} \leq C, \quad \|u_n - \tilde{I}^*\|_{L^2(B)}^2 \leq C.$$

Виходячи знову з нерівності (18) та обираючи параметр  $\delta > 0$  так, щоб  $S_\delta \subset B$ , маємо

$$\int_\Delta |Du_n| \leq C + \int_{\partial\Delta} g u_n d\mathcal{H} \leq C + (1 - \varepsilon_0) \int_{S_\delta} |Du_n| + c(\delta) \int_{S_\delta} |u_n| dx$$

для деяких  $\varepsilon_0 > 0$  та  $c(\delta) > 0$ . Оскільки  $S_\delta \subset B$ , то

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 \int_\Delta |Du_n| &\leq C + c(\delta) \int_B |u_n| dx \leq C + c(\delta) |B|^{1/2} \|u_n\|_{L^2(B)} \leq \\ &\leq C + c(\delta) |B|^{1/2} (C^{1/2} + \|\tilde{I}^*\|_{L^2(B)}) < C' < +\infty. \end{aligned}$$

Тим самим встановлено, що на послідовності  $\{(u_n, \theta_n) \in W_\xi(\Delta)\}$  функції  $u_n$  задовольняють умову:

$$u_n \in BV(\Delta) \quad \forall n \in N; \quad \limsup_n \|Du_n\|(\Delta) < C'; \quad \|u_n - \tilde{I}^*\|_{L^2(B)}^2 \leq C.$$

Отже, за теоремою про компактне вкладення  $BV(\Delta) \hookrightarrow L^r(\Delta)$  для всіх  $r \in [1; 2)$  це означає, що з послідовності  $\{u_n\}_{n \in N}$  можна вилучити підпослідовність (збережемо для неї попереднє позначення), для якої знайдеться елемент  $u^0 \in L^r(\Delta) \cap L^2(B)$  такий, що  $u_n \rightarrow u^0$  сильно в  $L^r(\Delta)$ ,  $u_n|_B \rightarrow u^0|_B$  в  $L^2(B)$ . Окрім цього зауважимо, що для будь-якої сильно збіжної в  $L^r(\Delta)$  послідовності  $\{u_n\}_{n \in N}$  маємо:

1. функції  $k * u_n$  неперервні в  $\tilde{\Omega}$  при кожному  $n \in N$ ;
2.  $k * u_n \rightarrow k * u^0$  в рівномірній топології простору  $C(\Delta)$ .

Дійсно,

$$\begin{aligned} \sup_{x \in \Delta} |k * (u_n - u^0)| &\leq \sup_{x \in \Delta} \left[ \left( \int_\Delta |k(x-y)|^{\frac{r}{r-1}} dy \right)^{\frac{r-1}{r}} \|u_n - u^0\|_{L^r(\Delta)} \right] \leq \\ &\leq C^* \|u_n - u^0\|_{L^r(\Delta)} \rightarrow 0 \quad \text{при } n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

Тепер проаналізуємо властивості послідовності  $\{\theta_n\}_{n \in N}$ . Оскільки  $(u_n, \theta_n) \in W_\xi(\Delta)$ , то за означенням простору  $W_\xi(\Delta)$  отримуємо:

$$|\theta_n| \leq 1 \quad \text{і при цьому} \quad \|\operatorname{div} \theta_n\|_{L^\infty(\Delta)} \leq \xi \quad \forall n \in N.$$

Отже, залучаючи теорему Банаха-Алаоглу та переходячи при необхідності до підпослідовності, маємо: знайдеться елемент  $\theta^0 \in L^\infty(\Delta, R^2)$  такий, що  $\theta_n \rightharpoonup^* \theta^0$  в  $L^\infty(\Delta, R^2)$ ;  $\operatorname{div} \theta_n \rightharpoonup^* \operatorname{div} \theta^0$  в  $L^\infty(\Delta)$ . Дійсно, останнє твердження є наслідком наступних перетворень

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\Delta} \operatorname{div} \theta_n \varphi dx = -\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\Delta} \theta_n \cdot \nabla \varphi dx = -\int_{\Delta} \theta^0 \cdot \nabla \varphi dx = \int_{\Delta} \operatorname{div} \theta^0 \varphi dx \quad \forall \varphi \in C_0^\infty(\Delta).$$

Таким чином, підсумовуючи отримані результати, приходимо до наступного висновку: з мінімізуючої послідовності  $\{(u_n, \theta_n) \in W_\xi(\Delta)\}$  можна вилучити підпослідовність (збережемо для неї вихідні позначення) таку, що

$$\theta_n \rightharpoonup^* \theta^0 \text{ в } L^\infty(\Delta, R^2); u_n \rightarrow u^0 \text{ в } L^r(\Delta), u_n|_B \rightharpoonup u^0|_B \text{ в } L^2(B),$$

і при цьому  $(u_n, -\operatorname{div} \theta_n) \in \mathcal{B}$  при всіх  $n \in N$ . Отже, в силу секвенційної замкненості оператора  $\mathcal{B}$  відносно наведених топологій, отримуємо

$$(u^0, -\operatorname{div} \theta^0) \in \mathcal{B} \Rightarrow (u^0, \theta^0) \in W_\xi(\Delta).$$

Тепер перейдемо до границі в  $J(u_n, \theta_n)$ , користуючись властивостями напівнеперервності знизу відповідних додатків та отриманими вище результатами. Знаходимо

$$\begin{aligned} & \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_{\Delta} |\operatorname{div} \theta_n| (\gamma + \beta |\nabla k * u_n|) dx = \\ & = \gamma \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_{\Delta} |\operatorname{div} \theta_n| dx + \beta \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_{\Delta} |\operatorname{div} \theta_n| |\nabla k * u_n| dx \geq \\ & \geq \gamma \int_{\Delta} |\operatorname{div} \theta^0| dx + \beta \int_{\Delta} |\operatorname{div} \theta^0| |\nabla k * u^0| dx \end{aligned}$$

(як границя від добутку сильно та слабо збіжних послідовностей);

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} \left\| \theta_n \cdot \nu^B - g_0 \right\|_{L^\infty(\partial B_{\text{int}})} \geq \left\| \theta^0 \cdot \nu^B - g_0 \right\|_{L^\infty(\partial B_{\text{int}})};$$

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} \int_B |u_n - \tilde{I}^*|^2 dx \geq \int_B |u^0 - \tilde{I}^*|^2 dx.$$

В результаті  $\inf_{(u, \theta) \in W_\xi(\Delta)} J(u, \theta) = \liminf_{n \rightarrow \infty} J(u_n, \theta_n) \geq J(u^0, \theta^0)$ . Отже, пара

$(u^0, \theta^0) \in W_\xi(\Delta)$  є розв'язком поставленої задачі, що і потрібно було довести.

### Висновки

Таким чином, для задачі реконструкції зображень за їх каркасною інтерполяцією запропонована варіаційна постановка.

Визначена структура цільового функціонала з урахуванням принципів, які мають бути дотриманими при відтворенні зображень. Доведено, що на класі функцій з обмеженою варіацією поставлена задача має розв’язок.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Ambrosio L., Fusco N., Pallara D. *Functions of Bounded Variation and Free Discontinuity Problems*, Oxford University Press, 2000.
2. Anzellotti G. *Pairing between measures and bounded functions and compensated compactness*, *Ann.di Mat. Pura ed Appl.*, 1993. Vol. 135., p. 293--318.
3. Giusti E. *Minimal Surfaces and Functions of Bounded Variation*, Birkhдuser, Boston, Basel, 1984.
4. Kanizsa G. *Gramбtica de la visiyn.*- Paris: Paodis, 1986.

Получено 23.05.2007 г.

## КРИТЕРИЙ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ С КОДИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

### Введение

Системы получения изображений в гамма-лучах при помощи кодированных апертур представляют собой мультиплексные системы измерений [1,2], предназначенные для пространственного кодирования положения источников гамма-излучения, регистрации кодированной информации и восстановления пространственных распределений источников. Обязательными составными частями такой системы являются кодирующая маска (одно- или двумерная) и позиционно-чувствительная детектирующая плоскость (позиционно-чувствительный детектор, ПЧД), размерность которой соответствует размерности маски, а также системы сбора и обработки спектрометрической информации.

Первоначально системы получения изображений в гамма-лучах с кодированными апертурами (системы с кодированными апертурами – СКА) были разработаны и изготовлены для целей гамма-астрономии и предназначались для получения изображений точечных и точечно-подобных источников гамма-излучения звездного неба. Таким образом, СКА астрономического назначения были оптимизированы для работы в параллельных лучах. Высокая чувствительность СКА, обеспечиваемая мультиплексностью измерений, предопределила необходимость разработки таких систем для получения гамма-изображений ядерно-технических объектов (заводов по переработке ядерных материалов, пунктов захоронения радиоактивных отходов и т.п.) и локализации радиационных аварий и инцидентов. В последние годы были созданы СКА для получения изображений протяженных и распределенных источников в ближнем поле, т.е. в расходящихся лучах, в условиях сложной радиационной обстановки [3,4].

В СКА для восстановления пространственных распределений источников гамма-излучения чаще всего используется метод корреляции или его модификации [5]. Преимущества этого метода восстановления перед другими (максимального правдоподобия,

минимума энтропии) заключаются в простоте математических действий и, как следствие, в высоком быстродействии, что особенно важно при получении многоэлементных изображений поля зрения.

### Основные исследования и публикации

#### Корреляционное изображение

Процесс получения изображения методом корреляции (корреляционное изображение) математически можно представить в виде формулы (для простоты записи мы используем одномерный случай, что не уменьшает общности рассуждений)

$$S_i^* = \sum_{k=0}^{N-1} P_k \cdot G_{i+k} \quad (1)$$

где  $S_i^*$  – элемент матрицы восстановленного пространственного распределения источников гамма-излучения,  $P_k$  – элемент матрицы счетов событий, зарегистрированных ПЧД,  $G_{i+k}$  – элемент матрицы обработки, вид которой однозначно связан с видом матрицы, описывающей расположение прозрачных и поглощающих элементов в кодирующей маске,  $N$  – количество элементов разрешения ПЧД, которое равно количеству элементов в базовом фрагменте кодирующей маски. Элемент  $G_i$  равен 1, если его положение соответствует положению открытого элемента маски, и  $-1$ , если его положение соответствует положению поглощающего элемента

Полагая, что статистика счетов событий регистрации гамма-квантов подчиняется распределению Пуассона, следуя [5], можно показать, что выборочная оценка дисперсии одного элемента изображения равна

$$\sigma_i^{*2} = \sigma^{*2} = \sum_{k=0}^{N-1} P_k \cdot G_{i+k}^2 = \sum_{k=0}^{N-1} P_k \quad (2)$$

где  $N$  – количество элементов ПЧД (количество элементов в базовом фрагменте маски).

Таким образом, выборочная оценка дисперсии элемента восстановленного изображения равна сумме всех счетов событий, зарегистрированных детектирующей плоскостью в течение цикла измерений.

В обычной практике получения изображений с помощью СКА оценка статистической значимости элемента изображения производится по соотношению

$$S_i^* / \sigma^* \geq k \quad (3)$$

где  $k$  – уровень статистической значимости элемента,  $S_i^*$  и  $\sigma^*$  определяются из (1) и (2), соответственно.

Обычно, принимают  $k = 3$  и в редких случаях повышают до 5. Считается, что при  $k \geq 3$  источник излучения обнаруживается с доверительной вероятностью не менее 0.999, т.е. при наблюдении фоновой сцены без источников излучения восстановленное распределение может содержать около (или меньше) 0.1 % элементов, превышающих порог принятия решения о наличии источника.

В практике проведения фоновых наблюдений СКА, разработанными и построенными в НИПКИ "Искра", было обнаружено, что элементы, превышающие "трехсигмовый" порог, встречаются в восстановленной фоновой сцене значительно чаще. Их количество достигает величины 5 – 10 %. Подобные результаты наблюдались на всех без исключения СКА, вне зависимости от типа применяемых кодирующих масок – одно- или двумерных, квадратично-вычетных или на основе кодов Хэмминга. По-видимому, столь значительная разница ожидаемых и наблюдаемых величин связана с особенностями восстановления пространственного распределения и требует применения иных критериев принятия решения.

### Постановка задачи

Статистика изображения фона

Предположим, что СКА наблюдает сцену однородного и стационарного фона при отсутствии источников гамма-излучения.

Предположим, что СКА наблюдает сцену однородного и стационарного фона при отсутствии источников гамма-излучения. Наблюдения производятся методом "маска-антимаска" [3] с длительностями полупериодов равными  $T$ . В результате в течение полупериода "маска" в  $i$ -м элементе (или детекторе) ПЧД будут зарегистрированы  $n_i^m$  счетов событий, в течение полупериода "антимаска" –  $n_i^a$  счетов. Известно, что распределение счетов подчиняется распределению Пуассона, причем в условиях однородного фона математические ожидания (соответственно, и

дисперсии) распределений для всех элементов ПЧД одинаковы. Обозначим  $\mu$  матожидание фонового счета в элементе ПЧД.

В практике применения СКА обычно количество счетов в элементе разрешения ПЧД значительно больше 30. Поэтому с большой точностью можно считать, что распределение счетов в элементе подчиняется нормальному закону распределения с матожиданием и дисперсией равными  $\mu$  (с.к.о.  $\sigma = \sqrt{\mu}$ ).

Элемент разностной матрицы счетов  $P$ , подвергаемой в дальнейшем обработке, вычисляется как разность соответствующих элементов матриц счета за цикл "маска" и цикл "антимаска".

$$P_i = n_i^m - n_i^a \quad (4)$$

В результате распределение счетов в каждом элементе матрицы  $P$  подчиняется нормальному распределению с матожиданием  $\mu_P = 0$  и дисперсией  $D_P = 2 \cdot \mu$ .

Как следует из (1), каждый элемент матрицы восстановленного распределения источников излучения есть алгебраическая сумма элементов матрицы счетов. Распределение вероятности значений такой суммы также подчиняется нормальному закону с матожиданием  $M_i = M = \sum_{k=0}^{N-1} \mu_p \cdot G_{i+k} = 0$  и дисперсией  $D_i = D = 2 \cdot N \cdot \mu$ .

Очевидно, что дисперсия равна математическому ожиданию суммы всех счетов событий за цикл измерений.

В физическом смысле элементы матрицы  $S^*$  восстановленного пространственного распределения представляют собой сумму счетов событий, зарегистрированных в результате взаимодействия с ПЧД гамма-квантов, пришедших из соответствующего элемента пространства за время наблюдения. Однако в результате вычисления по (1) элементы имеют как положительные, так и отрицательные значения. Физический смысл отрицательных элементов не определен, поэтому при оценке наличия источника излучения рассматриваются только положительные элементы матрицы  $S^*$ . Поэтому очевидно, что для оценки вероятности появления в изображении фона элементов, превышающих порог принятия решения возможно использование распределения экстремальных значений [6].

Статистика максимальных значений

Распределение экстремальных значений описывает предельное распределение для минимального или максимального элемента

выборки независимых наблюдений из распределений экспоненциального типа (нормального, гамма, экспоненциального и т.д.). Для случая выборки из нормальных распределений стандартизованных случайных величин ( $\mu = 0, \sigma = 1$ ) функция плотности вероятности максимальных значений имеет вид (Э.Гумбел)

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_m} \cdot \exp \left[ \frac{\mu_m - x}{\sigma_m} - \exp \left( \frac{\mu_m - x}{\sigma_m} \right) \right] \quad (5)$$

а функция распределения

$$F(x) = \exp \left[ - \exp \left( \frac{\mu_m - x}{\sigma_m} \right) \right] \quad (6)$$

где  $\mu_m = \mu_m(N) = \sqrt{2 \cdot \ln N}$  - мода распределения,  $\sigma_m = \mu_m^{-1}$  - параметр формы, N - объем выборки.

Для распределения (6) матожидание  $Mx = \mu_m + 0.5776 \cdot \sigma_m$ , а дисперсия  $Dx = 1.645 \cdot \sigma_m^2$ . Типичный вид зависимостей (5) и (6) показан на рисунке 1 для случая  $\mu_m = 20$ . Значения  $\sigma_m$  указаны у кривых.

После замены переменных на нестандартизованные в интересующем нас случае  $M = 0$  и  $D = 2 \cdot N \cdot \mu$  из (5) получим распределение плотности вероятности максимального значения в виде

$$f_m(x) = \frac{\mu_m}{\sigma} \cdot \exp \left[ \mu_m \cdot \left( \mu_m - \frac{x}{\sigma} \right) - \exp \left[ \mu_m \cdot \left( \mu_m - \frac{x}{\sigma} \right) \right] \right] \quad (7)$$

где  $\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{2 \cdot N \cdot \mu}$

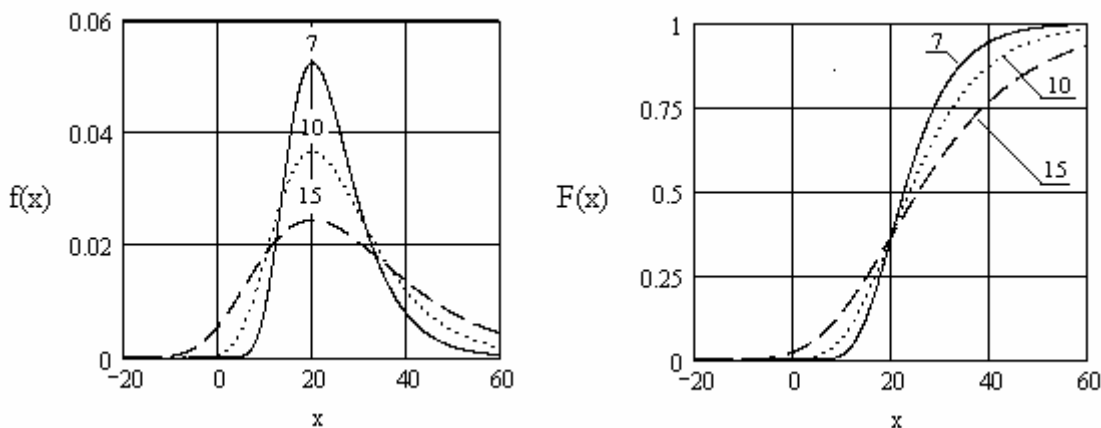


Рисунок 1 - Функции плотности вероятности (а) и функции распределения (б) максимальных значений для  $\mu_m = 20$  и различных значений  $\sigma_m$



Распределение (7) может быть использовано для оценки вероятности появления максимального значения определенной величины в корреляционном изображении, полученном с помощью кодированной апертуры. В качестве оценки дисперсии (и, соответственно, оценки с.к.о), очевидно, необходимо использовать сумму всех счетов событий за время измерений в соответствии с (2).

### Результаты численных оценок и их обсуждение

В современных СКА минимальное количество элементов в базовом фрагменте кодирующей маски составляет несколько десятков [3-5], а максимальное достигает нескольких сотен [8]. Поэтому для численных оценок были использованы значения  $N$  – объем выборки и количество элементов в базовом фрагменте кодирующей маски – в диапазоне от 50 до 300. На рисунке 2 показаны функции распределения, вычисленные при различных значениях параметров распределения в соответствии с

$$F_m(x, N, \sigma) = \int_{-\infty}^x \frac{\mu_m(N)}{\sigma} \cdot \exp\left[\mu_m(N) \cdot \left(\mu_m(N) - \frac{\xi}{\sigma}\right)\right] - \exp\left[\mu_m(N) \cdot \left(\mu_m(N) - \frac{\xi}{\sigma}\right)\right] d\xi \quad (8)$$

На рисунке 2 очевидно увеличение крутизны функции распределения с увеличением объема выборки и с уменьшением дисперсии (количества зарегистрированных событий). Увеличение крутизны означает уменьшение ширины распределения.

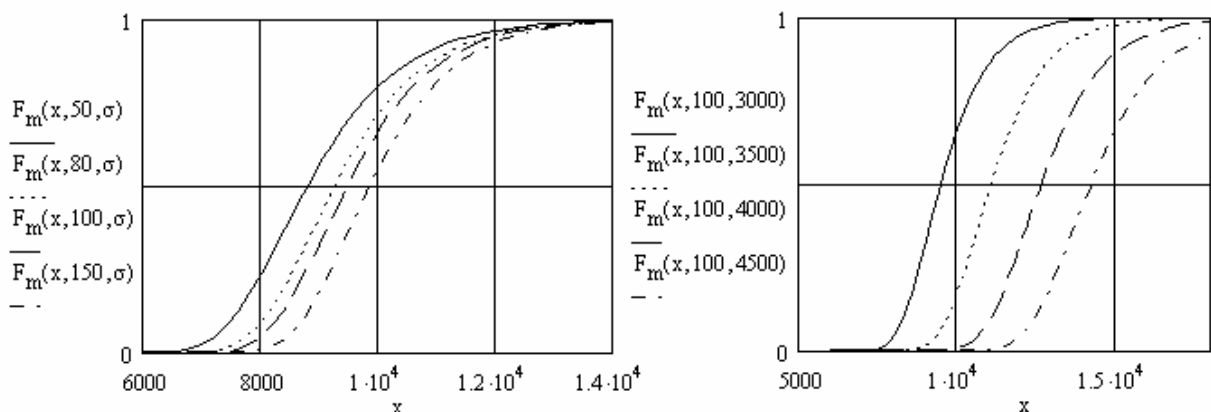


Рисунок 2 - Функция распределения максимальных значений выборки при различных значениях параметров распределения: а) при постоянном значении  $\sigma = 3000$ ; б) при постоянном значении объема выборки  $N = 100$

Уровень статистической значимости  $k$  в (2) определяет квантиль распределения  $x_p$  порядка  $P$  в количестве средних квадратических отклонений, где  $P$  – вероятность попадания случайной величины  $x$  в

интервал  $(-\infty, k \cdot \sigma)$ , т.е.  $-\infty < x \leq k \cdot \sigma = x_p$ . Квантиль порядка  $P$  для распределения максимальных значений находится из уравнения

$$F_m(x_p, N, \sigma) = P \quad (9)$$

Чтобы определить зависимость уровня статистической значимости элемента изображения от вероятности необходимо решить уравнение

$$\int_{-\infty}^{k \cdot \sigma \mu_m(N)} \frac{\mu_m(N)}{\sigma} \cdot \exp\left[\mu_m(N) \cdot \left(\mu_m(N) - \frac{\xi}{\sigma}\right) - \exp\left[\mu_m(N) \cdot \left(\mu_m(N) - \frac{\xi}{\sigma}\right)\right]\right] d\xi - P = 0 \quad (10)$$

относительно  $k$  для различных значений  $P$ .

Полученная в результате решения функция, как видно из (10), будет также зависеть от объема выборки  $N$ . На рисунке 3 показаны зависимости уровня статистической значимости от вероятности  $P$  появления максимального значения величиной  $S^* \leq k(P, N) \cdot \sigma$  при различных значениях объема выборки.

Из рисунка 3 очевидно, что даже при малых объемах выборки значение  $k = 3$  не может обеспечить уровень доверительной вероятности отсечки фона даже 0.95.

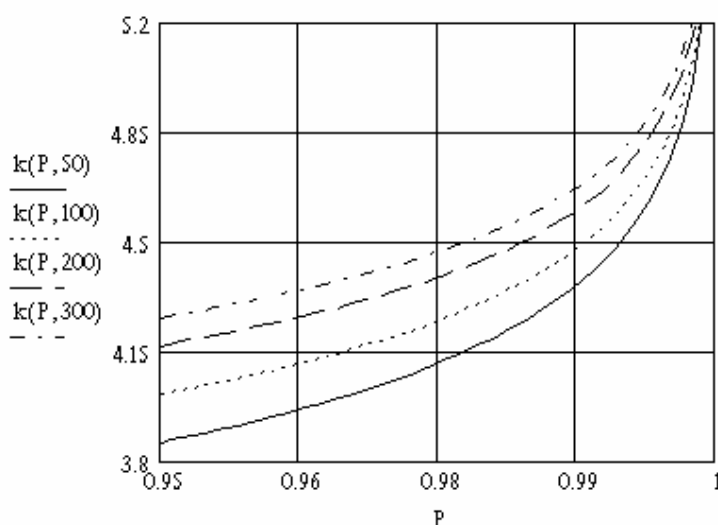


Рисунок 3 - Зависимость уровня статистической значимости от вероятности появления максимального значения при различных объемах выборки

Для случая кодирующей маски по основанию 19 (телескоп с кодированной апертурой) уровень  $3 \cdot \sigma$  обеспечивает доверительную вероятность только  $\approx 0.85$ , а в случае  $N = 59$  (томограф) – не более 0.7. Анализ зависимостей  $k(P, N)$  приводит к выводу, что для обеспечения доверительной вероятности отсечки фоновых выбросов

не менее 0.999 порог принятия решения о наличии источника излучения в поле зрения СКА должен составлять не менее  $5.4\sigma$ .

### Выводы

На основе анализа статистических характеристик изображений, получаемых СКА, однородного радиационного фона при отсутствии источников излучения и анализа статистики экстремальных (максимальных) значений показано, что общепринятый “трехсигмовый” критерий не обеспечивает ожидаемого уровня доверительной вероятности отсечки фоновых выбросов. Для обеспечения надежности принятия решения о наличии источника излучения в поле зрения могут быть применены статистические методы проверки гипотез и критерии согласия, однако теория экстремальных значений дает возможность использовать более простой метод. Анализ статистики максимальных значений позволяет установить более высокие пороги принятия решений и оценить доверительную вероятность отсечки фона.

Расчитанные на основе распределения экстремальных значений зависимости уровня статистической значимости позволяют выбрать необходимый порог принятия решения, обеспечивающий желаемый уровень доверительной вероятности. Так, например, уровень 0.999 достигается при  $k \approx 5.4$  для СКА с кодирующими масками размерностью в несколько сотен элементов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сороко Л.М. Мультиплексные системы измерений в физике. М.: Атомиздат, 1980.–120 с.
2. Федоров Г.А. Радиационная интроскопия: Кодирование информации и оптимизация эксперимента. М.: Энергоатомиздат, 1982. - 112 с.
3. P.T. Durrant, M. Dallimore, I.D. Jupp, D. Ramsden. The application of pinhole and coded aperture imaging in the nuclear environment. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1999, A 422, pp. 667-671
4. О.П. Иванов, В.Е. Степанов, А.Н. Сударкин, Л.И. Уруцкоев. Портативный прибор для получения изображений источников гамма-излучения с апертурой на основе кодирующих масок. Приборы и техника эксперимента, 1998, № 4, с. 127-133.
5. Dunphy P.P., McConnell M.L., Owens A., Chupp E.L., Forrest D.J., Googins J. A Balloon-Borne Coded Aperture Telescope for Low-Energy Gamma Ray Astronomy. Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, 1989, A 274, pp. 362 – 379.

6. Статистические методы в экспериментальной ядерной физике. З.Идье, Д.Драйард, Ф.Джеймс, М.Рус, Б.Садуле.: Атомиздат, 1976. – 335 с.
7. Кендалл М., Стьюарт А. Теория распределений. М.: Наука, 1966. – 587 с.
8. J. Evans, I.D .Jupp, T. Carter, D. Ramsden. Development of Large Area CsI(Tl)-photodiode Array for Explosives Detection by Neutron-activation Gamma-ray Spectroscopy. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1999, A 422, pp. 900 – 905.

Получено 12.06.2007 г.

УДК 528.235:681.3:628.1

В.Е. Бахрушин, Д.А. Миросенко

## **ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ КОНСТРУКТОРСКОГО РАСЧЕТА ГОРОДСКОЙ СЕТИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

### **Введение**

Целью конструкторского расчета водопроводной сети являются, согласно [1-3], экономические расчеты диаметров трубопроводов, обеспечивающих пропуск расчетных расходов воды с заданным напором. Под расчетным режимом работы сети понимают такие возможные сочетания отбора воды и ее подачи насосными станциями, при которых имеют место наибольшие нагрузки для отдельных сооружений системы, в том числе водопроводной сети. К нагрузкам относят расходы воды и напоры. Водопроводную сеть необходимо рассчитывать в комплексе гидравлически взаимосвязанных сооружений системы подачи и распределения воды. Для выполнения конструкторского расчета необходимо иметь следующие данные: конфигурацию сети, длины участков, коэффициенты шероховатости трубопроводов, сумму коэффициентов местных сопротивлений, геодезические отметки узлов сети, значения отборов воды в узлах (потребители, пожарные гидранты и т.д.).

По мнению авторов, классическая постановка задачи конструкторского расчета пригодна для проектируемой к прокладке сети водоснабжения и не соответствует задачам управления уже существующими, проложенными сетями, которые составляют более 95% от всей городской сети водоснабжения. Существующие сети фактически управляются задвижками колодцев - узлов переключений. Управление задвижкой производится изменением площади поперечного сечения пропорционально степени ее открытия/закрытия на заданное число оборотов. Конструкторский расчет существующих сетей заключается в вычислении площадей поперечного сечения задвижек узлов переключений, обеспечивающих пропуск как расчетных, так и фактических расходов воды с заданным напором. Определение расчетных режимов работы существующей сети является задачей оптимизации ее структуры.

Оптимизация структуры сети заключается в вычислении площадей поперечных сечений задвижек узлов переключений по критерию минимума избыточно подаваемой по сети воды насосными станциями при заданных графиках отбора воды потребителями. Формирование оптимальной структуры является решением задачи энергосберегающего управления городской сетью водоснабжения.

Особенностью решения этой задачи для крупных городов является большой объем информации об объектах сети водоснабжения, расположенных как на топографических картах местности, так и в библиотеках детализированных схем, атрибутивных базах данных объектов сети. Используемые в настоящее время компьютерные программы гидравлического моделирования не имеют возможности ввода и использования для расчетов такого большого объема информации различной структуры.

Задача может быть решена объединением методов геоинформационного и гидравлического моделирования с последующей разработкой компьютерных программ и электронных баз данных специализированной геоинформационной подсистемы конструкторского расчета.

Основаниями для разработки геоинформационной подсистемы являются:

- классическая постановка задачи конструкторского расчета [1];
- местонахождение, диаметр, рабочее давление, количество витков общее и витков открытия задвижек колодцев - узлов переключений;
- повременные графики отбора воды абонентами, учитывающие неравномерность потребления воды в течение суток;
- гидродинамическая связь расчетных значений напора и расхода с их фактическими значениями в контрольных точках сети, определяемая ее топологической структурой.

Целью исследования является разработка одной из основных частей геоинформационной системы энергосберегающего управления городской сетью водоснабжения - конструкторского расчета. Материалы настоящей публикации являются продолжением работ авторов [4-6].

## 1. Методика исследования

Исследование и разработку геоинформационной подсистемы конструкторского расчета проводили по следующей методике.

1. Определены основные носители информации о городских сетях водоснабжения и канализации – топографические карты М1:2000, содержащие городскую застройку совместно с сетями водоснабжения и канализации, и детализированные планы колодцев и насосных станций в системе условных знаков ГОСТ «Умовні знаки для топографічних планів масштабів 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500» [7]. Городская сеть водоснабжения представлена на этих планах условными знаками следующих объектов сети – колодцы, участки водоводов, абоненты, задвижки, датчики автоматического контроля напора и расхода воды, насосные станции. Определен необходимый и достаточный состав атрибутов этих объектов, приведенный в работах [5, 6].

Решение о проведении электронного картографирования и разработке электронной базы детализированных планов позволило реализовать оперативное внесение изменений в структуру сетей и детализировок, ведение базы данных атрибутов объектов сети, оперативное определение наличия в колодцах/камерах задвижек и гидрантов, просмотр и изменение значений параметров задвижек (диаметр, число витков общее и витков открытия). Электронная карта имеет оверлейную структуру в составе: растровой подложки – плана местности без инженерных коммуникаций; условных знаков объектов сетей водоснабжения и канализации – участков водоводов и коллекторов, колодцев, насосных станций, задвижек, обратных клапанов и абонентов.

2. Определен способ управления сетью водоснабжения - оценка состояния сети путем гидравлического моделирования [1] в составе поверочного и конструкторского расчетов; анализа состояния сети при пожаротушении, аварийных ситуациях; контроля и управления качеством питьевой воды. Гидравлические расчеты базируются на математической модели – топологическом графе сети водоснабжения. Анализ структуры топологического графа определил структуру его цифровой модели.

3. На основании методики гидравлического моделирования [1] определен алгоритм автоматизированного конструкторского расчета,

использующего как характеристики объектов сети – координаты и значения атрибутов, так и взаимосвязи между объектами, заданные в цифровой модели топологического графа.

## 2. Алгоритм автоматизированного конструкторского расчета

Конструкторский расчет производится на математической модели - топологическом графе, являющемся связным ориентированным планарным графом с помеченными ребрами и вершинами, адекватно представляющем на плоскости пространственную структуру городской сети водоснабжения. Отображение топологического графа сети водоснабжения на цифровой модели карты описано в [5, 6].

Для проведения конструкторского расчета на топологическом графе, отражающем текущее состояние сети водоснабжения, формируется матрица инциденций вершин и контуров следующей структуры:

$$\begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1l} & 0 \\ t_{21} & t_{22} & \dots & t_{2l} & v_{2\ l+1} \\ t_{31} & t_{32} & \dots & t_{3l} & v_{3\ l+1} \\ & & \dots & & \\ t_{k+1\ 1} & t_{k+1\ 2} & \dots & t_{k+1\ l} & t_{k+1\ l+1} \end{pmatrix}$$

где  $k$  - число вершин,  $l$  - число участков сети,  $u_{1,j}$  ( $j = 1, \dots, l$ ) - номера участков,  $v_{i,l+1}$  ( $i = 2, \dots, k + 1$ ) - номера вершин,  $t_{i,j} = 1$ , если участок  $u_{1,j}$  соединен с вершиной  $v_{i,l+1}$  и соединение нерегулируемое;  $t_{i,j} = 2$ , если участок  $u_{1,j}$  соединен с вершиной  $v_{i,l+1}$  и регулируется задвижкой;  $t_{i,j} = 3$ , если соединения нет (соединение нерегулируемое и неисправное);  $t_{i,j} = \pm 4$ , если участок  $u_{1,j}$  соединен с вершиной  $v_{i,l+1}$  и регулируется обратным клапаном. При направлении потока воды по участку к вершине клапан открыт ( $t_{i,j} = +4$ ), при обратном направлении потока клапан закрывается ( $t_{i,j} = -4$ ).

В матрице инциденций устанавливается связь между участками и узлами сети с учетом состояния запорной арматуры, определяется ориентация топологического графа – направление потоков воды от выходов точки питания (насосной станции) к вершинам, непосредственно связанным с точкой питания ребрами. Направление потока указывается стрелкой над участком водовода от узла-истока (колодца) до узла-стока (колодца либо абонента).

Алгоритм конструкторского расчета является следующим.



1. Формируются матрицы инцидентий вершин и контуров; выделяются кольцевые подграфы топологического графа и распределенные подграфы, исходящие от кольцевых.

2. Определяются оперативные показания датчиков напора  $H$  и расхода  $Q$  выходов насосной станции.

3. Устанавливается ориентация топологического графа.

4. Определяется расположение абонентов, подключенных к распределенным подграфам.

5. Вычисляется текущий (на заданное время суток) объем отбора  $Q$  куб.м/с каждого  $n$ -го абонента  $Q_n$  по формулам:

– для абонента жилого фонда  $Q_n = \frac{Q_{n,мес}}{3600ДН}$ , где  $Q_{n,мес}$  – месячный

отбор абонента;  $Д$  – число дней в месяце;  $Н$  – коэффициент суточной почасовой неравномерности, определяющий долю потребления воды за час в указанное время суток по отношению к суточному объему потребления. Указанные коэффициенты определяются эмпирически в привязке к особенностям потребления воды в городском районе, задаются в табличной форме с дискретностью в один час;

– для абонента жилого фонда  $Q_n = \frac{Q_{n,мес}}{3600Д(V_{кон} - V_{нач})}$ , де  $V_{кон}$  –

время окончания рабочего дня;  $V_{нач}$  – время начала рабочего дня;

Сумма отборов всех абонентов, расположенных на распределенном подграфе вплоть до места подключения к кольцевому, составляет узловой отбор.

6. По выходным значениям напора  $H$  и расхода  $Q$  насосной станции производится поверочный расчет сети, при котором для распределения потока воды в кольцевых подграфах в точках ветвления из пришедшего расхода  $Q_n$  входящего участка водовода кольца вычитается сумма узловых отборов  $Q_y$  исходящих разветвленных подграфов. Оставшийся расход  $Q_o = Q_n - Q_y$  распределяется по исходящим из точки ветвления участкам водоводов колец пропорционально площадям поперечных сечений задвижек узлов переключений, а при их отсутствии - водоводов.

7. При отрицательном остатке расхода  $Q_o < 0$  производится локальная оптимизация баланса водоснабжения кольца. Условием достижения баланса является такая пропускная способность всех задвижек положительной либо отрицательной частей колец, при

которой для каждой части кольца  $Q_o \geq 0$  в месте соединения этих частей. Для восстановления баланса при  $Q_o < 0$  в направлении противотока от группы абонентов, расположенных на распределенном подграфе, производится поиск задвижки, регулирующей подачу воды этой группе абонентов. Вычисляется число витков открытия/закрытия этой задвижки таким образом, чтобы площадь ее поперечного сечения  $S(d, v, z)$  обеспечивала пропускную способность, равную сумме объемов отбора группы абонентов, где  $d$  – диаметр задвижки,  $v$  – число витков,  $z$  – число витков открытия.

Поперечное сечение задвижки:

$$S_{\text{завд}} = \frac{\pi D^2}{4} \left( 1 - \arccos \left( \frac{M-N}{90M} + 2 \frac{M-N}{\pi M^2} \sqrt{2MN - N^2} \right) \right),$$

где  $M$  – общее число витков задвижки,  $N$  – число витков, на которое задвижка закрыта.

8. Оставшийся по завершении расчета всей сети избыточный расход вычитается из выходного расхода  $Q$  насосной станции, отрицательный остаток расхода добавляется. На этом цикл оптимизации завершается.

Фактическое состояние городских сетей водоснабжения является разбалансированным, а задвижки избыточно открыты, так как точный расчет баланса сетей большой размерности возможен только компьютерной программой. Экономический эффект от восстановления баланса состоит в уменьшении потребления электроэнергии насосными станциями на 5 – 10% при сохранении достаточного для удовлетворения потребностей потребителей напора подаваемой воды.

Автоматизированное выполнение конструкторского расчета пользователем выполняется в следующем порядке:

- по координатно-адресной привязке производится поиск плана местности с необходимым фрагментом сети;

- запускается компьютерная программа конструкторского расчета, которая:

- а) опрашивает показания напора  $H$  и расхода  $Q$  датчиков выходов насосной станции;

- б) формирует топологический граф сети водоснабжения с учетом фактической площади поперечного сечения задвижек;

- в) определяет фактические и узловые отборы абонентов на текущее время суток;

г) производит конструкторский расчет, отображая результаты расчета в цифровой модели карты на экране дисплея и на печати.

#### Выводы

В результате выполненных исследований разработан компьютерный программный комплекс геоинформационной подсистемы конструкторского расчета городской сети водоснабжения.

Решение проблемы оперативного конструкторского расчета городской сети водоснабжения методами геоинформационного моделирования позволяет осуществить комплексный подход при оценке состояния и работоспособности сети водоснабжения, определения ее оптимальной энергосберегающей структуры, обеспечить экономию электроэнергии, потребляемой насосными станциями, при обеспечении необходимого и достаточного (неизбыточного) водоснабжения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет водопроводных сетей. Учебное пособие для вузов / Н.Н. Абрамов, М.М. Поспелова, М.А. Сомов и др. – М.: Стройиздат, 1983. – 278 с.
2. Крицкий Г.Г., Аширов А.А. Эффективные решения для систем водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. – Вып.12. – Москва, 2002. – С. 17 – 24.
3. Махнев П.П., Юдин М.Ю., Пиленкова Е.Е. Модель системы подачи воды Санкт Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. – Вып.8, ч.2. – Москва, 2004. – С. 28 – 29.
4. Бахрушин В.Е., Миросенко Д.А., Савин В.В. Разработка и исследование геоинформационной системы обработки аварийных ситуаций городской сети водоснабжения // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Вып. 1 (24). – Днепропетровск, 2003. – С. 62 – 68.
5. Бахрушин В.Е., Миросенко Д.А. Исследование и разработка геоинформационной подсистемы поверочного расчета городской сети водоснабжения // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Вып. 5 (46). – Днепропетровск, 2006. - С. 73 – 81.
6. Миросенко Д.А., Бахрушин В.Е., Горбань А.Н. Геоинформационная подсистема поверочного расчета городской сети водоснабжения // Складні системи і процеси. – 2006. – № 2. – С. 102 – 109.
7. Умовні знаки для топографічних планів масштабів 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. – К.: Міністерство екології та природних ресурсів України, 2001. – 268 с.

Получено 16.03.2007 г.

УДК 004.414.041:658.51.012

Т.В. Климова, Е.С. Яшина

**ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ  
ПЛАНИРОВАНИИ ПРОЕКТА СОЗДАНИЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ С  
ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ АВТОМАТОВ**

**Введение.** Одной из наиболее важных задач управления проектами является планирование проекта. Календарный план проекта является основой для принятия ряда важных управленческих решений, касающихся планирования операционной деятельности предприятия, распределения ресурсов, выдачи заданий исполнителям, а также планирования других проектов.

Обычно для построения календарного плана проекта используется математический аппарат сетевого планирования [1]. Сетевые модели, реализованные во многих современных пакетах программ для управления проектами, весьма популярны у широкого круга пользователей и специалистов, благодаря своей наглядности. Однако они обладают целым рядом ограничений, затрудняющих решение многих задач. Так, в классической сетевой модели сложно отразить итеративный характер разработки, риски, многие аспекты управления ресурсами. Для преодоления недостатков, присущих классическим сетевым моделям, разными авторами предложен ряд модификаций моделей [2–4]. Вероятностные, альтернативные, ресурсные и другие разновидности моделей существенно расширяют возможности сетевого планирования, однако их применение затруднено тем, что они требуют разработки специального программного обеспечения. Кроме того, каждая из указанных разновидностей моделей предназначена для анализа отдельного аспекта проекта и совместное применение нескольких разновидностей моделей во многих случаях затруднительно.

Для того, чтобы иметь возможность анализировать различные аспекты проекта в одной модели, следует построить модель, используя универсальный математический аппарат. В этом случае для анализа моделей можно будет использовать стандартные математические модели.

В работе [5] обосновано применение моделей, построенных в аппарате теории автоматов, для описания, анализа и моделирования процессов выполнения проекта. Рассмотрим применение этого аппарата для построения модели.

Наиболее известными и распространёнными моделями данного класса являются модели конечных автоматов. Изначально этот математический аппарат был разработан для описания функционирования вычислительных систем, систем автоматического управления, робототехнических комплексов и других процессов и явлений, носящих дискретный характер. Применение такого аппарата для моделирования сложных организационных процессов затруднительно, так как некоторые из этих процессов происходят непрерывно и не могут быть описаны в форме скачкообразной последовательности переходов из одного состояния в другое. Однако и описание организационных процессов исключительно с помощью моделей классической математики также невозможно. Таким образом, математический аппарат, применяемый для построения модели, должен обладать возможностью отображать как непрерывные, так и дискретные процессы.

В последнее время в разных разделах математики большое внимание уделяется интеграции дискретного и непрерывного подходов. Примером могут служить гибридные сети Петри [6], применяющиеся для математического моделирования сложных технологических процессов.

Наиболее широкими возможностями для описания функционирования систем различной природы обладают модели гибридных автоматов [8]. Отличительной особенностью гибридных автоматов является их способность описывать как дискретные, скачкообразные (смена состояний), так и непрерывные процессы. С этой целью отдельным или всем состояниям придаётся некоторое поведение, которое реализует автомат, находясь в данном состоянии. Модели данного класса широко применяются для моделирования не только вычислительных, но и технологических, производственных, организационных процессов. Рассмотрим применение моделей гибридных автоматов для решения задач планирования проектов.

**Построение модели плана проекта.** Напомним, что автомат или машина состояний представляет собой совокупность состояний

системы, переходов между ними и событий или сигналов, инициирующих переходы [7].

Формально автомат определяется в виде кортежа:

$$A = \langle Q, R, E \rangle \quad (1)$$

где  $Q$  – множество состояний системы, среди которых выделяется начальное  $q_0$ ;  $R$  – множество переходов;  $E$  – множество событий.

Переходы часто понимают как функцию изменения состояний

$$R: Q \times E \rightarrow Q.$$

Тогда состояние  $q_s$  является результатом перехода из состояния  $q_{s-1}$  по событию  $e_j$

$$r(q_{s-1}, e_j) = q_s, \text{ для } q_s, q_{s-1} \in Q, r \in R, e_j \in E. \quad (2)$$

Функция переходов задаётся таблично или графически.

В качестве события могут выступать внешние сигналы или логические условия, значения которых определяются в ходе моделирования.

Состояние проекта в момент времени  $t$  определяется тем, какие работы выполняются в данный момент. Поэтому выполнение проекта можно представить как процесс перехода между состояниями, соответствующими отдельным работам.

Работа может начинаться при выполнении следующих условий: имеются необходимые промежуточные результаты, полученные при выполнении других работ и имеются в необходимом количестве свободные (т.е. не занятые в других работах ресурсы). Последовательность получения промежуточных результатов учитывается при построении функции переходов (так же, как и в классических сетевых моделях).

Для учёта наличия ресурсов будем использовать аппарат профилей загрузки ресурсов, широко применяющийся в планировании [1]. Профиль загрузки ресурса  $Res_i(t)$  показывает наличие свободных ресурсов вида  $i$  в произвольный момент времени  $t$ . Его значение равно разности между максимальным количеством единиц ресурса данного вида и количеством единиц ресурса, занятых в различных работах, а также находящихся в ремонте в данный момент времени. Работа  $w$  может начинаться при условии

$$\begin{aligned} & (Res_i(t_w^{нач}) \geq r_{iw}) \wedge (Res_{i+1}(t_w^{нач}) \geq r_{i+1.w}) \wedge \\ & \dots \wedge (Res_N(t_w^{нач}) \geq r_{Nw}) \end{aligned} \quad (3)$$

где  $r_{iw}$  – количество ресурсов вида  $i$ , необходимых для выполнения работы  $w$ ;  $t_w^{нач}$  – время начала работы  $w$ .

Выполнению работы  $w$  должна предшествовать проверка условия (3).

Рассмотрим модель выполнения отдельной работы, представленную в виде диаграммы состояний автомата. Модель представлена на рис. 1

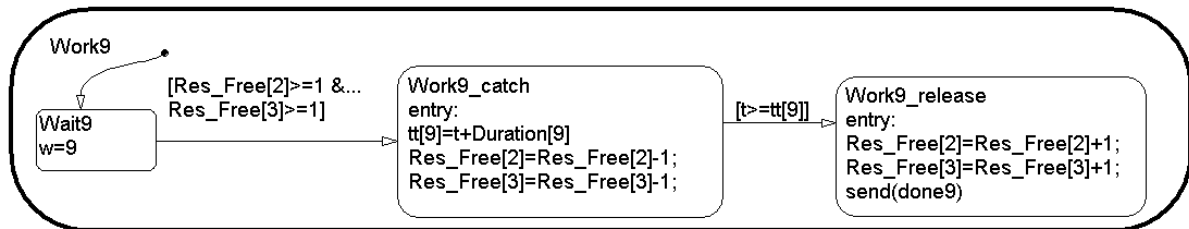


Рисунок 1 - Модель отдельной работы

В начале активным становится состояние *Wait*, в котором система находится, ожидая освобождения нужных ресурсов. После того, как будут выполнены условия, заданные выражением (3), осуществляется, активизируется состояние *Work\_catch*, что означает начало выполнения работы. При входе это в состояние выполняется захват ресурсов. Значение профиля свободных ресурсов уменьшается на величину ресурсов, необходимых для данной работы. Одновременно вычисляется момент окончания работы (продолжительность работы, заданная параметром *Duration*, прибавляется к текущему значению времени). Система ожидает наступления момента окончания работы, после чего переходит к состоянию *Work\_release*. При входе в это состояние выполняется освобождение захваченных ресурсов (восстанавливаются значения профилей свободных ресурсов) и генерируется событие завершения работы *done*, необходимое для синхронизации с другими работами.

Современные модели теории автоматов допускают использование сложных состояний. Фактически сложное состояние представляет собой модель процесса, описанного вложенной диаграммой. Использование сложных состояний позволяет строить модели процессов, имеющих иерархическую структуру, путём декомпозиции их на подпроцессы и построения моделей этих подпроцессов.

Модель, представленная на рис. 1, представляет собой сложное состояние, которое может быть элементом какой-либо сложной модели, описывающей этап проекта или проект в целом.

Теперь рассмотрим моделирование комплекса работ.

Моделирование последовательных процессов не вызывает особых трудностей. Однако для моделирования параллельных процессов возможностей классических детерминированных конечных автоматов недостаточно. Для этого необходимо использовать недетерминированные автоматы, которые допускают наличие одновременно нескольких активных состояний. Результатом функции переходов для недетерминированного автомата является не отдельное состояние, как в формуле (2), а множество состояний

$$r(\{q_{s-n}, \dots, q_{s-1}\}, e_j) = \{q_s, \dots, q_{s+m}\}, \text{ для } \{q_{s-n}, \dots, q_{s+m}\} \in Q, r \in R, e_j \in E. \quad (4)$$

В случае использования недетерминированных автоматов могут возникнуть сложности с корректной обработкой перехода к работам, следующим вслед за параллельным процессом. С этой целью следует использовать события, которые генерируются по окончании каждой из работ. Следующая работа должна начинаться только после получения всех необходимых для синхронизации событий.

На рис. 2 представлена модель проекта создания приборостроительного изделия, представленная в виде недетерминированного гибридного автомата.

Проект включает 12 этапов: 1) технико-экономическое обоснование; 2) разработка и согласование ТЗ; 3) патентные исследования; 4) определение состава комплекса технических средств; 5) разработка схем электрических принципиальных и чертежей; 6) формирование заказов на покупные комплектующие изделия; 7 – 9) монтаж отдельных блоков и изделия в целом; 10) испытания; 11) разработка эксплуатационной документации; 12) приёмо-сдаточные испытания. Проект рассчитан на 15 недель.



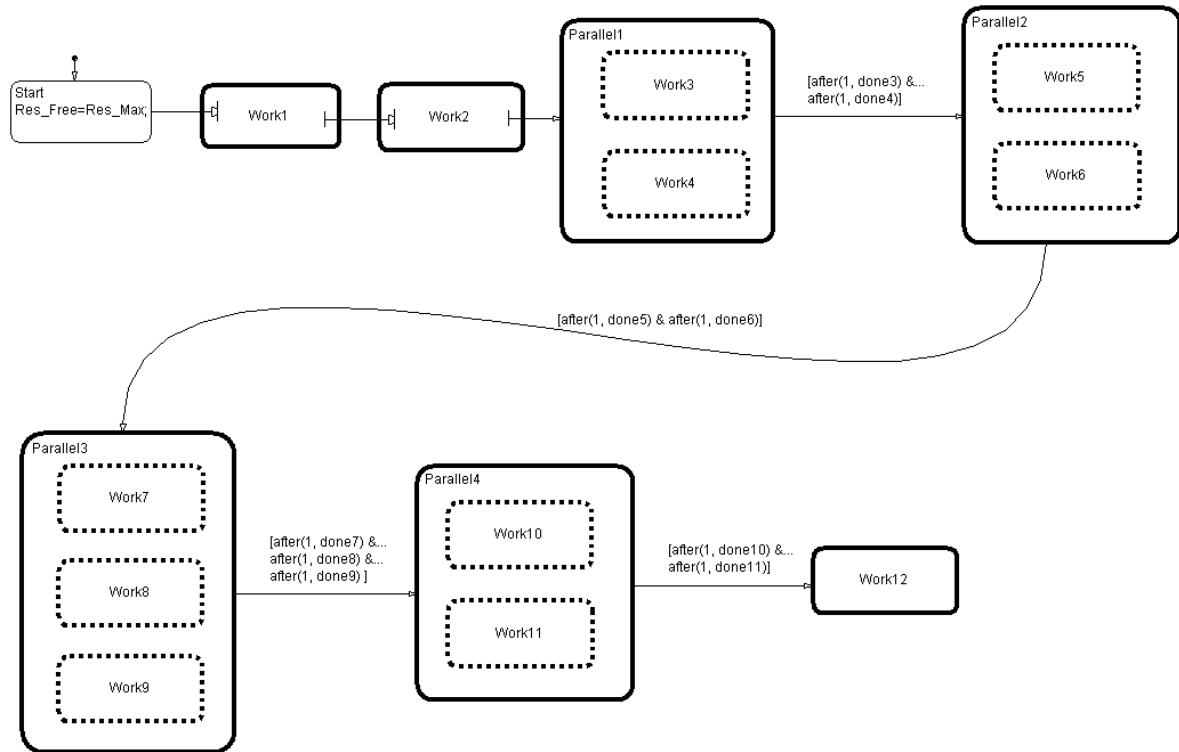


Рисунок 2 - Модель проекта создания приборостроительного изделия

При выполнении проекта используется 4 вида оборудования: компьютеры, осциллографы; монтажные столы; испытательный стенд.

Каждый из этапов представлен вложенной моделью, аналогичной той, что представлена на рис. 1. Данные этапы являются довольно крупными. При необходимости дальнейшей детализации моделей можно использовать более сложные модели с несколькими уровнями декомпозиции дерева работ.

Ряд этапов может выполняться параллельно. Всего имеется 4 параллельных процесса.

Для синхронизации параллельных процессов используются события *done3*, ..., *done11*, которые генерируются по окончании каждой из работ. Переход к следующей работе осуществляется после получения событий завершения каждой из предшествующих параллельных работ.

После выполнения имитационного моделирования мы можем получить сроки начала и окончания каждой из работ и проекта в целом, а также профили загрузки ресурсов. Профили загрузки для всех четырёх видов оборудования показаны на рис. 3.

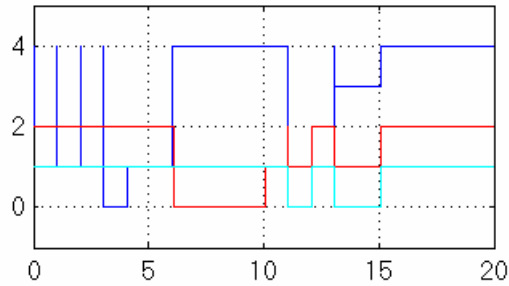


Рисунок 3 - Профили загрузки ресурсов проекта

Отметим, что полученная модель внешне похожа на обычные сетевые модели с работами в узлах. Применение графической нотации для описания состояния проекта позволяет сохранить наглядность, свойственную сетевым моделям, а также упрощает процесс построения и проверки модели.

**Моделирование отказов ресурсов.** Представленные выше результаты, полученные при моделировании выполнения проекта, могли быть получены и традиционными методами, основанными на сетевом планировании. Ценность моделей теории автоматов состоит в том, что мы можем вводить в модель действия и события, не связанные непосредственно с данным проектом, но влияющие на его выполнение. Можно построить модели, описывающие одновременное выполнение нескольких проектов, а также процессы приобретения, продажи или утилизации ресурсов, процессы поломки ресурсов и т.д. Эти модели, функционируя параллельно с основной, позволят более точно описать условия выполнения проекта и повысить адекватность модели и достоверность получаемых результатов.

В качестве примера рассмотрим модель отказов оборудования, задействованного в проекте. Она представлена диаграммой состояний, представленной на рис. 4.

Модель включает два параллельных сложных состояния *Break1* и *Repair1*, осуществляющих моделирование процесса отказов и процесса ремонта. Отказ приводит к временному уменьшению количества свободных ресурсов определённого вида. В случае отказа должно приостанавливаться выполнение уже начатых работ. Однако это существенно усложняет модель. Поэтому примем предположение, если отказ привёл к тому, что в наличие нет свободных ресурсов, начатые работы завершаются, а новые не начинаются до тех пор, пока отказ не будет ликвидирован. При относительно небольшой продолжительности работ сделанное предположение не существенно

снижает точность результатов и не приводит к потере актуальности модели. Если же даже после отказа свободные ресурсы остаются в достаточном количестве, выполнение работ продолжается. При моделировании используются генераторы случайных чисел, задающие случайные промежутки времени между отказами оборудования (переменная  $tx1$ ) и продолжительность ремонта (переменная  $tq1$ ). Значения указанных переменных в ходе моделирования изменяются случайным образом.

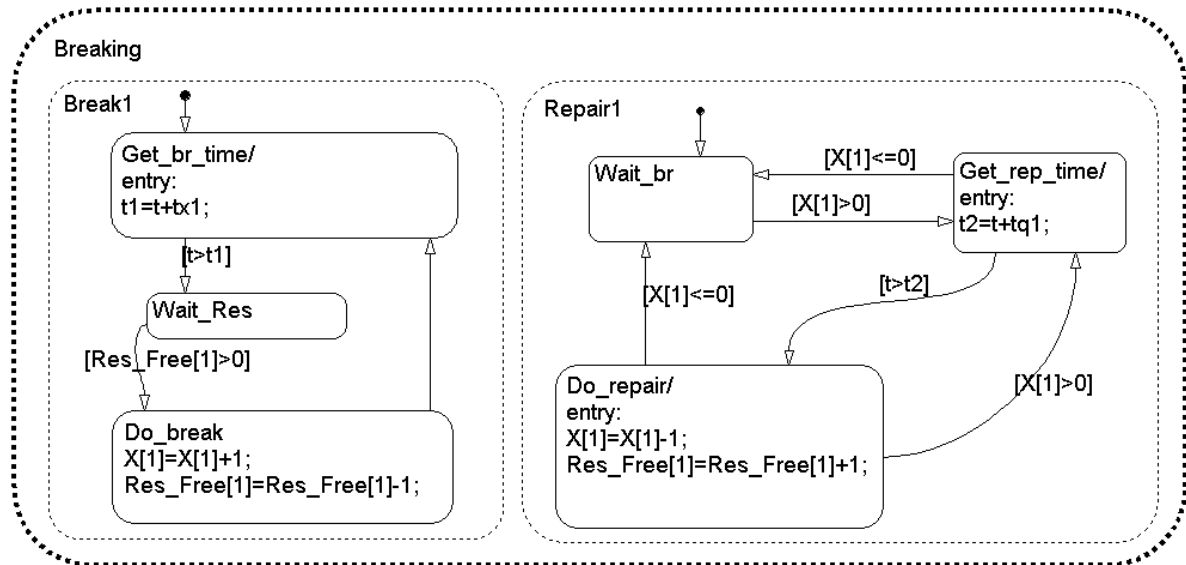


Рисунок 4 - Модель процесса отказов оборудования

Диаграмма *Break1* описывает процесс отказов. При активизации состояния *Get\_br\_time* вычисляется момент наступления следующего отказа. По достижении этого момента активным становится состояние *Wait\_Res*. Выполняется проверка наличия свободных ресурсов (это позволяет избежать необходимости моделирования перерывов в выполнении уже начавшихся работ). Как только свободный ресурс появляется, активизируется состояние *Do\_break* и наступает отказ: увеличивается значение переменной  $X$ , показывающей количество неисправного оборудования, и уменьшается значение профиля свободных ресурсов  $Res\_Free$ . После чего вновь активизируется состояние *Get\_br\_time* и процесс повторяется.

Диаграмма *Repair1* описывает процесс ремонта. Состояние *Wait\_br* остаётся активным до тех пор, пока в системе нет отказавшего оборудования. Когда появляется отказ, активизируется состояние *Get\_rep\_time*, при входе в которое вычисляется момент

окончания ремонта. По достижении этого момента активным становится состояние *Do\_repair*, в котором осуществляется моделирование ремонта: уменьшается количество неисправного оборудования и увеличивается значение профиля свободных ресурсов: отремонтированное оборудование вновь может использоваться при выполнении проекта. Если ещё есть неисправное оборудование, вновь активизируется состояние *Get\_rep\_time* и вычисляется момент окончания следующего ремонта. Если неисправного оборудования нет, система возвращается в состояние *Wait\_br*, в котором находится до наступления следующего отказа.

Модели, показанные на рис. 2 и 4 функционируют параллельно. Таким образом удаётся осуществить моделирование процесса выполнения проекта с учётом риска отказов оборудования.

На рис. 5 показаны профили загрузки ресурсов проекта с учётом отказов оборудования, полученные путём совместного имитационного моделирования моделей выполнения проекта и отказа оборудования. Очевидно, что они существенно отличаются от профилей, показанных на рис. 3, и соответствовавших «идеальным» условиям выполнения проекта.

Можно сделать вывод, что отказы оборудования существенно влияют на выполнение проекта, и планы, построенные с учётом данного риска, будут в большей степени соответствовать действительности. Продолжительность проекта также увеличилась и достигла 17 недель.

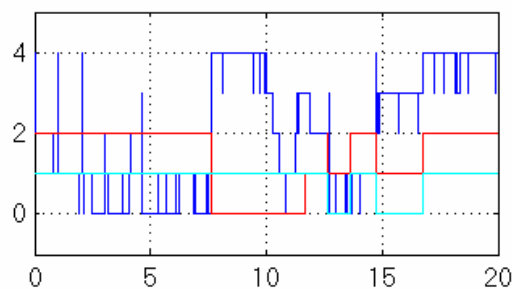


Рисунок 5 - Профили загрузки ресурсов проекта с учётом отказов оборудования

Отметим, что моделирование отказов оборудования не потребовало внесения изменений в основную модель, описывающую проект.

В дальнейшем мы можем наращивать модель, добавляя в неё диаграммы, соответствующие различным процессам. Традиционные модели сетевого планирования такой возможности не предоставляют.

Совместное моделирование нескольких проектов, использующих одни и те же ресурсы, так же не представляет большой сложности. Эту задачу предполагается рассмотреть в дальнейшем.

### **Заключение**

Работа посвящена применению моделей, построенных в математическом аппарате теории автоматов для моделирования процессов выполнения проекта. Обосновано применение для этой цели недетерминированных гибридных автоматов, которые имеют более широкие возможности, чем традиционные методы сетевого планирования.

Построены модели отдельной работы и комплекса работ на примере проекта по созданию приборостроительного изделия. Рассмотрена также задача моделирования отказов оборудования при выполнении проекта. Построена соответствующая модель, которая может функционировать параллельно с основной моделью проекта. Это позволяет повысить адекватность моделей выполнения проекта за счёт учёта рисков отказа ресурсов и других факторов.

Выполнено имитационное моделирование. Результаты моделирования могут использоваться при решении задач календарного планирования проекта, а также распределения ресурсов. Предложенная модель может применяться менеджером проекта для построения детального календарного плана проекта и согласования его с планами операционной деятельности предприятия.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ефремов В.С. Проектное управление: модели и методы принятия решений // Менеджмент в России и за рубежом. – 1998, № 6. – С. 105 – 139.
2. Модели управления научно-техническим прогрессом на предприятии. / Н.Б. Мироносецкий, Л.В. Кирина, С.А. Кузнецова и др. – Новосибирск: Наука, СО, 1988. – 153 с.
3. Цхай С.М. Задачи календарного планирования на сети сложной структуры. – Новосибирск, Изд-во Новосиб. ун-та, 1991. – 148 с.
4. Костина Л.П. Метод критического пути в многопроектных разработках с учётом ресурсов // Экономика и математические методы. – 1998. – Т. 34. – Вып. 3. – С. 140 – 149.

5. Малый В.В., Климова Т.А., Яшина Е.С. Моделирование проектов развития предприятия с использованием математического аппарата гибридных автоматов // Збірник наукових праць ХУПС. – Х: ХУПС, 2007, Вип. 1 (23). – С. 117 – 120.
6. Згуровский М.З., Денисенко В.А. Дискретно-непрерывные системы с управляемой структурой. – Киев: Наукова думка, 1988. – 350 с.
7. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Практическое моделирование динамических систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.
8. Хопкрофт Дж.Э., Мотвани Р., Ульман Дж.Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений, 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 528 с.

Получено 07.06.2007 г.

УДК 629.7

А.П. Алпатов, П.А. Белоножко, П.П. Белоножко, А.А. Витушкин,  
А.А. Фоков

## **БОЛЬШИЕ ОТРАЖАЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ В КОСМОСЕ. АНТЕННЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ**

### **Введение**

Одно из направлений развития спутниковой техники на современном этапе – создание космических аппаратов с пространственно развитыми периферийными элементами, относящихся к классу больших космических конструкций (БКК) [1-5].

Для решения задач спутниковой связи, радиоастрономии, гелиоэнергетики, освоения Луны в ряде случаев целесообразно создание систем, ключевым функциональным элементом которых является отражающая поверхность большой площади. В частности, использование в космосе крупногабаритных рефлекторных антенн позволяет существенно увеличить мощность передаваемого сигнала, и, таким образом, повысить эффективность систем спутниковой связи.

В статье рассмотрены современные конструкции крупногабаритных космических антенн, приведены примеры их использования в составе систем спутниковой связи. Кратко охарактеризованы задачи, требующие решения в процессе создания больших космических отражающих поверхностей.

Рефлекторы AstroMesh фирмы Astro Aerospace

Рефлекторы AstroMesh (рис. 1) разработаны американской компании Astro Aerospace (подразделение компании Northrop Grumman), одним из мировых лидеров в области производства крупногабаритных космических антенн [6–8].

На рис. 2 показаны основные конструктивные элементы рефлектора AstroMesh. Кольцевая опорная ферма (Truss) после трансформации из транспортного положения в рабочее фиксируется в развернутом состоянии. Два сетчатых каркаса (Front Net и Rear Net) крепятся к краям кольцевой фермы. Лицевым (Front Net) считается каркас, на котором закреплена отражающая поверхность (Mesh).

Форма сетчатых каркасов обеспечивается специальными натягивающими элементами (Tension Ties).

Кольцевая опорная ферма состоит из фронтального и тыльного колец, являющихся совокупностью последовательно соединенных лонжеронов, вертикальных и диагональных элементов.

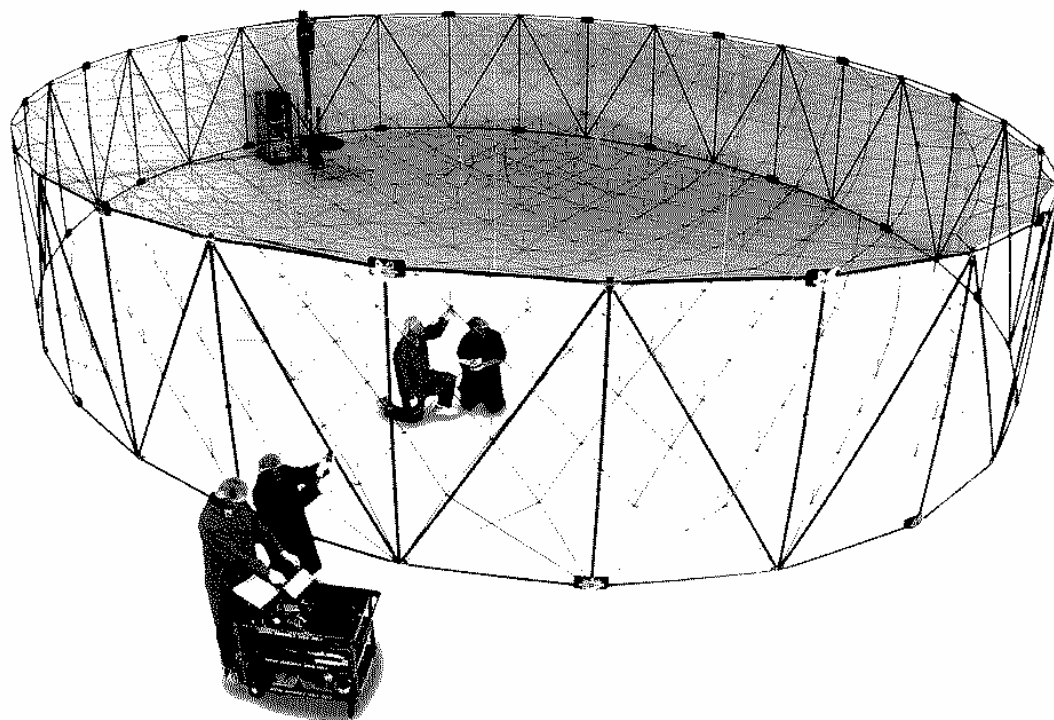


Рисунок 1 – Рефлектор AstroMesh фирмы Astro Aerospace

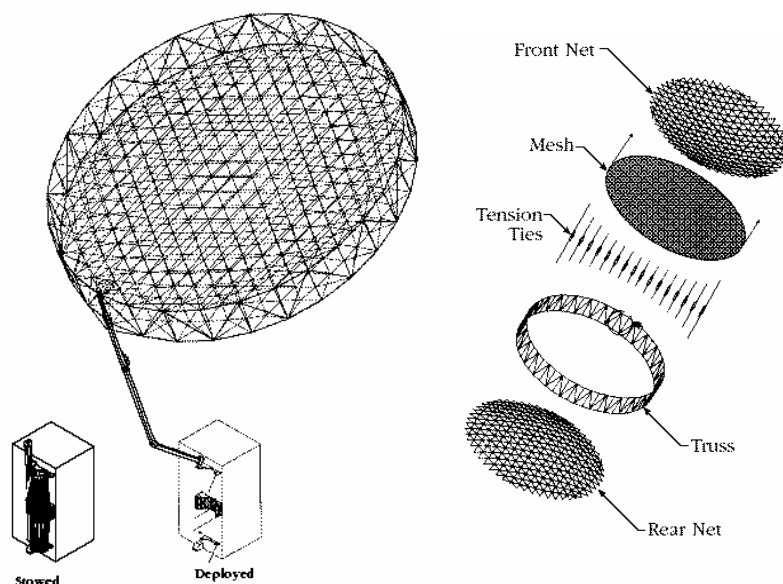


Рисунок 2 – Основные элементы рефлектора AstroMesh

Разворачивание рефлектора AstroMesh из транспортного положения в рабочее проиллюстрировано на рис. 3.



Возможны варианты конструкции с опорными фермами, содержащими три и четыре кольца. Фронтальный и тыльный сетчатые каркасы конструктивно подобны, что облегчает изготовление и обеспечивает равномерную нагруженность конструкции. Натягивающие элементы соединяют между собой соответствующие узлы фронтального и тыльного сетчатых каркасов. Возможен вариант рефлектора с двумя отражающими поверхностями.

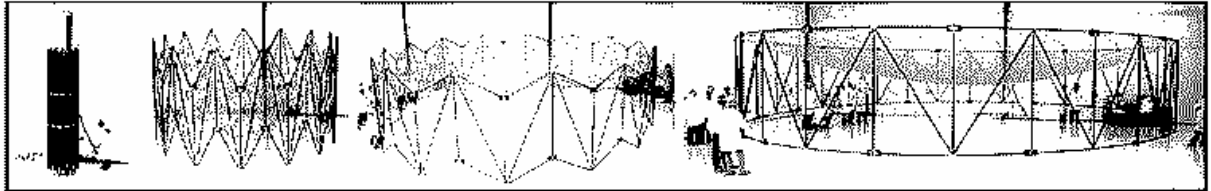


Рисунок 3 – Разворачивание рефлектора AstroMesh

Описанные рефлекторы AstroMesh компании Astro Aerospace используются в качестве направленных космических антенн в системе персональной спутниковой связи Thuraya, в телекоммуникационной системе MBSAT, в глобальной системе широкополосной спутниковой связи Inmarsat 4 [6], [9–13].

Thuraya – геостационарная система персональной спутниковой связи, одной из основных технических особенностей которой является наличие в составе ее космического сегмента большой направленной антенны. Реализована непосредственная передача сигнала со спутника на маломощный наземный терминал – телефон (рис. 4), сопоставимый по габаритам и функциональным возможностям с телефонами сотовой связи.

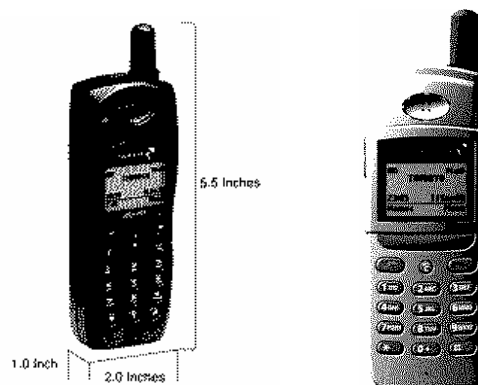


Рисунок 4 – Телефоны системы персональной спутниковой связи Thuraya

Проект системы Thuraya разработан компанией Boeing Satellite Systems. Космический сегмент системы состоит из двух спутников на геостационарной орбите. Первый спутник Thuraya-1 был выведен на

орбиту 21 октября 2000 года ракетой-носителем Zenit-3SL с водной платформы в Тихом океане в рамках международной программы «Морской старт» и размещен на геостационарной орбите в точке  $44^{\circ}$  в.д. Спутник Thuraya-2 был выведен на орбиту 10 июня 2003 года, также в рамках программы «Морской старт», и размещен в точке  $44^{\circ}$  в.д., где ранее располагался первый спутник, который переведен в точку  $98,5^{\circ}$  в.д. Спутник в позиции  $44^{\circ}$  в.д. (с 2000 до 2003 года Thuraya-1, с 2003 года Thuraya-2) предназначен для обслуживания региона, расположенного примерно между  $20^{\circ}$ з.д. и  $100^{\circ}$ в.д. и  $20^{\circ}$ ю.ш. –  $60^{\circ}$ с.ш. В эту зону обслуживания входит более ста стран Европы, Азии и Африки, в том числе часть России и Украина. Спутник в позиции  $98,5^{\circ}$  в.д. (с 2003 года Thuraya-1) предназначен для обслуживания восточных территорий России, Китая и стран Юго-Восточной Азии.

Телекоммуникационный спутник MBSAT был выведен на геостационарную орбиту в марте 2004 года [14]. Спутник принадлежит японской компании Mobile Broadcasting и южнокорейской компании SK Telecom. Предназначен для трансляции видео формата MPEG-4, музыкальных программ CD-качества и других данных на карманные приемники, сотовые телефоны и другие портативные устройства на территории Японии и Южной Кореи. Наличие в составе спутникового сегмента системы 12-метрового рефлектора AstroMesh позволяет осуществлять прием на относительно небольшую антенну даже в зданиях и движущихся на высокой скорости транспортных средствах.

КА подвижной спутниковой связи Inmarsat 4-F2 был выведен в рабочую точку  $53^{\circ}$ з.д. на геостационарной орбите в конце 2005 года [15]. Inmarsat 4-F2 стал вторым аппаратом в глобальной сети широкополосной связи BGAN (Broadband Global Area Network). Аппарат будет обслуживать пользователей в Южной Америке, на большей части Североамериканского континента, а также в Атлантическом и части Тихого океана. О начале предоставления услуг широкополосной спутниковой связи Inmarsat объявил 5 декабря 2005 года. Новая сеть должна обеспечить мобильных пользователей большим спектром мобильных телекоммуникационных услуг (доступ в Интернет, факсимильная и телефонная связь, передача видеоизображений по запросам абонентов,

видеоконференцсвязь). Для подключения к сети BGAN разработаны специальные портативные терминалы, обеспечивающие передачу данных со скоростью до 492 кбит/с. Мощность сигнала Inmarsat 4-F2 примерно в 60 раз больше, чем мощность сигнала спутников Inmarsat предыдущей 3-й серии.

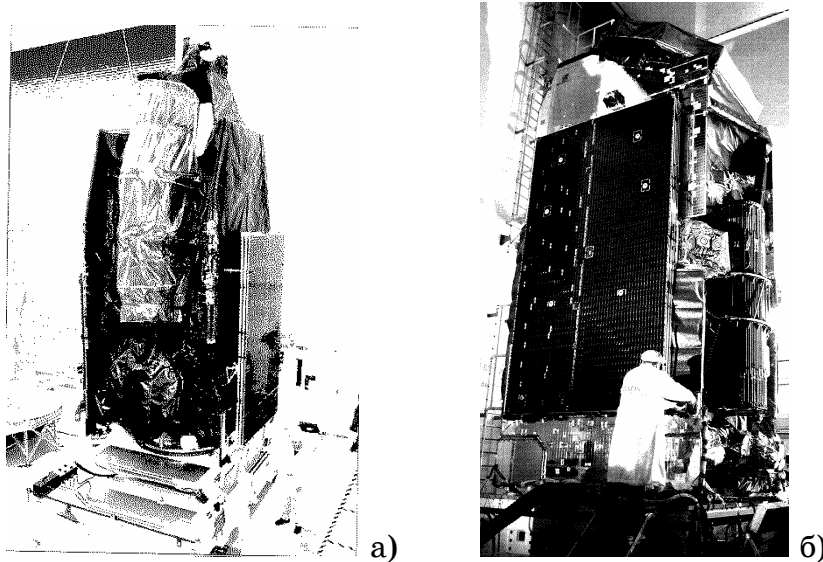


Рисунок 5 – Рефлекторы AstroMesh в составе КА Thuraya (а) и КА Inmarsat 4-F2 (б)

#### Рефлектор фирмы Harris

Еще один подобный рефлектор разработан другим мировым лидером в области производства космических антенн – фирмой Harris (рис. 6) [16].

Основу конструкции составляет надувное опорное кольцо, изготовленное из нескольких слоев гибкого прочного материала. К внутренней стороне опорного кольца при помощи соединительных элементов (стержней, пружин, гибких элементов) крепятся шарнирные узлы V-образно соединенных жестких распорок. Каркас конструкции формируется из гибких элементов, подразделяющихся на вертикальные, перекрещивающиеся и концентрические. На каркасе закрепляется отражающая поверхность (сетчатая в случае использования рефлектора в качестве антенны, и непрерывная в случае его использования как концентратора солнечного излучения). Разворачивание конструкции в рабочее положение осуществляется за счет заполнения опорного кольца сжатым газом.

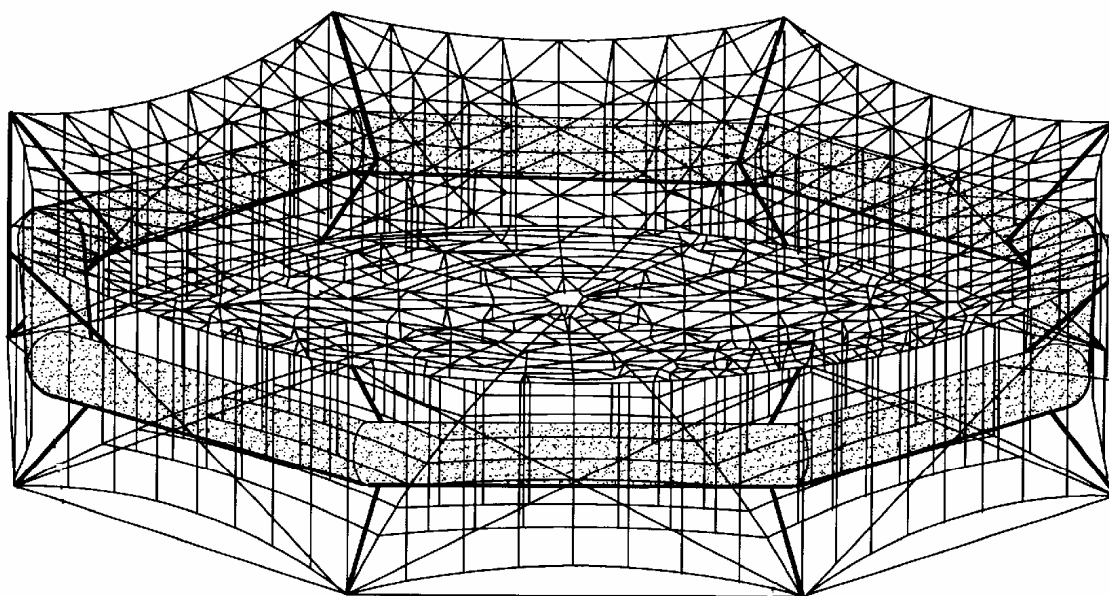


Рисунок 6 – Разворачиваемый рефлектор фирмы Harris

Как отмечают разработчики, важная особенность конструкции – минимальное влияние изменений формы (например, температурных) надувного опорного кольца на форму отражающей поверхности рефлектора. Опорное кольцо является самоцентрирующимся элементом, к которому приложены симметричные относительно оси рефлектора радиально направленные усилия со стороны натягивающих элементов. Все гибкие элементы рефлектора в развернутом состоянии растянуты, жесткие распорки сжаты. Опорное кольцо может быть круглым или выполненным в виде многоугольника.

#### **Рефлекторы РКК «Энергия». Эксперимент «Рефлектор»**

23–28 июля 1999 года на орбитальной станции (ОС) «Мир» был проведен эксперимент «Рефлектор» [17–20]. В ходе эксперимента был развернут крупногабаритный параболический космический рефлектор, разработанный Институтом космических сооружений (Грузия) совместно с РКК «Энергия» (рис. 7).

Во время выхода в открытый космос 23 июля 1999 года космонавты В.М. Афанасьев и С.В. Авдеев вручную закрепили на монтажном кольце фермы «Софора» свернутый рефлектор,

дальнейшее развертывание которого осуществлялось в автоматическом режиме. В ходе эксперимента возникла нештатная ситуация: произошла самопроизвольная блокировка механизма развертывания. Неисправность была устранена и эксперимент успешно продолжен. Рефлектор был полностью развернут в автоматическом режиме, после чего вручную отсоединен от фермы.

Рефлектор содержит центральный узел, силовое кольцо, электромеханические приводы развертывания, опорные лепестки, радиотехническое отражающее сетеполотно. Опорные лепестки радиально расходятся от центрального узла, плоскости их расположения параллельны оси симметрии узла. Сетеполотно прикреплено (приклеено и прошито) к профилированным кромкам опорных лепестков, повторяя их контур, и откидным консолям, являющимся продолжением кромок. Силовое кольцо представляет собой кольцевой пантограф диаметром 5220 мм из шарнирно соединенных перекрещивающихся стержней двух типов: силовых и связующих.

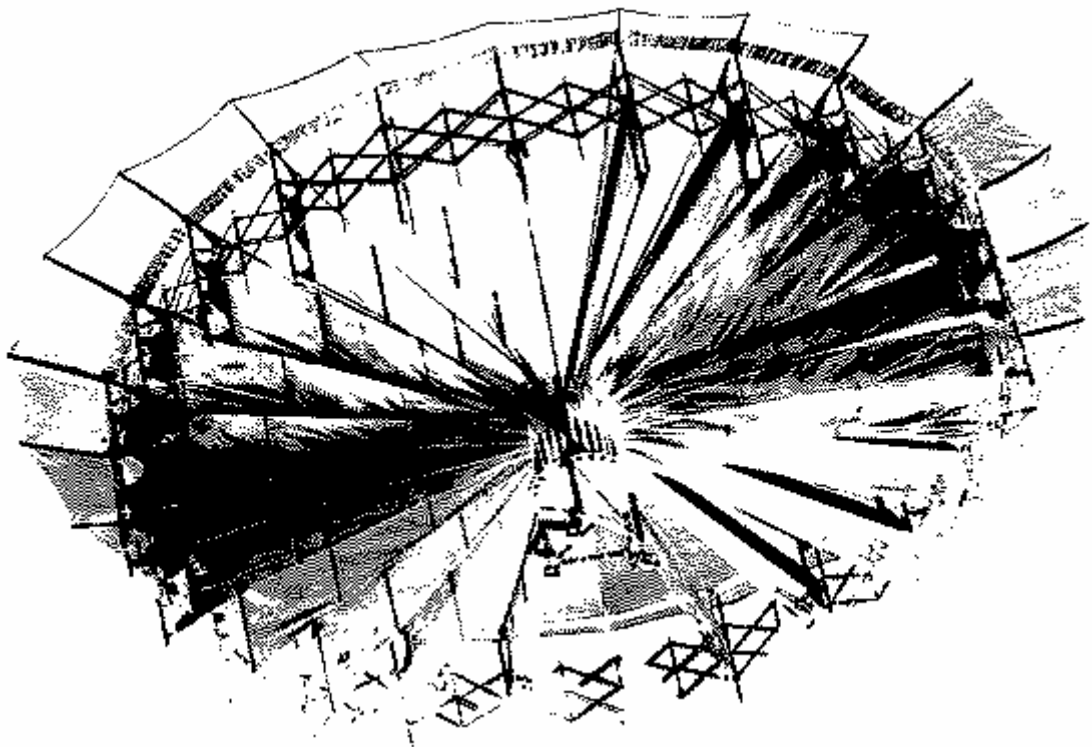


Рисунок 7 – Крупногабаритный параболический отражатель, развернутый в ходе эксперимента «Рефлектор» 23–28 июля 1999 года на ОС «Мир»

Силовые стержни шарнирно крепятся к ползунам, установленным на основных стойках, и образуют силовые ячейки.

Связующие стержни аналогичным образом соединены с промежуточными стойками и образуют связующие ячейки, предназначенные для увеличения жесткости опорного кольца. На основных стойках установлены электроприводы, обеспечивающие разворачивание рефлектора, и шарнирно закреплены откидные консоли разной длины. Опорные лепестки изготовлены из алюминиевой фольги и имеют трапециевидную форму. Лепесток профилирован по контуру в соответствии с кривизной отражающей параболической поверхности. Для обеспечения равномерных усилий в лепестке он профилирован симметрично относительно продольной оси с обеих сторон. Меньшим основанием «трапеции» лепестки жестко крепятся к центральному узлу, большим шарнирно закреплены на опорных стойках. В транспортном положении опорные лепестки накручены на барабан центрального узла и находятся в упруго деформированном состоянии. Откидные консоли также упруго деформированы и прижаты к свернутому силовому кольцу механизмом удержания, выполненным в виде зачеканных стяжек. После сбрасывания механизма удержания и подачи питания на электроприводы силовое кольцо начинает раздвигаться, увеличиваясь в диаметре (ползуны перемещаются вдоль основных стоек, силовые и связующие ячейки принимают форму параллелограммов). Опорные лепестки, прикрепленные к движущимся в радиальном направлении основным стойкам, сматываются с барабана центрального узла, при этом силовое кольцо вращается относительно центрального узла, делая в процессе разворачивания примерно 3,5 оборота. На конечной стадии разворачивания лепестки выравниваются, откидные консоли ориентируются в плоскости лепестков, и сетеполотно натягивается. Электропитание приводов отключается после достижения заданного натяжения опорных лепестков.

Отражающая поверхность рефлектора имеет параболическую форму, кромка имеет форму эллипса, большая полуось которого равна 6400 мм, малая – 5540 мм. Масса конструкции 38 кг.

Успех эксперимента «Рефлектор» во многом определил победу НПО ЭГС (Energia-GPI-Space, предприятия, специально созданного на базе РКК «Энергия» и грузинской компании GPI для разработки крупногабаритных разворачиваемых антенн для спутников связи) совместно с компанией Alena Spazio в тендере, объявленном в

2000 году Европейским космическим агентством на разработку больших развертываемых антенн для коммуникационных спутников [18].

В [20] описан крупногабаритный космический рефлектор диаметром 12 м. За прототип принята конструкция, развернутая в ходе эксперимента «Рефлектор». Отмечены следующие недостатки прототипа:

- наличие разветвленной схемы прокладки тросов приводов развертывания, предполагающей значительную их суммарную длину и большое количество огибаемых роликов;

- трапецевидная форма опорного лепестка приводит к неравномерности распределения усилий по его площади, и, как следствие, появлению складок или гофр, искажающих плоскостность лепестка и форму отражающей поверхности сетеполотна;

- откидные консоли разной длины представляют собой самостоятельные одностепенные механизмы, которые в процессе развертывания силового кольца могут совершать неуправляемые движения, что может привести к повреждению сетеполотна;

- жесткое соединение опорных лепестков с барабаном центрального узла приводит к увеличению суммарной технологической ошибки при сборке конструкции, и, как следствие, к снижению точности формирования отражающей поверхности;

- наличие в составе силового кольца связующих стержней, предназначенных для придания конструкции жесткости, приводит к увеличению числа кинематических пар и потерь на трение при развертывании, увеличению массы и габаритов транспортной укладки, снижению надежности срабатывания рефлектора;

- при увеличении диаметра рефлектора будет возрастать площадь широкой части профилированного с обеих сторон лепестка, и, следовательно, длина основных стоек и силовых стержней, т.е. имеют место ограничения по габаритам.

Предлагаемая конструкция (рис. 8) усовершенствована с целью устранения перечисленных недостатков прототипа.

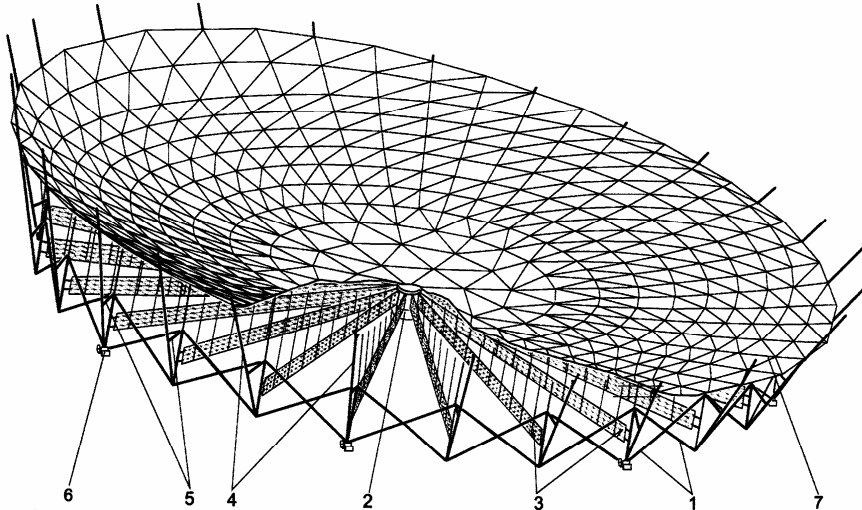


Рисунок 8 – Развертываемый рефлектор РКК «Энергия» на основе прототипа, развернутого в космосе в ходе эксперимента «Рефлектор»

Изображенный на рис. 8 крупногабаритный космический рефлектор содержит силовое кольцо, собранное из стержней 1, центральный узел 2, опорные лепестки 3, рычаги 4 и подкосы 5, приводы развертывания 6, отражающую поверхность рефлектора, выполненную в виде сетеполотна 7.

Называются следующие преимущества разработанной конструкции:

- простота исполнения – рефлектор имеет малое число составляющих элементов и подвижных связей, что значительно уменьшает его массу;

- использование упрощенной системы тросовых передач;

- развертывание рефлектора исключает вероятность зацепления сетеполотна за рычаги и штанги;

- обеспечение отражающей поверхности сетеполотна максимальной точности за счет выполнения шарнирной связи опорных лепестков с центральным узлом;

- прямоугольная форма лепестка обеспечивает равномерное распределение усилий натяжения по всей поверхности, исключая искажение его поверхности. Кроме того, уменьшается масса лепестков и повышается плотность упаковки рефлектора;

- практическое отсутствие влияния увеличения типоразмера рефлектора на габариты транспортной укладки, поскольку площадь каждого опорного лепестка мало изменяется при увеличении размеров рефлектора.



### **Проведение наземных экспериментов (испытательная база Института космических сооружений, Грузия)**

Следует отметить, что при разработке больших космических конструкций, в том числе крупногабаритных космических рефлекторов, возможности проведения орбитальных экспериментов ограничены. В связи с этим возрастает роль экспериментов наземных, для которых требуется специальное испытательное оборудование.

В начале 1980–х годов для разработки инженерных конструкций космических и наземных развертываемых антенн с большими (до 30 м) диаметрами зеркал в Грузии был создан Институт космических сооружений. Построен комплекс для проведения наземных испытаний больших космических конструкций, в первую очередь трансформируемых рефлекторов (рис. 9) [17].

В состав комплекса входят:

- гидростенд 1;
- стенд для прецизионной сборки и испытаний конструкций 2;
- стенд для сборки и испытаний конструкций с перемещаемым каркасом системы обезвешивания 3;
- подвижный стапель 4;
- стенд для радиотехнического тестирования антенн 5.

Гидростенд представляет собой сооружение цилиндрической формы высотой 21 м и диаметром 40 м, расположенное на специальном основании, обеспечивающем равномерное распределение напряжений в его элементах, и покрытое сверху куполом. Загрузочное отверстие в центре купола имеет диаметр 4 м. Испытываемые конструкции и оборудование для экспериментов помещается в гидростенд и извлекается из него при помощи подъемного крана. Снаружи гидростенд оснащен лестницами обслуживания и смотровыми люками, внутри стенда устроено пять технологических ярусов. Гидростенд оборудован механической системой обезвешивания, а также необходимыми для проведения экспериментов служебными системами (водоснабжения, подводного освещения, фото- и видеорегистрации экспериментов, бесконтактного контроля формы конструкции и другими).

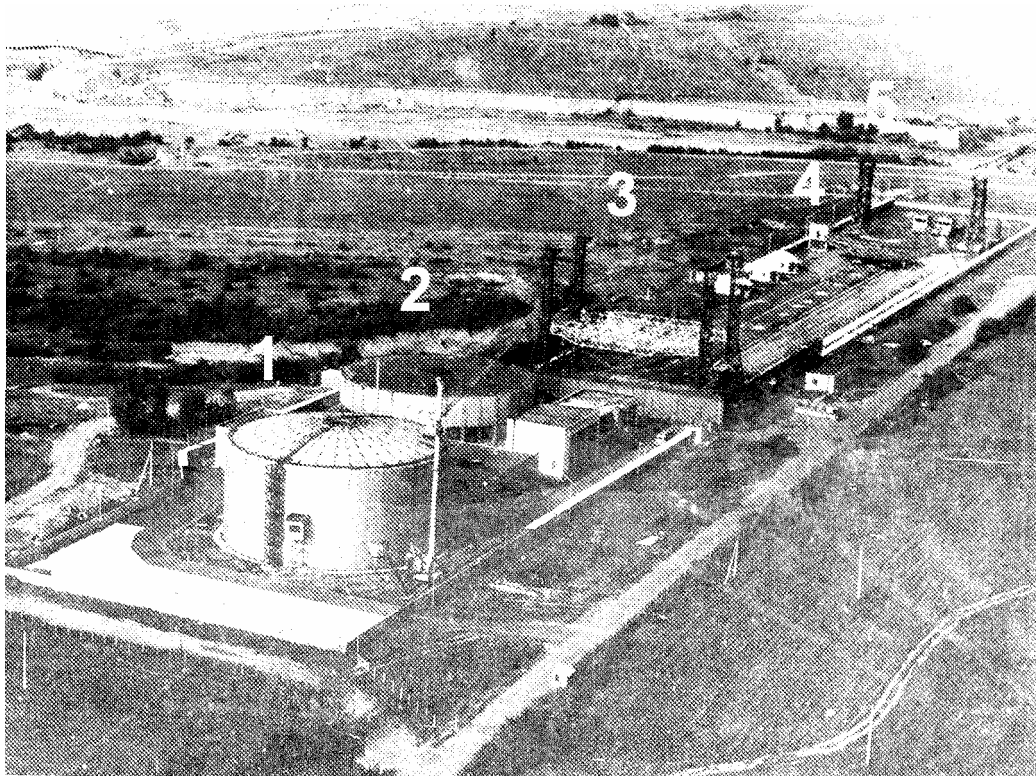


Рисунок 9 – Испытательный комплекс для наземного тестирования крупногабаритных космических рефлекторов Института космических сооружений (Грузия)

Здание стенда для прецизионной сборки и испытаний конструкций также имеет цилиндрическую форму. Диаметр здания 40 м, высота – 12,5 м (полезная высота 10,5 м, под перекрытием предусмотрено свободное пространство высотой 2 м для обслуживания системы обезвешивания). В верхней части стенда расположен лучеобразный каркас из 96 монорельс, на котором размещено оборудование системы обезвешивания (роликовые контейнеры, тросовые связи и др.). Конструкция монтажного пола из массивных металлических плит позволяет осуществлять корректировку его положения с точностью до миллиметра.

Стенд с перемещаемым каркасом системы обезвешивания позволяет осуществлять подъем и опускание конструкции. Каркас размерами 36 м на 36 м опирается на четыре стойки высотой 32,6 м каждая, и может перемещаться относительно этих стоек в вертикальном направлении. Система обезвешивания стенда с подвижным каркасом конструктивно аналогична системе обезвешивания стенда для прецизионной сборки. Для защиты оборудования стенда, первоначально смонтированного под открытым

небом, от неблагоприятных погодных условий впоследствии построено здание. Размеры здания 40 м на 40 м на 40 м.

Подвижный стапель предназначен для транспортировки испытываемой конструкции (крупногабаритного рефлектора) между стендом с перемещаемым каркасом и стендом радиотехнического тестирования антенн. Стапель установлен на двух платформах, перемещающихся по железнодорожным путям длиной 250 м.

Поворотное устройство представляет собой две стойки на подвижных массивных основаниях – бетонных платформах, жестко связанных с третьей платформой при помощи металлических ферм. Перемещается поворотное устройство по двум железнодорожным колеем, уложенным на специальном фундаменте в форме концентрических окружностей.

Подвижный стапель вместе с установленным на нем крупногабаритным рефлектором фиксируется в поворотном устройстве, после чего становится возможным вращение рефлектора для наведения его на различные объекты (как наземные, так и космические).

### **Выводы**

Проведенный обзор и анализ литературных источников с позиций изучения современных тенденций развития спутниковой техники позволяет сделать вывод о перспективности использования в космосе отражающих поверхностей большой площади. В настоящей статье рассмотрен класс разворачиваемых из транспортного положения в рабочее после выведения на орбиту крупногабаритных космических рефлекторов используемых, или предполагаемых к использованию в качестве апертурных антенн современных систем спутниковой связи. Следует отметить также возможность использования подобных рефлекторов в качестве космических радиотелескопов и отражателей солнечного излучения в системах различного назначения.

Крупногабаритная космическая конструкция, в частности, рефлекторная антенна, как механический объект обладает рядом специфических особенностей, обусловленных наличием транспортных ограничений на габариты и массу выводимого на орбиту груза. Низкая жесткость конструкции и малые коэффициенты внутреннего демпфирования в сочетании с необходимостью обеспечить высокую

точность стабилизации углового положения конструкции и заданные параметры отражающей поверхности требуют проведения специальных научных исследований, направленных на повышение эффективности процесса проектирования как самих конструкций, так и систем управления.

Следует отметить также необходимость разработки при создании крупногабаритных космических конструкций, в частности, антенных систем, новых передовых технологий, во многом определяющих эффективность дальнейшего развития спутниковой техники.

Вопросам исследования больших космических отражателей, как обширного класса БКК, посвящены работы [1–5], [17].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Згуровский М.З., Бидюк П.И. Анализ и управление большими космическими конструкциями / Национальный технический ун-т Украины "Киевский политехнический ин-т". – К.: Наукова думка, 1997. – 451с.
2. Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Большие космические конструкции: модели, методы исследования и принципы управления. I // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 7. – С. 52 – 65.
3. Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Большие космические конструкции: модели, методы исследования и принципы управления. II // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 8. – С. 55 – 66.
4. Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Модально-физическая модель пространственного углового движения деформируемого космического аппарата и ее свойства // Автоматика и телемеханика. – 1998. – № 12. – С. 38 – 50.
5. Баничук Н.В., Карпов И.И., Климов Д.М. и др. Механика больших космических конструкций. – М.: Факториал, 1997. – 302 с.
6. <http://www.st.northropgrumman.com/astro-aerospace>
7. Patent US005680145A. Light-weight reflector for concentrating radiation / Mark W. Thomson, Geoffrey W. Marks, John M. Hedgepeth // <http://www.freepatentsonline.com>
8. Mark W. Thomson. The AstroMesh deployable reflector. // <http://www.st.northropgrumman.com/astro-aerospace>
9. Слюсарь В.И. Thuraya–1 сквозь призму технических новшеств // TeleMultiMedia. – 2001. – № 5(9). // <http://www.telemultimedia.ru/>
10. <http://www.thuraya.com.ua>
11. Система Thuraya. // <http://www.connect.ru>
12. Прохоров Н. Thuraya должна стать повседневной связью // <http://tmsat.ru>
13. Запуск космического аппарата Thuraya D2: Хронология работ. // <http://www.energia.ru>

14. На спутнике MBSAT развернут 12-метровый антенный отражатель: По материалам Spaceflight Now // [www.atlasaerospace.net/newsi-r.htm](http://www.atlasaerospace.net/newsi-r.htm)
15. Второй мощный спутник для Inmarsat. Запуск Inmarsat 4-F2 // Новости космонавтики. – 2006. – № 1(276), том 16. – С. 8–9.
16. Patent US005990851A. Space deployable antenna structure tensioned by hinged spreader-standoff elements distributed around inflatable hoop / Philip J. Henderson, Richard A. Deadwyler // <http://www.freepatentsonline.com>
17. Медзмариашвили Э. Трансформируемые конструкции в космосе и на земле. – Тбилиси, 1995. – 446 с.
18. Побединская М. Новое предприятие по разработке больших антенн для КА // Новости космонавтики. – 2002. – № 2(229). – С.67.
19. <http://egs.cosmos.ru/index.htm>
20. Патент RU.2214659.C2. Развертываемый крупногабаритный космический рефлектор / Ю. Кравченко, В. Корнеев, А. Федосеев // <http://www.fips.ru>
21. Tadashi Takano. Needs for gigantic antennas for space use and their technical problems // IV International Conference on Antenna Theory and Techniques, September 9-12, Sevastopol, Ukraine – 2003. – Севастополь.

Получено 22.03.2007 г.

УДК 629.7

А.П. Алпатов, П.А. Белоножко, П.П. Белоножко, А.А. Витушкин,  
А.А. Фоков

**БОЛЬШИЕ ОТРАЖАЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ В КОСМОСЕ.  
РАДИОТЕЛЕСКОПЫ, СОЛНЕЧНЫЕ КОНЦЕНТРАТОРЫ,  
ПЛОСКИЕ ОТРАЖАТЕЛИ**

**Введение**

Разработка больших космических конструкций (БКК), в том числе космических аппаратов с пространственно развитыми периферийными элементами – одно из важных направлений развития спутниковой техники [1-6].

Потребности спутниковой связи, радиоастрономии, гелиоэнергетики на современном этапе развития требуют создания космических систем, ключевым функциональным элементом которых является отражающая поверхность большой площади. К примеру, выведение в космос крупногабаритных радиотелескопов позволяет реализовать радиоинтерферометры со сверхдлинной базой, разрешающая способность которых многократно превосходит разрешающую способность оптических приборов.

В статье рассмотрены современные крупногабаритные радиотелескопы, а также системы, использующие концентрированное солнечное излучение (тепловой ракетный двигатель, солнечная газотурбинная установка) и зеркальное отражение солнечного света (освещение земной поверхности). Кратко охарактеризованы задачи, требующие решения в процессе создания подобных систем.

**Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой.**

**Проекты НАСА и «Радиоастрон»**

Не менее, чем спутниковая связь, перспективна космическая радиоастрономия - еще одна область использования больших рефлекторов [1-5].

Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой с использованием космического радиотелескопа – современное развитие систем последовательного апертурного синтеза, в основу работы которых

положено использование для наблюдения принципа интерферометра [1]. Разнесенные в пространстве на некоторое расстояние, называемой базой интерферометра, антенны принимают сигнал от удаленного космического объекта. Сигналы антенн складываются в приемнике. При перемещении удаленного источника сигналы от него, принимаемые антеннами, складываются то в фазе, то в противофазе за счет разности расстояний от источника до антенн, постоянно изменяющейся вследствие перемещения источника. Сигнал, принимаемый приемником имеет нули и максимумы, таким образом, луч интерферометра состоит из ряда лепестков. Это обстоятельство позволяет улучшить разрешающую способность системы, которая увеличивается с увеличением базы. Если антенна установлена на спутнике (рис. 1), база интерферометра, определяется высотой орбиты, и может быть существенно увеличена по сравнению с базами наземных радиоинтерферометров.

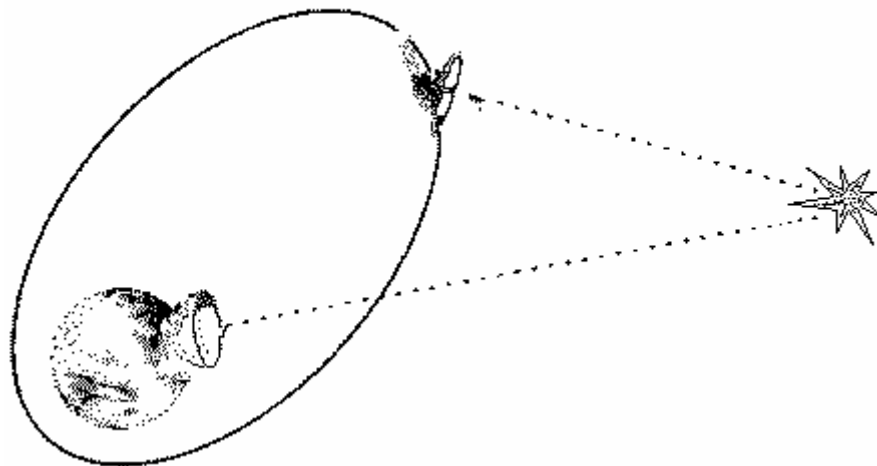


Рисунок 1 – Космический радиоинтерферометр со сверхдлинной базой

Наиболее масштабный на сегодняшний день проект радиоинтерферометра со сверхдлинной базой, использующего космический радиотелескоп диаметром 8 м – японская система HALCA [1–3].

Японский КА для астрономических наблюдений HALCA (рис. 2) запущен в феврале 1997 года с космодрома Kagoshima. Спутник массой 830 кг создан в Japanese Institute of Space & Astronomical Science. Наклонение орбиты  $31^{\circ}32'$ , период обращения  $T=380$  мин, перигей  $\Pi=573$  км, апогей  $A=21402$  км. Диаметр радиотелескопа 8 м.

Длина волны 1,3 см и 18,6 см. Работает совместно с 40 наземными телескопами, разрешающая способность 0,0001", в 1000 раз выше, чем разрешающая способность «Хаббла», которая составляет 0,1".

Радиотелескоп сконструирован в соответствии со специально разработанной концепцией натяженной фермы (tension-truss concept) [2]. Отражающая поверхность – сетка из покрытого золотом молибдена, которая натянута между шестью выдвижными телескопическими мачтами. Диаметр субрефлектора около 1 м.

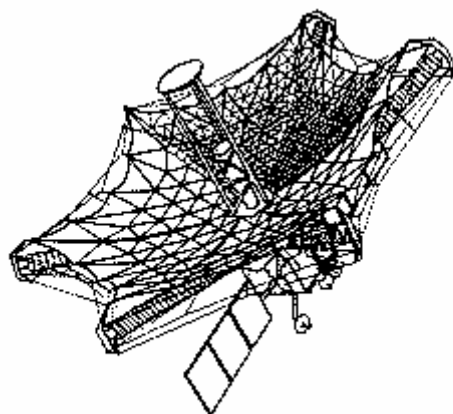


Рисунок 2 – Космический радиотелескоп HALCA

Отмечаются трудности, возникшие на начальном этапе разработки при отладке механизма разворачивания, а также с обеспечением требуемого уровня вибрации при испытаниях конструкции на вибростенде, преодоление которых потребовало разработки специальных методов.

В настоящее время готовится к запуску еще один космический радиотелескоп в рамках международного проекта «Радиоастрон» [4-5]. Проект предусматривает запуск 10-метрового рефлектора (рис. 3) на орбиту с апогеем до 350 тысяч километров. Предполагаемая ширина интерференционных лепестков до 8 микросекунд дуги для самой короткой длины волны проекта 1,35 см.



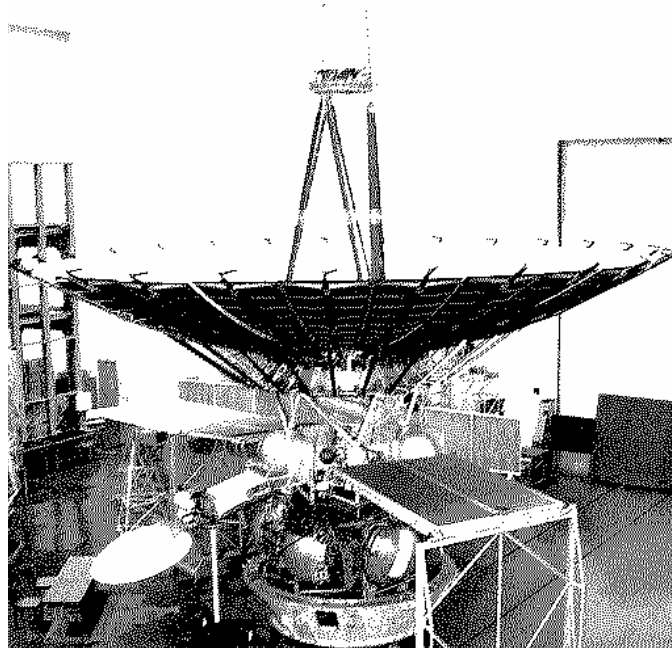


Рисунок 3 – Космический радиотелескоп проекта «Радиоастрон»

Программа «Радиоастрон», начатая Астрокосмическим центром Физического института Российской Академии Наук совместно с другими институтами РАН и Федерального Космического Агентства, расширилась в глобальное международное сотрудничество. Ученые 20 стран создают бортовые научные приборы, специальные телеметрические станции и центры обработки, участвуют в составлении научной программы.

Астрофизический модуль (рис.3) создается в ОКБ им. Лавочкина. Этот модуль предполагается использовать и в нескольких других проектах. Полная масса полезного научного груза (в том числе антенны) приблизительно 2600 кг.

Зеркальная антенна космического радиотелескопа диаметром 10 м изготовлена из композиционного материала и состоит из 27 раскрывающихся лепестков и центрального зеркала диаметром 3 м. Масса антенны – 1500 кг.

#### **Концентраторы солнечного излучения**

Следует отметить возможность использования больших космических рефлекторов не только в качестве антенн спутниковой связи и радиотелескопов, но и в качестве концентраторов солнечного излучения. В [6], например, рассмотрены варианты использования конструкции, развернутой в ходе эксперимента «Рефлектор», и как антенны, и как солнечного концентратора. В первом случае в

качестве отражающей поверхности используется металлическое сетеполотно, во втором – алюминизированная пленка.

Предлагаемый в [7] солнечный тепловой ракетный двигатель (СТРД) (рис.4), разработанный в НПО «Энергия», содержит концентратор 1, приемник излучения, состоящий из внешней трубки 2 и расположенной внутри нее внутренней трубки 3. Внутренняя трубка 3 одним концом (входным) соединена через клапан 4 и регулятор 5 подачи рабочего тела с баком 6 с рабочим телом. На другом конце внутренней трубки 3 имеется выходное отверстие, сообщающееся с внешней трубкой 2. В свою очередь, внешняя трубка 2 имеет выходное отверстие, вынесенное за критическое сечение сопла двигателя, которое присоединено к концентратору 1 в его узкой части.

При ориентации двигателя на Солнце концентратор 1 обеспечивает максимальный нагрев трубок 2 и 3 приемника излучения. При открытии клапана 4 рабочее тело вытесняется избыточным давлением, определяемым регулятором 5 подачи, из бака 6 и поступает по внутренней трубке 3 к ее выходному отверстию, при этом рабочее тело уже нагревается за счет теплопередачи от концентрически расположенной нагретой внешней трубки 2. Поступающее через выходное отверстие внутренней трубки 3 нагретое рабочее тело движется во внешней трубке 2 к ее выходному отверстию, расположенному за критическим сечением, все более нагреваясь, за счет чего его кинетическая энергия увеличивается. Нагретый до максимальной температуры газ поступает в сопло 7 двигателя и истекает, создавая необходимую для движения КА ракетную тягу.

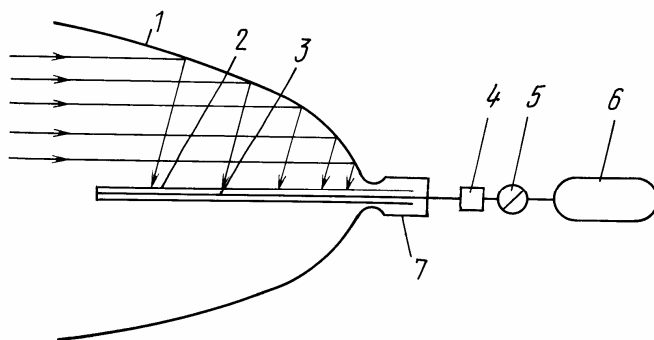


Рисунок 4 – Солнечный тепловой ракетный двигатель с нагревом рабочего тела при помощи солнечного концентратора

Вариант СТД, описанный в [8–11], разработан в Исследовательском центре им. М.В. Келдыша и предназначен для использования в качестве маршевого двигателя в составе солнечной энергодвигательной установки (СЭДУ). СТД с электронагревным тепловым аккумулятором/теплообменником, содержащий баки с жидкими водородом и кислородом, системы подачи водорода и кислорода и камеру двигателя, снабжен компрессором и ресивером газообразного водорода, газификатором кислорода и ресивером газообразного кислорода с электроподогревателем. В этом варианте рабочее тело нагревается в тепловом аккумуляторе. Нагрев аккумулятора осуществляется электроподогревателем, питаемым солнечной батареей. Возможен также способ нагревания теплового аккумулятора при помощи концентратора, требующий точной ориентации концентратора на Солнце и высокой точности поддержания формы его отражающей поверхности. В [6] приведены описания солнечной энергодвигательной установки, использующей СТД с концентратором. Принципиальная схема СЭДУ изображена на рис. 5.

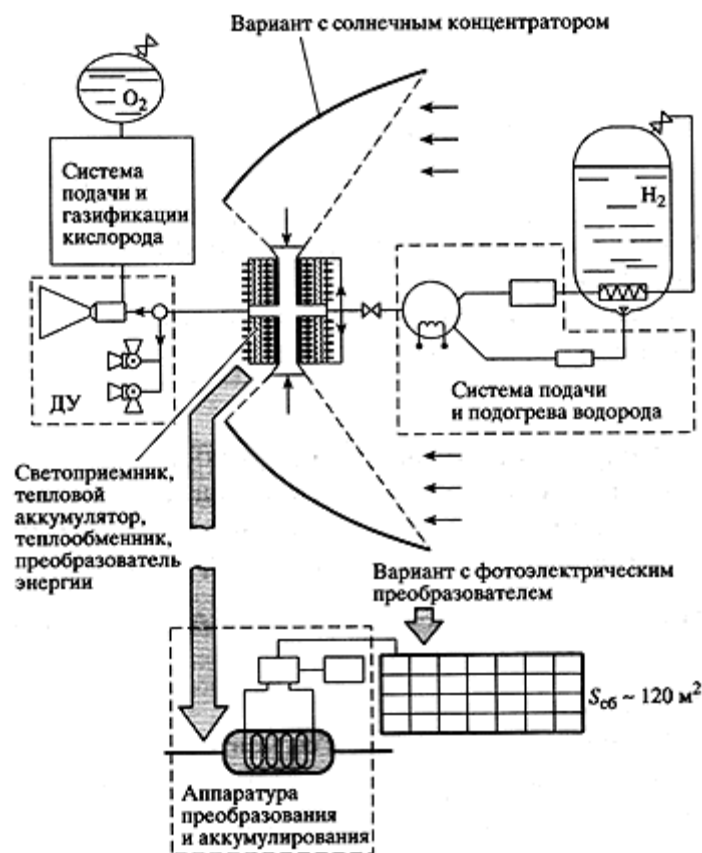


Рисунок 5 – Солнечная энергодвигательная установка

Разгонные блоки на базе СЭДУ могут обеспечить высокоэффективную доставку КА с низкой опорной орбиты на межпланетные траектории, высокоэллиптические и высокие круговые орбиты, в том числе геостационарную.

В [6] описана также солнечная газотурбинная установка (СГТУ), разработанная РКК «Энергия» совместно с Исследовательским центром им. М.В. Келдыша (рис. 6), в состав которой входит крупногабаритное зеркало-концентратор. Основные функциональные элементы установки показаны на рисунке. Большая масса установки позволяет использовать ее только в составе крупномасштабных комплексов (массой более 400 т), например, в составе орбитальных станций, в составе лунной базы, в составе марсианского пилотируемого КА.



Рисунок 6 – Солнечная газотурбинная установка

Еще одним вариантом использования солнечной энергетической установки с параболическим концентратором является система [12] глобального восстановления защитного озонового слоя Земли (рис. 7). Предполагается на освещенной Солнцем стороне Земли облучать атмосферный воздух на высоте более 25 км лазерным излучением. Генерируемый при этом атомарный кислород, рекомбинируя с кислородом молекулярным, образует озон.

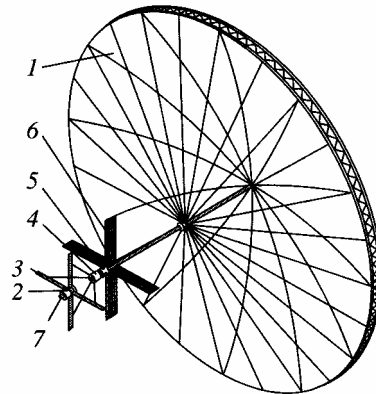


Рисунок 7 – Космический аппарат – генератор озона

В РКК «Энергия» разработана космическая система, предназначенная для восстановления озонового слоя описанным способом. Основой системы является космический аппарат – генератор озона (КАГО) с лазерным излучателем на борту (рис. 7). КАГО предусматривает использование солнечной энергии, преобразуемой бортовой солнечной энергетической установкой в электрическую, для питания лазера.

Солнечная энергетическая установка включает концентратор солнечной энергии 1 пленочно-каркасной конструкции с системой, использующей электростатические заряды для поддержания параболической формы отражающей поверхности, преобразователь лучистой энергии в тепловую и затем в электрическую с использованием турбогенераторов 2 и высокотемпературный радиатор или радиатор капельного типа для сброса тепла 3. При концентраторе диаметром 600 м, способном собирать солнечную энергию мощностью  $\approx 300$  МВт, ожидаемая электрическая мощность солнечной энергетической установки может составить 100 МВт, а мощность лазерной установки – до 35 МВт.

В состав КАГО также входят лазерная установка со средствами визирования и расфокусировки луча 5 и с радиаторами для сброса тепла от лазерной установки 6, приборный отсек 4, электроракетная двигательная установка (ЭРДУ) для перевода спутника с промежуточной на рабочую орбиту и наоборот (в случае отсутствия в составе космических средств многократного межорбитального буксира), центральная ферма с обслуживающим оборудованием и системами и узел стыковки 7.

Общая масса всего космического аппарата с учетом перспективных разработок составит около 80 т при продолжительности активного существования до 10 лет. Как отмечается в [12], практически КАГО представляет собой космическую электростанцию, и может в качестве унифицированного элемента входить в состав будущих космических энергосистем для снабжения электроэнергией наземных потребителей или дистанционного снабжений энергией космических потребителей.

### Плоские отражатели солнечного излучения

Впервые разворачивание в космосе бескаркасной тонкопленочной конструкции было осуществлено в космосе в рамках эксперимента «Знамя-2» 4 февраля 1993 года [13–16]. Международный конкурс, объявленный в конце 1988 года в связи с 500-летием открытия Америки Колумбом, предполагал запуск к Луне трех «космических парусников» (американского, советского и японского), движимых солнечным давлением. По условиям конкурса необходимо было первым достичь Луны, или хотя бы запустить солнечный парус. При этом конструкция солнечного паруса должна была предусматривать возможность его применения для других целей.

Российский проект солнечного паруса в качестве альтернативного применения предполагал целенаправленное отражение солнечного света на неосвещенные участки земной поверхности. Впоследствии освещение Земли отраженным солнечным светом из космоса стало основной целью серии экспериментов «Знамя», подготовленных специально созданным российским консорциумом «Космическая регата». Были подготовлены эксперименты по разворачиванию бескаркасных конструкций за счет электростатических сил («Знамя-1») и за счет центробежных сил («Знамя-2»). Осуществлен эксперимент «Знамя-2».

Конструкция (рис. 8), развернутая в ходе эксперимента, состоит из агрегата разворачивания отражателя (АРО) 1 и собственно отражателя 2, изготовленного из алюминизированной пленки толщиной 5 мкм. В развернутом виде отражатель состоит из 8 лепестков (рис. 9а), закрепленных к АРО при помощи нитей 3. Для соединения с транспортным кораблем «Прогресс М-15» предназначен стыковочный шпангоут 4.

АРО состоит из вращающегося барабана, восьми катушек, на которые намотана разделенная на восемь секторов пленка и электромеханического привода, обеспечивающего раскрутку барабана, выпуск секторов паруса и качание оси вращения отражателя для проверки устойчивости паруса к возмущениям (рис. 9б). АРО имеет форму цилиндра диаметром 720 мм и высотой 720 мм. Масса АРО – 40 кг.

Для раскрытия отражателя производится раскрутка барабана АРО до скорости 10 рад/с и принудительный выпуск секторов отражателя с катушек. Время раскрытия – около трех минут. После разворачивания отражателя для обеспечения его формы поддерживается скорость вращения барабана примерно 2 рад/с. Масса отражателя (без учета напыления на его поверхность рекламы изготовителей и спонсоров эксперимента) – 4,2 кг.

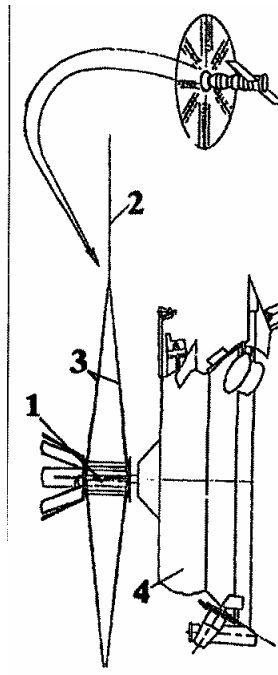
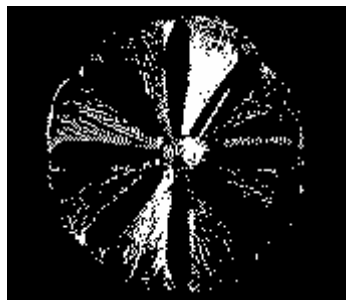


Рисунок 8 – Элементы конструкции бескаркасного пленочного отражателя



а)



б)

Рисунок 9 – Эксперимент «Знамя-2»: бескаркасный пленочный отражатель (а) и агрегат разворачивания отражателя (б)

После отделения транспортного корабля «Прогресс М-15» от орбитального комплекса «Мир» было успешно осуществлено развертывание отражателя. Транспортный корабль с помощью двигателей причаливания и ориентации выполнил плановые развороты, в ходе которых была подтверждена устойчивость конструкции.

В целом эксперимент «Знамя-2» оказался весьма успешным, однако показал невысокое качество оптических характеристик отражателя из-за деформаций пленочного полотна.

Промежуточный эксперимент «Знамя 2,5», предполагал проверку модификаций пленочной конструкции, улучшающих плоскостность отражателя диаметром 25 м и его оптические характеристики, проверку оборудования, необходимого для эксперимента по подсветке, управление ориентацией отражателя в ручном режиме и проведение комплексных проверок системы в целом. Запуск состоялся на грузовом корабле «Прогресс М-40» 26 октября 1998 года, развертывание отражателя – 4 февраля 1999 года. Эксперимент был сорван из-за ошибки в программе управления: не была убрана вовремя одна из антенн, и за нее зацепилось полотнище отражателя в процессе развертывания.

Описываемая в [16] система орбитального освещения приполярных городов предполагает несколько иную – пленочно-каркасную конструкцию отражателя.

Разработка «Системы освещения с орбиты приполярных городов» была начата в 1992 – 1993 г.г. в Исследовательском центре им. Келдыша и РКК «Энергия». Система (в конфигурации, описываемой в [16]) предназначена для освещения регионов, расположенных по географической широте  $\varphi = 70 \pm 2^\circ$  Северного полушария (Мурманск, Норильск) и любой долготы. Система представляет собой совокупность 100 идентичных космических аппаратов-рефлекторов (КА-Р), равномерно расположенных на низкой орбите, использующих способ зеркального отражения солнечного излучения.

КА-Р (рис. 10) состоит из солнечного отражателя (СО) 1 и гиромаховика 4 которые смонтированы на центральной ферме (ЦФ).



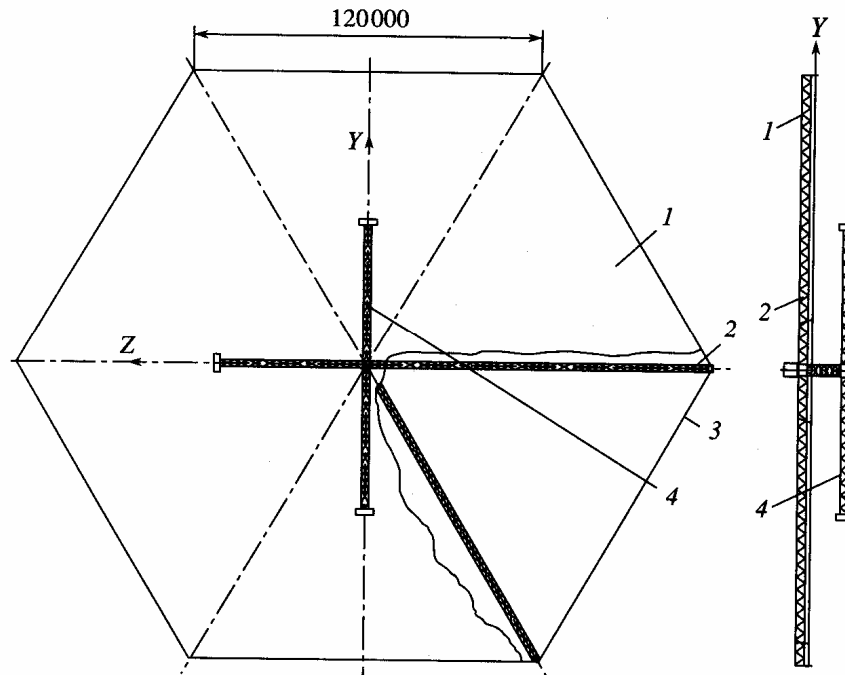


Рисунок 10 – Космический аппарат-рефлектор системы орбитального освещения приполярных городов

Отражатель каркасно-пленочной конструкции выполнен в форме шестиугольника, по периметру которого в канале пленки проложен трос 3 для обеспечения ее натяжения. Отражающая поверхность – полиамидная пленка толщиной 8 мкм. Трос в вершинах углов крепится к шести радиальным фермам 2 длиной 120 м каждая, сходящимся к центральной ферме. Узлы крепления тросов к центральной ферме имеют шарниры для обеспечения коррекции плоскости и натяжения пленки отражателя. В центре полотнища отражатель имеет отверстие для центральной фермы. Центр масс КА-Р расположен в районе геометрического центра плоскости отражателя.

На элементах конструкции центральной фермы располагаются блоки комплекса бортовых систем (БКС), например, солнечные батареи, которые при эволюциях КА могут поворачиваться в направлении Солнца, лазерный блок контроля формы отражателя, антенно-фидерные устройства. На теневой части ЦФ установлен радиатор системы обеспечения теплового режима. Со стороны освещаемой солнечным светом отражающей поверхности – система приводов и шарниров гиромаховика. Этот узел может выглядеть аналогично вертолетному редуктору или в виде карданового шарнира.

Гиромаховик состоит из четырех ферм длиной по 50 м. На каждой из них размещен вспомогательный приборный отсек, в котором установлен агрегат напыления металлизированного покрытия пленки СО. Напыление покрытия в космосе позволяет увеличить значение коэффициента отражения.

После раскрытия отражателя и гиромаховика с одновременной их раскруткой производится напыление металлизированного отражающего слоя на пленку. Управление положением КА-Р относительно своего центра масс осуществляется за счет гироскопического эффекта. Форма отражающей поверхности корректируется специальной системой.

В сложенном состоянии КА-Р вписывается в форму цилиндра диаметром 5,5 м и высотой от 2,7 до 3 м. Проектная масса конструкции КА-Р 6500 кг, площадь отражающей поверхности пленочно-каркасного зеркала 30000 м<sup>2</sup>.

### **Выводы**

Обзор литературных источников и анализ современных тенденций развития спутниковой техники позволяет сделать вывод о перспективности использования в космосе отражающих поверхностей большой площади. В настоящей статье рассмотрены крупногабаритные космические радиотелескопы, используемые и предполагаемые к использованию совместно с крупнейшими наземными радиотелескопами в радиоинтерферометрах со сверхдлинной базой, а также проекты концентраторов солнечного излучения в составе солнечного теплового ракетного двигателя, солнечной газотурбинной установки. Приведено описание проекта космического аппарата-генератора озона системы восстановления озонового слоя Земли. Рассмотрены плоские отражатели солнечного излучения – эксперимент «Знамя-2» и проект космического аппарата-рефлектора системы орбитального освещения приполярных городов.

Как механические объекты рассматриваемые конструкции характеризуются низкой жесткостью, малыми коэффициентами внутреннего демпфирования. Названные особенности обусловлены наличием транспортных ограничений на массу и габариты, и, как следствие, необходимостью разворачивать конструкции в рабочее состояние после выведения на орбиту. Таким образом, актуально проведение специальных научных исследований как при

проектировании самих конструкций, так и при разработке для них систем управления. При этом существует необходимость управления и угловой ориентацией системы, и формой отражающей поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брауде С.Я., Конторович В.М. Радиоволны рассказывают о Вселенной. – 2-е изд., испр. и доп. – К.:Академперіодика, 2005. – 203 с.
2. Tadashi Takano. Needs for gigantic antennas for space use and their technical problems // IV International Conference on Antenna Theory and Techniques, September 9-12, Sevastopol, Ukraine – 2003. – Севастополь. – С. 1 – 6.
3. <http://www.isas.ac.jp/e/index.shtml>
4. Кардашев Н.С. Проект Радиоастрон и космическая радиоастрономия // <http://www.federalspace.ru>
5. Проект Радиоастрон // <http://www.federalspace.ru/>, [www.asc.rssi.ru/](http://www.asc.rssi.ru/)
6. [radioastron/rus](http://radioastron.rus)
7. Семенов Ю.П. Новые российские технологии в ракетно-космической технике последних лет // Вестник российской Академии наук. – 2000. – Т. 70, № 8. – С. 696–709.
8. Патент RU.2028503.C2. Солнечный тепловой ракетный двигатель / В. Сыромятников, С. Темнов // <http://www.fips.ru>
9. Патент RU.2126493.C1. Солнечный тепловой ракетный двигатель / А. Коротеев, В. Акимов, Н. Архангельский и др. // <http://www.fips.ru>
10. Патент RU.2150054.C1. Тепловой аккумулятор для нагрева газа / А. Губертов, В. Миронов, А. Коротеев и др. // <http://www.fips.ru>
11. Патент RU.2176767.C1. Тепловой аккумулятор для нагрева газа / А. Губертов, В. Миронов, А. Коротеев и др. // <http://www.fips.ru>
12. Патент RU.2197630.C1. Солнечный тепловой ракетный двигатель и способ его работы / А. Коротеев, Н. Архангельский, В. Акимов и др. // <http://www.fips.ru>
13. Бакушин О.С., Дегтяренко Г.Н. и др. Космическая система восстановления озонового слоя Земли // Известия академии наук. Энергетика. – 2006. – № 1. – С. 15 – 20.
14. Бойко И. Космическое зеркало // Иллюминатор. – 2003. – № 1(3) // <http://www.illuminator.ru>
15. <http://src.space.ru>
16. Расстыковка КК «Прогресс М\_15» и эксперимент «Знамя\_2» // Бюллетень «Новости космонавтики» – 1993. // <http://epizodsspace.testpilot.ru/bibl/nk>
17. Семенов В.Ф., Сизенцев Г.А. и др. Система орбитального освещения приполярных городов // Известия академии наук. Энергетика. – 2006. – № 1. – С. 21 – 30.

Получено 22.03.2007 г.

**СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ**

УДК 530.1

А.И. Михалев, В.В. Помулев, В.Г. Горб, Ю.С. Пройдак

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ 3D  
МЕТАЛЛОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЕРКОЛЯЦИОННЫХ  
КЛАСТЕРОВ**

**Введение.** Для получения информации о структуре металлоструктур используют различные методы и подходы описания видимой в микроскоп (или на микрофотографии) картины. Однако истинный интерес представляет пространственное строение сплава, а не плоскостная структура. При этом существует необходимость получения количественных оценок его строения (структуры) [1]. В тоже время непосредственно наблюдать внутреннее строение металлических материалов невозможно, и приходится ограничиваться изучением двухмерной картины, рассматривая плоскостную структуру не как самостоятельный объект оценки, а лишь как источник информации о реальном пространственном строении сплава [8].

В данной работе предложен один из подходов моделирования 3D структуры металлических материалов, основанный на пространственных перколяционных кластерах. Оправданность предлагаемого подхода вытекает из физической сути самого процесса затвердевания, при котором образуются два вложенных друг в друга перколяционных кластера: один, состоящий из частиц кластера, другой - из материала среды, окружающей кластер [3].

**Целью работы** является моделирование динамики формирования металлоструктур на основе перколяционных кластеров с применением методов фрактальной геометрии для количественного описания формирующихся металлоструктур, а также программная реализация перколяционной модели.

В основе работы лежат следующие положения:

- механические и технологические свойства материала определяются его структурой [3];

- структура в нестационарном состоянии обладает фрактальными свойствами;
- пространственная модель (перколяционные кластеры) является фрактальной.

Опираясь на триаду Н.С. Курнакова состав-структура-свойства [3], связь механических свойств и структуры можно записать в виде следующего выражения:

$$P_{mex} = M\{S\}, \quad (1)$$

где  $S = \{s_i\}$  – структура материала,  $M$  – оператор.  $s_i$  – соответствующая структура  $i$ -го сечения ( $s_i \in S$ ),  $i = 1..n$ .

Наличие фрактальных свойств у объектов, порождаемых в неравновесных процессах, к которым без сомнения относится и процесс затвердевания, доказана в ряде работ последнего десятилетия.

Поэтому в терминах пространственной перколяционной модели структура может быть описана как

$$S = P\{Df, E_{xp}\}, \quad (2)$$

где геометрия, а точнее «изрезанность», неравновесность, характеризуется параметрами модели  $Df$  – фрактальная размерность и  $E_{xp}$  – набор критических экспонент перколяционных кластеров. В свою очередь эти параметры характеризуют способ заполнения пространства кластером.

Теория перколяции имеет дело с эффектами случайного распределения взаимосвязанных ячеек в системе [2]. В данной работе основное внимание уделяется пространственной перколяции, наблюдаемой, например, в металлических “фильмах” и пористых кластерах [1, 2]. Простейший пример пространственной перколяции это  $d$ -мерная коробка (решетка) в которую случайным образом «накиданы» два типа шаров: проводящие и изоляторы. При этом ключевым параметром является величина, называемая критическим отношением объемов (critical volume fraction). Как показывают исследования, данная величина, является геометрическим инвариантом. Другой не менее важной геометрической характеристикой пористого кластера, является корреляционная длина:

$$l \sim r(P_c - p)^{\nu} \quad (3)$$

где  $r$  – размер элементов (полиэдры, шары, эллипсоиды),  $\nu$  – критическая экспонента ( $\nu \in Exp$ ),  $p$  – отношение числа проводящих элементов к не проводящим,  $P_c$  – порог перколяции.

Корреляционная длина  $l$  тесно связана с важным для кластера параметром – массой:

$$m \sim l^f, \quad (4)$$

где  $m$  – масса кластера,  $f$  – критическая экспонента ( $f \in Exp$ ), которая для случая  $p=P_c$  всегда меньше евклидовой размерности  $D_E$ . Более того разность  $(D_E - f)$  – это дефицит размерности или соразмерность Хаусдорфа, являющаяся связывающим звеном между теорией фракталов и перколяционными кластерами [2].

Модель, рассматриваемую в работе, можно представить следующим образом:

$$P_{mex} = G\{Exp, Df_{класт}\}, \quad (5)$$

где  $G$  – соответствующий оператор задающий связь между  $Exp$  – набором критических экспонент перколяционной системы, которые вычисляются аналитически и  $Df_{класт}$  – фрактальной размерностью перколяционного кластера, которая в свою очередь является технической характеристикой и служит для проверки адекватности модели, определяющий  $P_{mex}$  – механические свойства объекта.

Процедура проверки адекватности требует дополнительного объяснения. Несмотря на возможность генерировать 3D объекты с помощью модели перколяционного процесса, по-прежнему остается крайне трудной задачей сравнения их (и по какому критерию) с соответствующим реальным 3D структурообразованием, так как «извлечь» его в чистом виде невозможно.

Предлагается исследовать данный объект по его сечениям, как схематично показано на рисунке 1. Для этого вычисляются фрактальные размерности выходных сечений модели, и реальных объектов вычисляется фрактальная размерность  $Df_{mod}$ ,  $Df_{real}$ . Тогда их разность и определяет степень адекватности модели следующим образом:

$$|Df_{mod} - Df_{real}| < \varepsilon \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  – наперед заданная точность настройки модели, которая показывает адекватность модели.

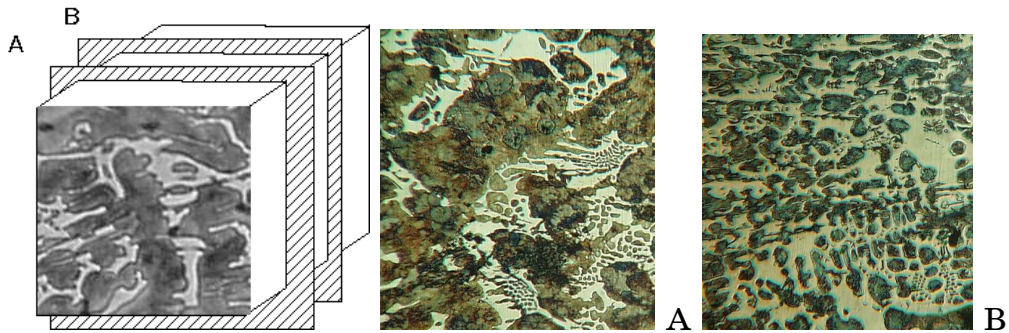


Рисунок 1 – Структура перколяционных кластеров: А и В – соответствующие сечения

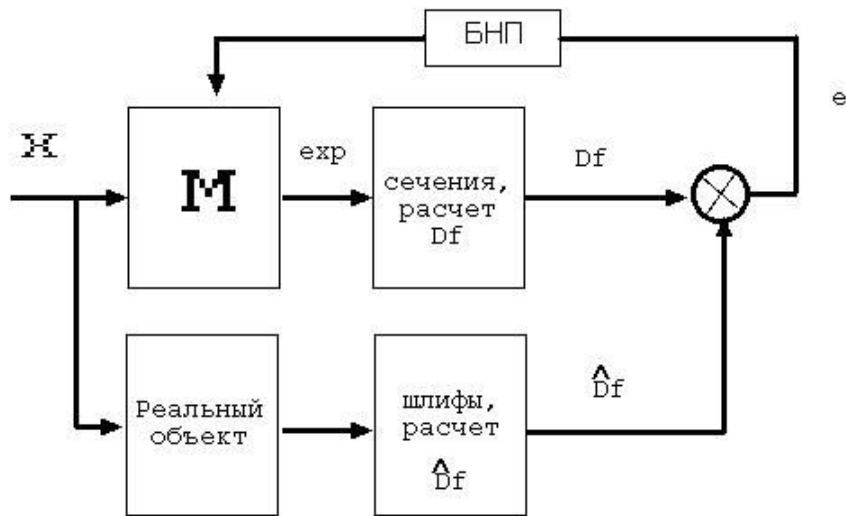


Рисунок 2 – Структура системы фрактальной идентификации объектов, БНП – блок настройки коэффициентов модели

### Геометрическая интерпретация перколяционного кластера в 3D

Компьютерное моделирование динамики роста перколяционного кластера проводилось с использованием среды Borland Builder 6.0 с использованием библиотеки OpenGL.

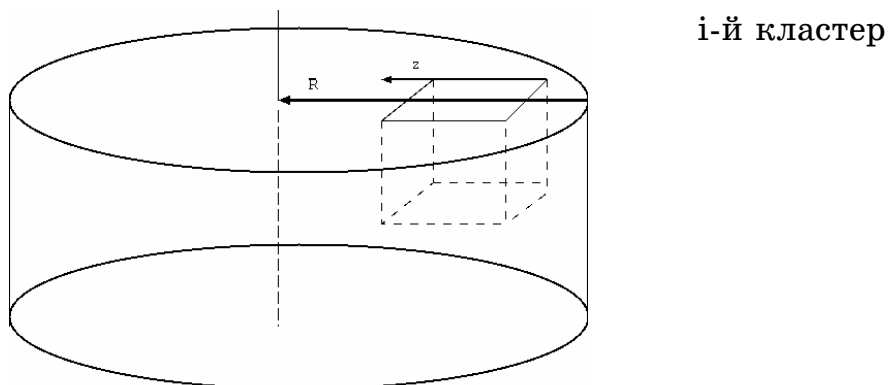


Рисунок 3 – Геометрическое представление перколяционной структуры отливки ( $R$  – радиус отливки,  $z$  – направление затвердевания)

**Модель динамики роста перколяционного кластера**

Входные данные модели:

$$X = Y [h, L, Pc], \quad (7)$$

где  $h$  - вероятности заполнения ячеек,  $L$  - расстояние между шлифами (сечениями),  $Pc$  - порог перколяции.

Выходные данные модели:

$$F[S] = \langle s, l, Df \rangle \quad (8)$$

Результаты выполнения программы.

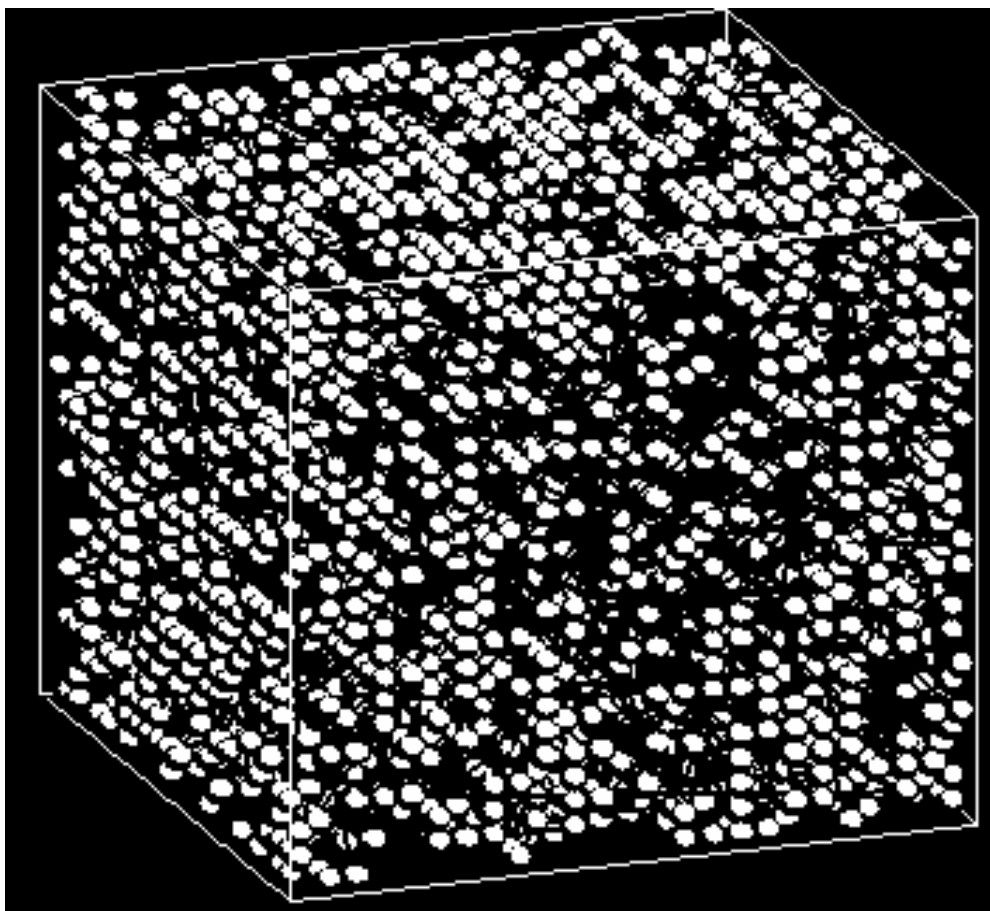


Рисунок 4 – Пример 3D суперкластера с параметрами:  $Pc=0.48$ ,  $L=0.02$ ,  $h$  – вероятность заполнения ячеек определяющаяся по экспоненциальному закону



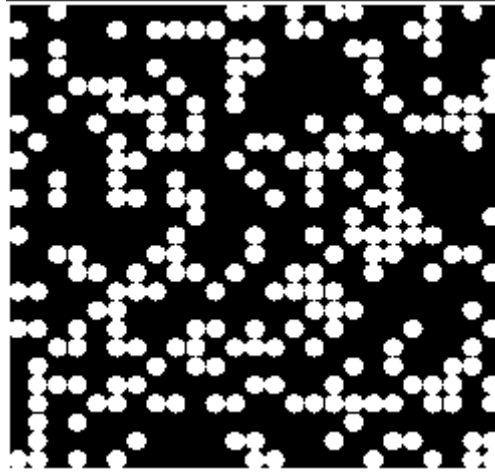


Рисунок 5 – Шлиф 1

Результаты моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Смоделированные перколяционные параметры системы

Номер шлифа	$P_c$	$L_{max}$	$D_{mod}$	$D_{mod}'$	$\varepsilon, \%$	$S_{mod}$
Шлиф 1	0.48	0.6	1.67501	1.769957	5,4	227
Шлиф 2		0.6	1.67181	1.745348	4,2	230
Шлиф 3		0.62482	1.68066	1.716689	2.1	234
Шлиф 4		0.678823	1.70457	1.785469	4.5	236
Шлиф 5		0.62482	1.67353	1.786575	6.3	241
Шлиф 6		0.6	1.6604	1.764879	5.9	241
Шлиф 7		0.678823	1.6996	1.791701	5.1	241
Шлиф 8		0.678823	1.69862	1.782650	4.7	242
Шлиф 9		0.555698	1.62669	1.723006	5.6	249
Шлиф 10		0.678823	1.68996	1.779335	5	251
Шлиф 11		0.651153	1.66939	1.801766	7.3	259
Шлиф 12		0.651153	1.66301	1.824019	8.8	266

Разработанная программа имеет следующие особенности:

- используются различные законы распределения, заполнения ячеек для шлифов, расположенных на различных расстояниях от оси модельного объекта;
- имеется возможность выделения отдельного сечения (шлифа), которые можно сохранить в файл, для расчета фрактальной размерности;
- программа рассчитывает корреляционные длины и массы полученных пространственных кластеров.

Вывод. Построена 3D модель перколяционных кластеров отображающих динамику роста металлоструктур, применены методы фрактальной геометрии для проверки адекватности моделирования.

Исследован процесс затвердевания металлических материалов и связь фрактальных характеристик со структурой. Установлена связь фрактальных и перколяционных характеристик (параметров) материала (структуры). Предложен подход к моделированию динамики роста металлоструктур на основе перколяционного кластера в 3D объекте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. М.:Наука, 1991.- 136 с.
2. Wu J. Introduction to Percolation Theory // <http://socrates.berkeley.edu/~jqwu/>
3. Куликов Д.В., Мекалова Н.В., Закирничная М.М. Физическая природа разрушения// <http://www.mahr.oil.ru>, 1999.
4. Федер Е. Фракталы. // Пер. с англ.- М.- Мир, 1991.- 260 с.
5. Козлов Э.В., Тришкина Л.И. //Эволюция дислокационной структуры, упрочнения и разрушения сплавов. Томск: Изд-во Томского Университета, 1992.
6. Михалев А.И., Деревянко А.И., Помулев В.В. Фрактальное оценивание зернистости металлоструктур // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (10) – Днепропетровск. 2000. с. 104-112.
7. Михалев А.И., Деревянко А.И., Помулев В.В. Применение методов фрактальной геометрии для анализа металлоструктур // Вестник ХГТУ. – 2001. - № 3(12). – с. 178-180.
8. Михалев А.И., Помулев В.В. Вопросы геометрического моделирования структур металлических материалов на основе перколяционных кластеров. //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 3 (44). – Днепропетровск, 2006. – С. 31 – 34.

Получено 23.04.2007 г.

УДК 621.63: 621.51

В.В. Гоцуленко, В.Н. Гоцуленко, О.В. Дубина, В.И. Романенко,  
А.В. Садовой, Р.К. Стасевич, Н.Т. Тищенко**К ПРОБЛЕМЕ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПОМПАЖА  
ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ЛОПАСТНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ**

**Введение.** Известно, что причиной продольной неустойчивости работы лопастных нагнетателей является наличие восходящей ветви на напорной характеристике, которая представляет зависимость напора  $F(Q)$  или степени повышения давления  $\pi(Q)$  от объемного расхода  $Q$ . При монотонно убывающей зависимости  $\pi(Q)$  компрессорные машины работают абсолютно устойчиво. Возбуждение автоколебаний (помпажа) в системах, включающих компрессор или турбовоздуходувку, создает различные аварийные ситуации и может привести к разрушению нагнетателя и напорной магистрали.

В практике защиты двухступенчатых турбовоздуходувных нагнетателей, осуществляющих дутье в доменные печи металлургических предприятий, предупреждение помпажа выполняется системой антипомпажной защиты, которая осуществляет сброс сжатого воздуха из напорной магистрали в атмосферу при уменьшении расхода холодного дутья, вызванного снижением проницаемости шихты при ее уплотнении или оплавлении, и приближением нагнетателя к границе устойчивости. Расход воздуха через нагнетатель при этом возрастает и рабочий режим смещается в область больших подач, что обеспечивает устойчивую работу системы.

Наличие между ступенями двухступенчатой воздуходувки упругости промежуточного трубопровода сужает границу области ее устойчивости [1]. При этом оказываются ограниченными возможности расширения области устойчивой работы нагнетателя [2] путем перепуска воздуха. Следует отметить, что защита компрессорной машины от помпажа путем сброса сжатого воздуха, обогащенного кислородом, в атмосферу обуславливает многомиллионные экономические потери на каждой доменной печи, поэтому весьма актуальным является отыскание способов

обеспечения устойчивости работы воздуходувки, не требующих сброса сжатого воздуха в атмосферу.

**Постановка задачи.** Проточный канал рабочих колес центробежных нагнетателей и спиральных отводящих устройств является диффузорным. Особенностью таких каналов является образование отрывных течений, порождающих вихреобразование в потоке при снижении расхода. Кроме того, в рабочих колесах при этом образуется торовый вихрь, который получает энергию от вращающегося колеса и передает ее подсосываемой среде, которая закручивается [3].

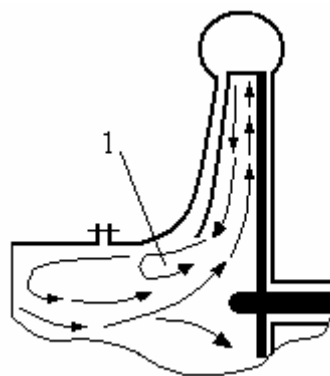


Рисунок 1 - Схема образования торового вихря в рабочем колесе центробежного нагнетателя, где 1- область торового вихря

С уменьшением подачи интенсивность вихревых движений и их обилие возрастают. Поэтому гидравлические потери в рабочем колесе и отводящем устройстве центробежного нагнетателя, достигнув минимального значения при безотрывном течении, с образованием отрывных вихревых движений и дальнейшим уменьшением расхода возрастают. При этом образуется нисходящая ветвь зависимости гидравлических потерь  $h_c(Q)$  [4], которая порождает восходящую ветвь  $F(Q)$  напорной характеристики нагнетателя, что составляет необходимое условие помпажа [2], где  $Q$  - объемный расход на входе в нагнетатель.

Для предотвращения образования нисходящей ветви гидравлических потерь  $h_c(Q)$  следует уменьшать объемы рабочего колеса [5] и отводящих устройств [6-8] в соответствии со снижением подачи. Выравнивание завала напорной характеристики  $\pi(Q)$  можно также осуществить регулируемым увеличением диаметра лопастей на выходе из колеса, подкруткой по периферии потока на входе в нагнетатель эжектирующими струями [9] или внедрением в него

закручивающих лопастей. При этом необходимым является осуществление определенных конструктивных изменений, т.е. вмешательство собственно в конструкцию нагнетателя.

Существуют также способы динамического демпфирования в системах с двумя степенями свободы, основанные на подключении резонансного акустического поглотителя колебаний [2] или перепуске воздуха с нагнетания на всасывание с отбором накопленной в нем энергии. В этом случае вмешательство в конструкцию нагнетателя практически отсутствует, а потери энергии на производство дутья существенно снижаются.

Исследование областей устойчивости компрессорных установок традиционно осуществлялось на основе анализа распределения корней характеристического уравнения линеаризованной системы [1-2]. Для построения периодических решений нелинейных уравнений движения применялись геометрические методы, отличающиеся трудоемкостью и ограниченной точностью. Применение персональных компьютеров в сочетании с разработанными аналитическими и конечно-разностными методами моделирования [10] позволяет сравнительно легко определить форму автоколебаний в системе подачи холодного дутья, построить предельные циклы и определить эффективность тех или иных воздействий, препятствующих возникновению помпажа. Задачей настоящего исследования является определение возможности осуществления и эффективности антипомпажной защиты двухступенчатого доменного воздушного компрессора без сброса обогащенного кислородом холодного дутья в атмосферу.

**Результаты исследований.** Схему двухступенчатой компрессорной машины, рассматриваемую в работах [1-2], дополним управляемыми объемами, расположенными на выходе каждой ступени нагнетателя (рис.2).

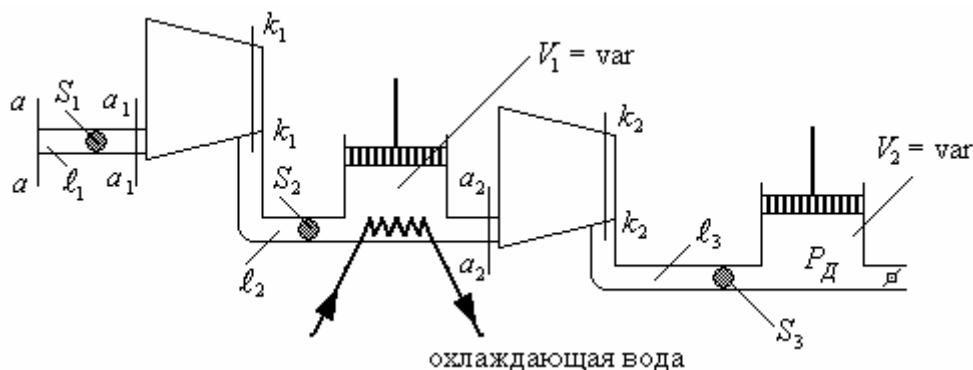


Рисунок 2 - Схема двухступенчатого компрессора с дополнительными управлениями объемами на выходе каждой ступени

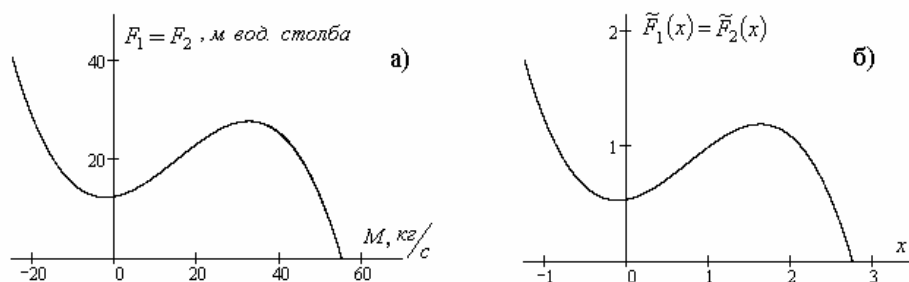


Рисунок 3 - Напорные характеристики ступеней компрессора а) и б) приведенные к безразмерному виду, используемые при моделировании явления помпажа,  $i$  - номер ступени,  $P_o$  - давление на входе в компрессор

В уравнениях динамики пневмосистемы, включающей двухступенчатый компрессор, напорные характеристики  $F_i(M) = [\pi_i(M) - 1]P_o$  ( $i = \overline{1,2}$ ) (рис.3) отдельных ступеней удобно представлять [2] как функции массового расхода  $M$ . Представив характеристику приключенной магистрали общей зависимостью  $P_D = h_c(M_D)$ , систему уравнений движения запишем в виде [2]:

$$\begin{cases} L_{a1} \frac{dM_1}{dt} = F_1(M_1) - P_{a2}, \\ C_{a1} \frac{dP_{a2}}{dt} = M_1 - M_2, \\ L_{a2} \frac{dM_2}{dt} = F_2(M_2) - P_D + P_{a2}, \\ C_{a2} \frac{dP_D}{dt} = M_2 - M_D, \\ P_D = k_D \cdot M_D^2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $L_{a1} = \frac{\ell_2}{S_2} + \frac{\pi_1 \ell_1}{S_1}$ ,  $\pi_1$  - степень повышения давления в первой ступени компрессора,  $C_{a1} = \frac{S_2 \ell_2}{c_1^2}$ ,  $L_{a2} = \frac{\ell_3}{S_3}$ ,  $C_{a2} = \frac{S_3 \ell_3}{c_2^2}$ ,  $c_1 \cong c_2$  - скорость распространения звука в потоках на входе соответствующих ступеней,  $\pi_2$  - степень повышения давления во второй ступени компрессора [2],  $M_i$  - соответствующие массовые расходы,  $P_{a2}$  - давление в напорной емкости перед входом во вторую ступень,  $P_D$  - давление перед дросселем на входе в приключенную магистраль.

Рассматривая стационарное решение системы (1), получим:

$$\begin{cases} M_1 = M_2 = M_D = \xi, \\ P_{a2} = F_1(\xi) \\ k_D = \frac{F_1(\xi) + F_2(\xi)}{\xi^2}, \\ P_D = k_D \cdot \xi^2, \end{cases}$$

или делая замену:  $x = \frac{M_1}{\xi}$ ,  $y = \frac{P_{a2}}{F_1(\xi)}$ ,  $X = \frac{M_2}{\xi}$ ,  $Y = \frac{P_D}{F_1(\xi) + F_2(\xi)}$ ,  $t = \frac{\tau}{\tau_o}$ ,

приведем систему (1) к безразмерному виду:

$$\begin{cases} \tilde{L}_{a1} \frac{dx}{d\tau} = \tilde{F}_1(x) - y, \\ \tilde{C}_{a1} \frac{dy}{d\tau} = x - X, \\ \tilde{L}_{a2} \frac{dX}{d\tau} = \tilde{F}_2(X) - (1 + \chi)Y + y, \\ \tilde{C}_{a2} \frac{dY}{d\tau} = X - \sqrt{Y}, \end{cases} \quad (2)$$

где обозначено:  $\tilde{L}_{a1} = \frac{\tau_o \xi}{F_1(\xi)} L_{a1}$ ,  $\tilde{C}_{a1} = \frac{\tau_o F_1(\xi)}{\xi} C_{a1}$ ,  $\tilde{L}_{a2} = \frac{\tau_o \xi}{F_1(\xi)} L_{a2}$ ,

$$\tilde{C}_{a2} = \frac{\tau_o (F_1(\xi) + F_2(\xi))}{\xi} C_{a2}, \quad \tilde{F}_1(x) = \frac{F_1(\xi \cdot x)}{F_1(\xi)}, \quad \tilde{F}_2(x) = \frac{F_2(\xi \cdot X)}{F_1(\xi)}, \quad \chi = \frac{F_2(\xi)}{F_1(\xi)}.$$

Далее всюду значение стационарного расхода  $\xi = 20 \frac{\text{кг}^2}{\text{с}}$  и  $\tau_o = 1 \text{с}$ .

На рисунке 4 изображены предельные циклы и формы автоколебаний  $y(\tau)$  и  $Y(\tau)$  в колебательных контурах системы (2), рассчитанные при одинаковых акустических параметрах исходной системы (1), т.е.  $L_{a1} = L_{a2}$  и  $C_{a1} = C_{a2}$ .

Если изменяется только величина  $C_{a2}$ , то предельные циклы и формы колебаний  $x(\tau)$  и  $y(\tau)$  в колебательном контуре первой ступени не изменяются.

Изменяющиеся формы колебаний контура второй ступени с уменьшением значений  $C_{a2}$  представлены на рисунке 5, а с увеличением значений  $C_{a2}$  - на рисунке 6. При этом происходит изменение предельных циклов и форм колебаний, которые приобретают на определенном отрезке стохастический характер. Это связано с тем, что аттрактор колебательного контура второй ступени имеет стохастическую структуру. Такое типичное явление наблюдается в динамических системах с несколькими степенями свободы [11], что следует учитывать, реализуя соответствующие динамические воздействия на колебания с целью снижения их амплитуды.

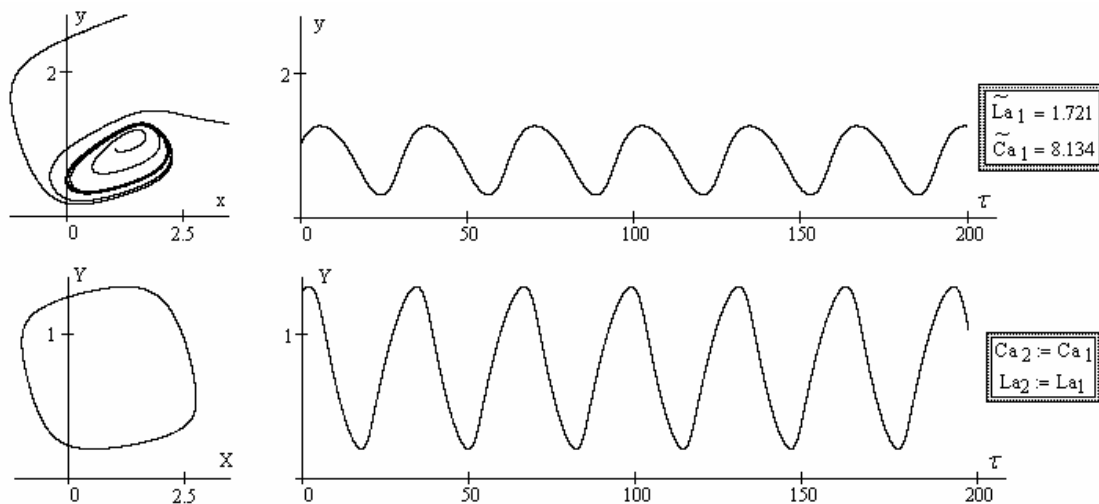


Рисунок 4 - Предельные циклы и формы автоколебаний  $y(\tau)$  и  $Y(\tau)$  в колебательных контурах системы, включающих двухступенчатую воздуходувку



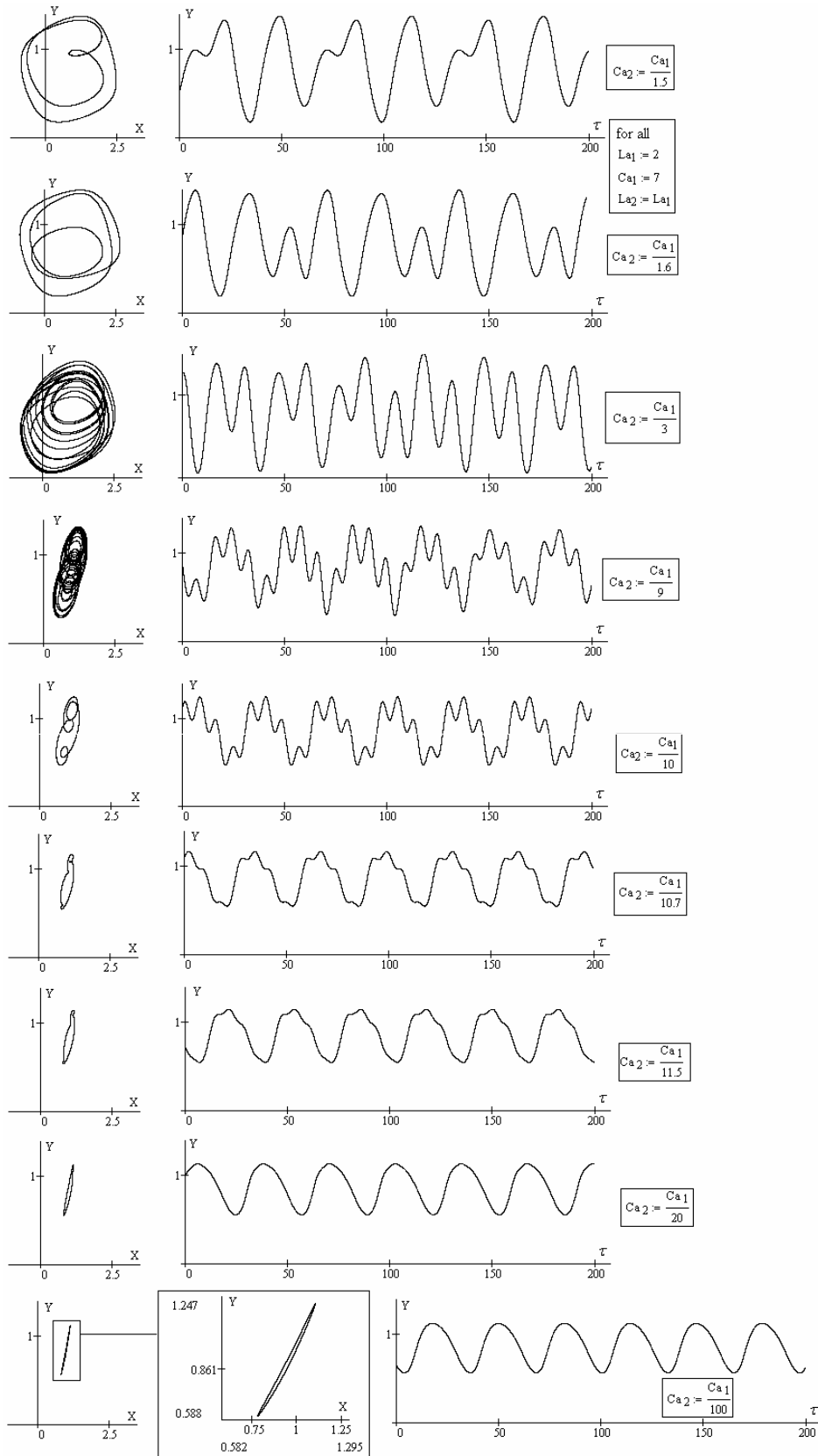


Рисунок 5 - Изменение предельных циклов и форм колебаний  $Y(\tau)$ , во втором колебательном контуре системы при уменьшении акустической гибкости  $C_{a2}$

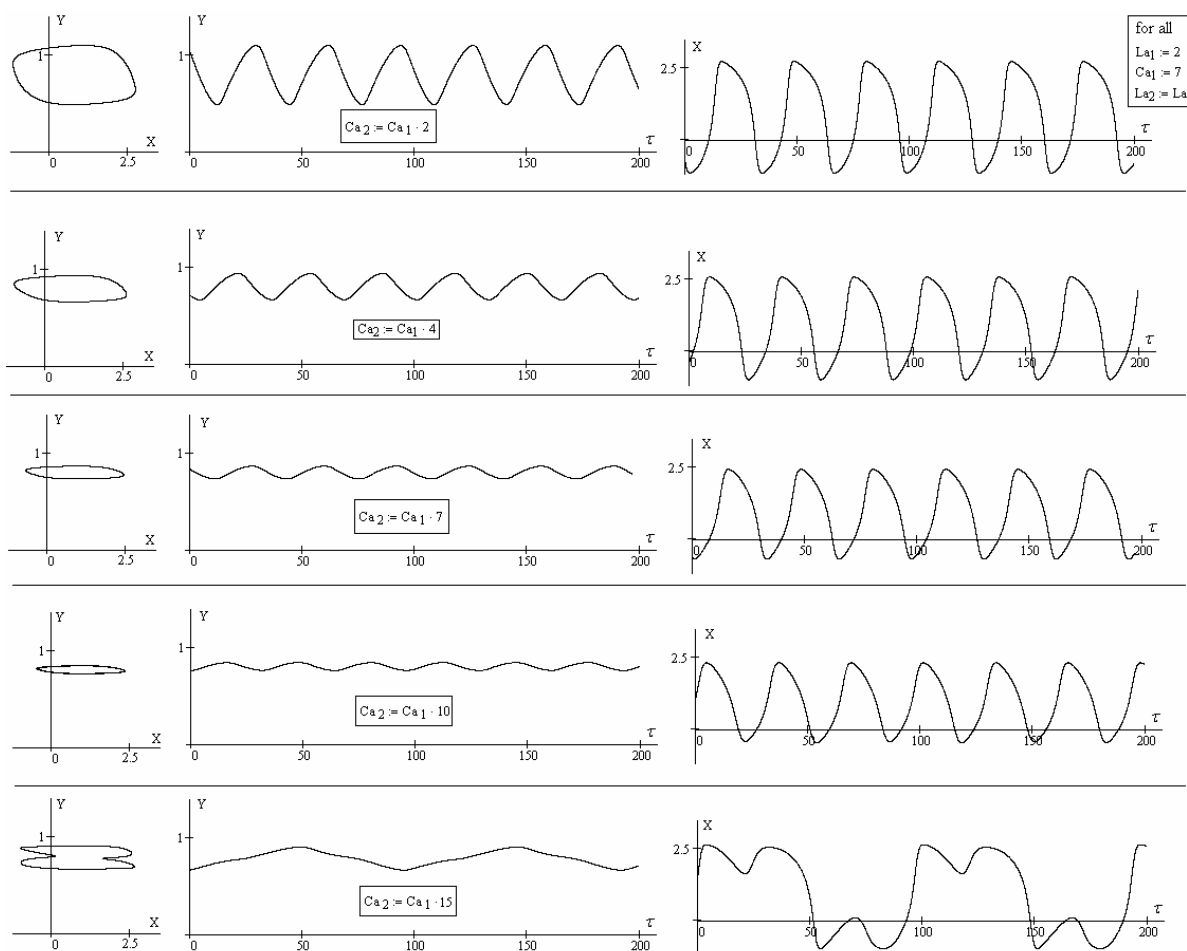


Рисунок 6 - Формы релаксационных автоколебаний  $Y(\tau)$  и  $X(\tau)$  во втором колебательном контуре при увеличении его акустической гибкости  $C_{a2}$  когда  $C_{a1} = idem$

При изменении акустической гибкости первого колебательного контура  $C_{a1} = var$  и неизменной второго контура  $C_{a2} = idem$  имеет место одновременное изменение, как предельных циклов, так и форм колебаний в обоих колебательных контурах лопастной компрессорной машины. Причем эти изменения имеют место как с увеличением значений  $C_{a1}$ , так и с их уменьшением.

С уменьшением акустической гибкости  $C_{a1}$  колебания в первом колебательном контуре (рисунке 7) становятся гармоническими, их амплитуды уменьшаются и затем они исчезают. Колебания во втором контуре также приобретают гармонический характер, и амплитуда их несколько уменьшается.

С увеличением акустической гибкости  $C_{a1}$  автоколебания в первом колебательном контуре нагнетателя становятся

релаксационными, а затем релаксационными с неизменной амплитудой колебаний. Колебания во втором колебательном контуре приобретают стохастический характер и переходят в неизменные как по амплитуде, так и по форме, что изображено на рисунке 7.

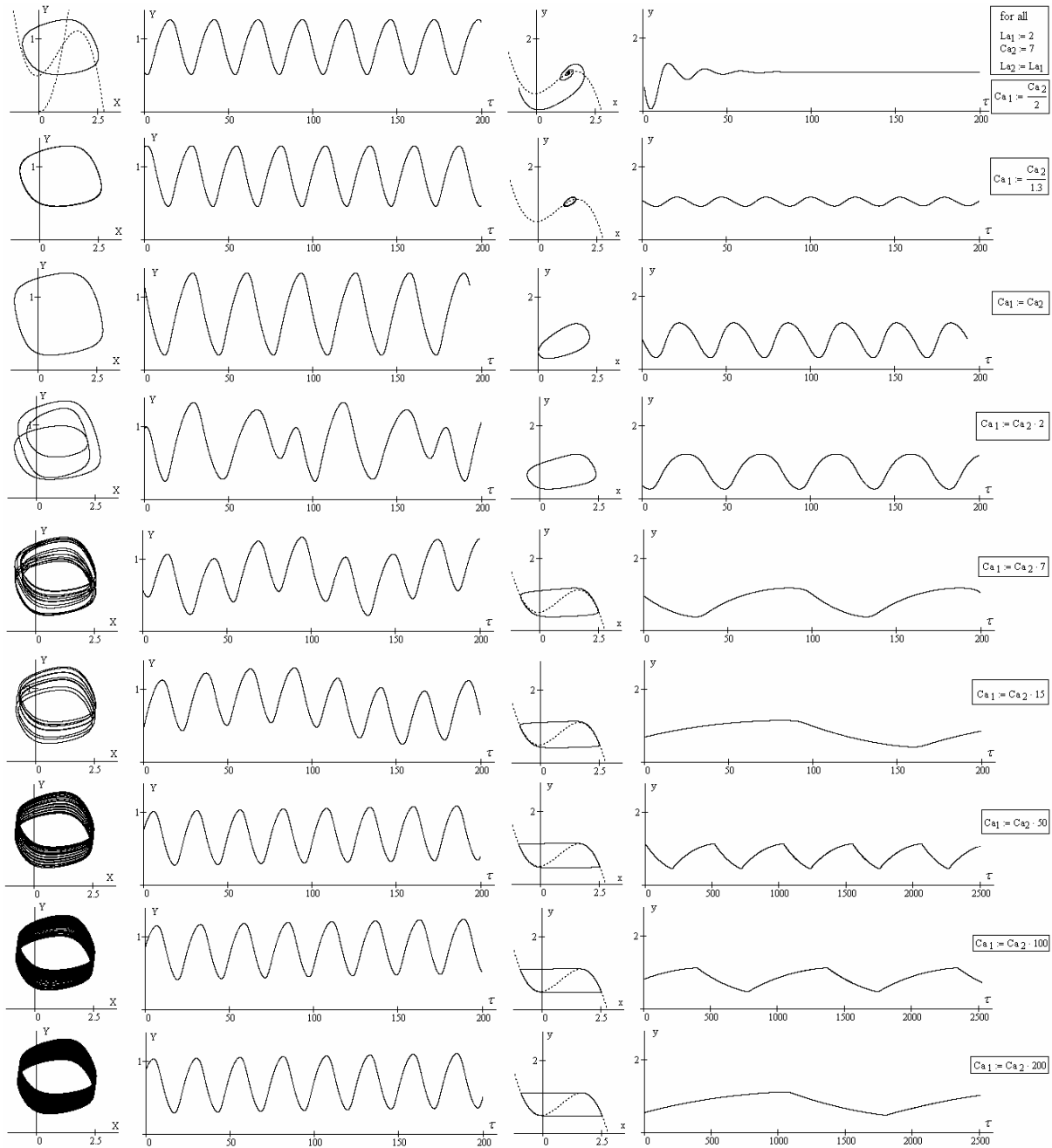


Рисунок 7 - Характер изменения циклов и автоколебаний  $y(\tau)$  и  $Y(\tau)$  в колебательных контурах двухступенчатого нагнетателя при изменении величины  $C_{a1}$

Таким образом, выполненные исследования показывают, что практически невозможно определить параметры сети, при которых устраняются автоколебания в системе компрессор-сеть.

Одним из возможных способов антипомпажной защиты без выброса в атмосферу обогащенного кислородом воздуха, является его перепуск с нагнетателя второй ступени на всасывание первой.

На рисунке 8 представлена такая схема, в которой при снижении потребления расхода дутья доменной печью воздух с нагнетателя второй ступени компрессора направляется на всасывание первой ступени через турбину вращающую электрогенератор.

Следовательно, утилизируется энергия избыточного количества сжатого воздуха и снижается его температура, что помимо предотвращения его выброса в атмосферу позволяет повысить энергетическую эффективность системы.

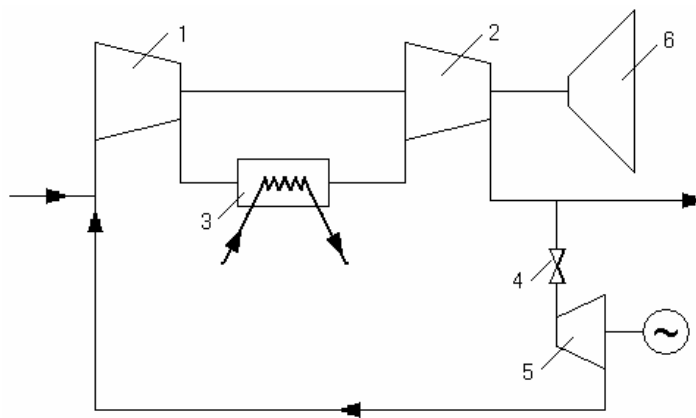


Рисунок 8 - Схема двухступенчатого компрессора, с наполнением его проточных каналов при снижении подачи воздухом, перепускаемым из напорной магистрали, в которой: 1- первая ступень, 2- вторая ступень компрессора, 3- выносное охлаждение сжатого воздуха, 4- исполнительный управляемый регулятор, 5- воздушная турбина с электрогенератором, отбирающая напор от перепускаемого расхода, 6- привод нагнетателя

Определим КПД системы при перепуске (рециркуляции) воздуха без использования турбины 5, когда его значения  $\eta_1$  и с ее применением, когда значение КПД  $\eta_2$ .

Полезная мощность:

$$N_{\Pi} = N_{\epsilon} \eta_{\max} - N_{\text{отв}} \quad (3)$$

где  $N_{\epsilon} \eta_{\max}$  - мощность передаваемая компрессором потоку при максимальном его КПД  $\eta_{\max}$ ,  $N_{\text{отв}}$  - отводимая мощность, которая либо отводится от перепускаемого потока в охлаждающем устройстве для снижения его температуры, либо при расширении в турбине с возвратом не используемой энергии из-за снижения потребляемого расхода.

При отсутствии турбины 5 в системе (рис.8) ее КПД равен:

$$\eta_1 = \frac{N_{\epsilon} \eta_{max} - N_{ome}}{N_{\epsilon}} \quad (4)$$

а в случае ее применения:

$$\eta_2 = \frac{N_{\epsilon} \eta_{max} - N_{ome}}{N_{\epsilon} - N_{ome} \eta_T} \quad (5)$$

Зависимости (4) и (5) представим как функции:  $\frac{N_{ome}}{N_{\epsilon}}$

$$\begin{cases} \eta_1 = \eta_{max} - \frac{N_{ome}}{N_{\epsilon}} \\ \eta_2 = \frac{\eta_{max} - \frac{N_{ome}}{N_{\epsilon}}}{1 - \eta_T \frac{N_{ome}}{N_{\epsilon}}} \end{cases} \quad (6)$$

Представим в виде графического их изображения, когда  $\eta_{max} = 0,9$  и ряда значений  $\eta_T$ , КПД турбины.

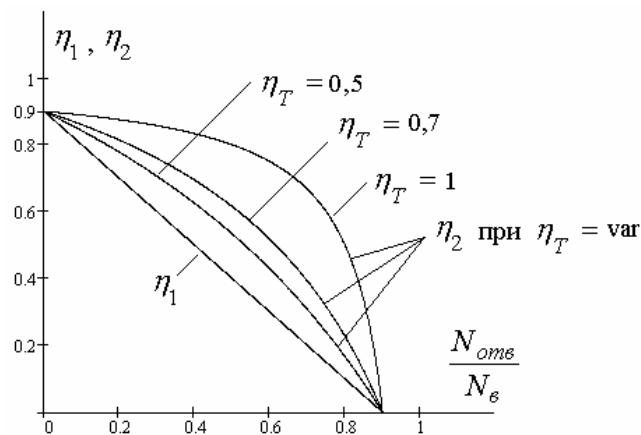


Рисунок 9 - Зависимости кпд  $\eta_1$  и  $\eta_2$  при перепуске расхода из напорной магистрали и сохранении режима компрессора, соответствующего максимальному значению его КПД

### Выводы

2. Обобщены способы воздействия на автоколебания, имеющие характер помпажа, обоснована его природа. Это позволило выбрать способ защиты двухступенчатого компрессора с применением рециркуляции воздуха при малых подачах.
3. Определены формы колебаний и закономерности их изменения при варьировании акустических параметров системы, включающей двухступенчатый лопастной нагнетатель. Это позволяет создать способы управления величиной их амплитуды.

Иллюстрировано образование предельного цикла как неизменной амплитуды, так и неизменной формы колебаний.

4. Представлена иллюстрация изменения КПД системы защиты от помпажа при рециркуляции потока наполняющего компрессор, когда снижается его подача, как с утилизацией энергии потока, так и при ее отсутствии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ронжин О.В. К теории помпажа в двухступенчатом компрессоре // Труды ЛК ВВИА им. Можайского, 1958, вып.204, с.25-52.
2. Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах. М.: Машиностроение, 1974, 264 с.
3. Поликовский В.И., Левин А.А. Исследование работы насосов и воздуходушных машин на режимах пониженных подач // Теплоэнергетика 1966, №3, с.49-53.
4. Шерстюк А.Н. Насосы, вентиляторы, компрессоры. М.: Высшая школа, 1972, 342 с.
5. А.с. 1665089 СССР, F04D 15/00. Центробежный насос.
6. Деклараци́нный патент на корисну модель 2004031871 Україна, F04D 17/00.Одноступеневий відцентровий компресор.
7. Деклараци́нный патент на корисну модель 20040806848 Україна, F04D 1/06. Одноступеневий відцентрований компресор.
8. J.T. Gravdahl Modeling and Control of Surge and Rotation Stall in Compressors. Report 98-6-W Department of Engineering Cybernetics Norwegian University of Science and Technology N-7034 Trondheim, Norway, 1998.
9. Гоцуленко В.В., Гоцуленко В.Н. К проблеме устойчивости лопастных насосов при малых величинах кавитационного запаса // Научные труды Дон НТУ, вып.51, сер. Горно-электромеханическая, 2002, с.64-68.
10. Гоцуленко В.В. Математическое моделирование особенностей феномена Рийке при изменении мощности теплового потока // РАН, Математическое моделирование, 2004, т.16,№9, с.23-28.
11. Фейгенбаум М. Универсальность в поведении нелинейных систем // Успехи физических наук, 1983, т.11, вып.2. с.343-374.

Получено 30.03.2007 г.

УДК 539.3

Д.Г. Зеленцов, О.А. Радуль, Л.И. Короткая

## АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ФОРМУЛ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТЕРЖНЕВЫХ КОРРОДИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

**Введение.** При решении задач напряженно-деформированного состояния (НДС), долговечности и оптимального проектирования многоэлементных конструкций, работающих в условиях коррозионного износа, традиционно применяется подход, основанный на совместном использовании какого-либо численного метода решения задачи НДС и численного метода решения задачи Коши для системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс коррозионного воздействия. Обычно для решения задачи НДС используется метод конечных элементов (МКЭ). К недостаткам известных алгоритмов, основанных на использовании МКЭ, следует отнести невысокую эффективность и невозможность оценки погрешности вычислений.

В качестве модели, описывающей коррозионный износ, принимается модель, в которой скорость коррозии линейно зависит от уровня механических напряжений [1]:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0(1 + k\sigma_i); \quad \delta_i|_{t=0} = 0; \quad i = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Здесь  $\delta_i$  и  $\sigma_i$  – глубина коррозии и напряжение в  $i$ -м элементе соответственно;  $v_0$  – скорость коррозии при отсутствии напряжений;  $k$  – коэффициент, учитывающий влияние напряжений на скорость коррозии.

Ранее для модели коррозионного износа (1) были получены зависимости долговечности стержневого элемента произвольного сечения, подверженного коррозионному износу, в аналитическом виде [2]:

$$t = t_0 - 2kQ \left[ \operatorname{arctg} \frac{2a\delta + b}{d_1} - \operatorname{arctg} \frac{b}{d_1} \right] \frac{1}{v_0 d_1} \quad (2)$$

$$t = t_0 - 2kQ \ln \left[ \frac{(2a\delta + b - d_2)(b + d_2)}{(b - d_2)(2a\delta + b + d_2)} \right] \frac{1}{v_0 d_2} \quad (3)$$

Так как в статически определимой конструкции не происходит перераспределения внутренних усилий в элементах (они определяются из уравнения равновесия), то точное решение задачи долговечности может быть получено непосредственно из аналитических уравнений, определяющих долговечность в растянутых или сжатых стержнях произвольного поперечного сечения. Эти аналитические формулы используются также для приближенной оценки долговечности статически неопределимых конструкций. В (2) и (3) приняты следующие обозначения:  $Q$  – осевая нагрузка;  $s$  – коэффициент формы сечения;  $P_0$  и  $F_0$  – соответственно периметр и площадь сечения в начальный момент времени. В зависимости от формы поперечного сечения стержня ( $s = \pi$  для круглого сечения и  $s = 4$  для фасонных профилей), а также от требуемой точности, возможны различные варианты решения.

Здесь также  $t_0 = \frac{\delta}{v_0}$ ;  $a = s$ ;  $b = -P_0$ ;  $c = F_0 + kQ$ . Тогда дискриминанты

$d_1 = \sqrt{4ac - b^2}$  и  $d_2 = \sqrt{b^2 - 4ac}$  запишутся следующим образом:

$d_1 = \sqrt{4s(F_0 + kQ) - (-P_0)^2}$  и  $d_2 = \sqrt{(-P_0)^2 - 4s(F_0 + kQ)}$  соответственно.

Решение (2) реализуется при  $4ac - b^2 > 0$ , решение (3) – при  $4ac - b^2 < 0$ .

В процессе решения задачи долговечности в зависимости от текущих значений геометрических размеров сечений элементов и напряжений, возникающих в них, знак дискриминанта может изменяться. Такая возможность была предусмотрена и, для ее реализации были получены аналитические зависимости для данных случаев. Однако, если в какой-то текущий момент времени происходит смена знака дискриминанта, то это означает, что в данной точке происходит некий «скачок», то есть переход от одной аналитической зависимости к другой. Возникает вопрос о том, какой будет погрешность решения задачи долговечности, если не учитывать возможность такого скачка. Целью данной работы является определение такой погрешности.

В полученных формулах значение времени определяется через значение глубины коррозии  $\delta$ , соответствующее моменту исчерпания несущей способности стержня, которое заранее неизвестно. Для



растянутого стержня значение  $\delta$  определяется из решения квадратного уравнения:

$$s\delta^2 - P_0\delta + F_0 - \frac{Q}{[\sigma]} = 0 \quad (4)$$

для сжатого – из решения нелинейного уравнения вида:

$$\frac{QL^2}{\pi^2 E} = I_{min}(\delta, t) \quad (5)$$

где  $I_{min}(\delta, t)$  – значение минимального момента инерции, соответствующего моменту потери устойчивости стержня;  $L$  – длина стержня;  $E$  – модуль упругости.

В данной работе с целью изучения общих закономерностей поведения функций, описывающих известные аналитические зависимости (2) и (3), предлагается постановка задачи, где в качестве модели рассматривается стержень, нагруженный в осевом направлении силой  $Q$  и находящийся в агрессивной среде, вызывающей изменение его площади сечения. Для определенности предполагается, что стержень имеет кольцевое поперечное сечение, а коррозионный износ описывается уравнением (1).

Параметры стержня и механические характеристики его материала полагаем известными: площадь сечения  $F_0 = 20 \text{ см}^2$ , коэффициент слитности  $\eta = \frac{P_0}{F_0} = 0,8 \text{ см}^{-1}$  (отношение значения периметра к значению площади сечения в начальный момент времени); предельное значение напряжений  $[\sigma] \leq 1250 \text{ МПа}$ . Величина приложенной нагрузки  $Q = 5000 \text{ кг}$ . Параметры агрессивной среды:  $v_0 = 0,1 \text{ см/год}$ ;  $k = 0,0003 \text{ МПа}^{-1}$ .

Условия эксплуатации стержня таковы, что коррозии подвергается как внешняя, так и внутренняя поверхность стержня. Долговечность проекта при шаге по времени  $\Delta t = 0,001$  составила  $t = 15,34 \text{ лет}$ . На рис.1 представлена зависимость текущих значений напряжений от времени в постановке, используемой ранее, которая учитывает изменение знака дискриминанта. Здесь точка  $A(0,665; 264,971)$  – это точка, в которой значение дискриминанта квадратного уравнения изменилось с отрицательного на положительное. Таким образом, на интервале  $(0; \tilde{t})$  значение долговечности определяется по формуле (2), а на интервале  $(\tilde{t}; t^*)$  – с

помощью формулы (3). Представляется интересным исследовать особенности поведения функции в окрестности этой точки.

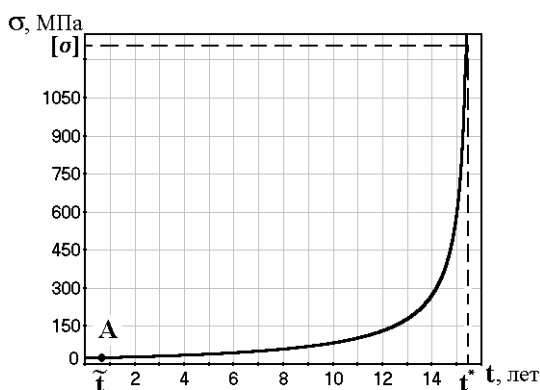


Рисунок 1

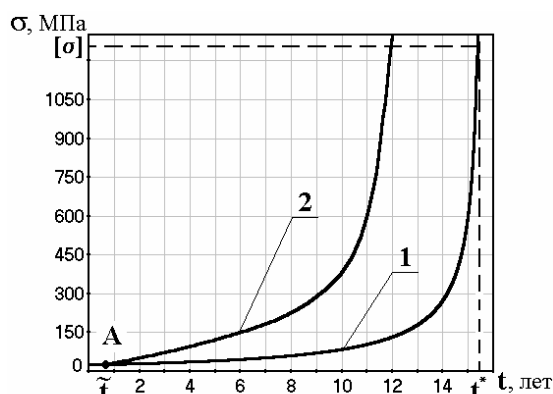


Рисунок 2

Очевидно, что на интервале  $(0; \tilde{t})$  функция изменяется по определенному закону, например, (2). Далее, если в точке  $A$  знак дискриминанта не изменяется, то и функция описывается по тому же закону (кривая 1 (рис. 2)):

$$t_{ii} = f_i(\sigma_i), \quad i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Однако, если в точке  $A$  знак дискриминанта изменился на противоположный, то соответственно, согласно предложенному ранее алгоритму, выбирается и другая расчетная формула (3). А, значит, и функция будет иметь другой качественный вид, например описываемый кривой 2 (рис. 2):

$$t_{2i} = f_2(\sigma_i), \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Таким образом, если происходит смена знака дискриминанта функции следовательно, решение имеет качественное отличие, обусловленное видом функции, то значение долговечности может быть найдено либо приближенно с определенной погрешностью, если графики этих функций будут расположены достаточно близко друг к другу, либо вообще найдено неверно – в противном случае.

Целью работы является исследование решений задачи для установления их возможных качественных и количественных расхождений. Предлагается воспользоваться методикой со сменой параметра интегрирования для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих процесс коррозии. Если ранее интегрирование проводилось по времени, то теперь будем использовать в качестве параметра интегрирования – напряжение.

Рассмотрим две постановки задачи – постановку 1, когда изменение знака дискриминанта не учитывается, и постановку 2, когда эта смена учитывается. В случае постановки 1 текущее значение напряжения на каждом шаге зависит от начального значения напряжения:

$$\sigma_n = f(\sigma_0) \quad (8)$$

Таким образом, определение текущих значений напряжения, а соответственно и времени, проводится от одной начальной точки, как по напряжению, так и по времени. Результаты численных решений в постановке 1 представлены на рис. 3.

Далее рассматривается постановка 2, учитывающая смену знака дискриминанта в точке А. При этом текущие значения напряжения, а, следовательно, и времени на каждом шаге определяются, используя информацию, полученную на предыдущем шаге:

$$\sigma_n = f(\sigma_{n-1}). \quad (9)$$

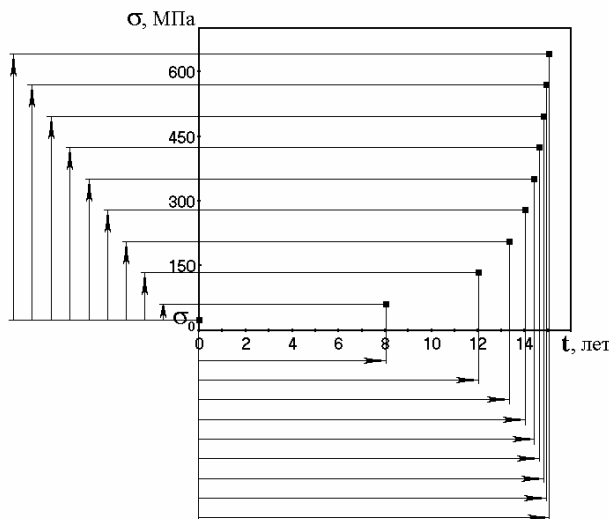


Рисунок 3

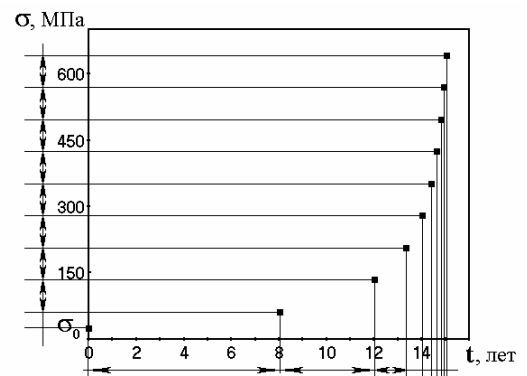


Рисунок 4

В результате численного решения задачи в двух постановках получены следующие результаты. Значения времени до разрушения на каждом шаге интегрирования в постановке 1 и в постановке 2 совпали с точностью до пятого знака после запятой. Эти, на первый взгляд, парадоксальные результаты дают основание предположить, что в области решения задачи рассматриваемые функции (2) и (3) эквивалентны.

С помощью математического аппарата теории катастроф попытаемся выяснить, почему одну и ту же физическую величину

описывают разные функции; исследуем поведение этих функций и возможность перехода от одной функции к другой.

Введем следующие обозначения:

если  $b^2 < ac$ , то функция в обобщенном виде запишется следующим образом:

$$f(\delta) = \operatorname{arctg} \frac{2a\delta + b}{d_1} - \operatorname{arctg} \frac{b}{d_1} \quad (10)$$

в противном случае – если  $b^2 > ac$ , то используем следующую зависимость:

$$g(\delta) = \ln \left[ \frac{(2a\delta + b - d_2)(b + d_2)}{(2a\delta + b + d_2)(b - d_2)} \right] \quad (11)$$

Ввиду того, что результаты расчетов дали абсолютное совпадение значений этих функций, можно сделать вывод, что на каком-то интервале функции  $f(\delta)$  и  $g(\delta)$  качественно подобны.

При рассмотрении данного физического процесса удобно выделить некоторую произвольную систему координат, назовем ее исходной.

В терминах теории катастроф, две функции локально-эквивалентны, если существует локальный диффеоморфизм  $y(\delta)$  такой, что выполняется равенство:

$$g(\delta) = f(y(\delta)) + \gamma, \quad (12)$$

где  $\gamma$  – сдвигающий член, позволяющий вернуться в начало координат исходной системы [3-4].

Согласно определению диффеоморфизма [3] функция  $y(\delta)$  удовлетворяет трем условиям: она гладкая, для нее существует обратная функция, и эта обратная функция гладкая.

Используя это определение и зависимость (12), получим:

$$y(\delta) = \operatorname{tg} \{ \ln[\delta] - \gamma \}. \quad (13)$$

Переход в формуле (12) от  $\delta$  к  $y$  рассматривается, как переход к новым координатам. Здесь  $y$  – гладкая обратимая локальная замена координат, а сдвигающий член  $\gamma$  необходим для того, чтобы вернуть значение функции в нуле к исходному. Понятно, что от него можно избавиться при помощи соответствующего сдвига начала системы координат. Таким образом, с помощью локальной эквивалентности функций можно выразить одну функцию через другую с точностью до константы  $\gamma$ .

В теории катастроф одна из теорем позволяет приводить функции к простому виду, удобному для классификации, с помощью координатных замен. Приведем ее на языке оригинала [3]:

**ТЕОРЕМА 1.** Пусть  $f: R \rightarrow R$  – гладкая функция, для которой  $f(0) = Df|_0 = \dots = D^{k-1}f|_0 = 0$ , но  $D^k f|_0 \neq 0$ . Тогда с помощью некоторой гладкой локальной замены координат ее можно привести к виду:

$x^k$  при нечетном  $k$ ,

$\pm x^k$  при четном  $k$ ,

причем в последнем случае знак совпадает со знаком  $D^k f|_0$ .

Здесь  $D^i f|_0$  – производная  $i$ -го порядка в точке  $0$ , где  $i = \overline{0, k}$ .

В нашем случае функции  $f(\delta)$  и  $g(\delta)$  имеют непростой аргумент  $\delta$ , то есть на самом деле являются сложными функциями (формулы (2) и (3)). В дальнейшем будем использовать обозначения функций  $f(\delta)$  и  $g(\delta)$ , но иметь это в виду. Для удобства использования функции  $f(\delta)$  преобразуем ее к виду:

$$f(\delta) = \operatorname{arctg} \left[ \frac{2a\delta d_1}{d_1^2 + (2a\delta + b)b} \right] \quad (14)$$

Попытаемся найти такую гладкую локальную замену координат с помощью, которой функции  $f(\delta)$  и  $g(\delta)$  представляются посредством степенных функций. Очевидно, что такие функции удовлетворяют условиям теоремы 1:  $Df_{\delta=0} = \frac{2ad_1}{d_1^2 + b^2} \neq 0$  и

$Dg_{\delta=0} = \frac{4ad_2}{b^2 - d_2^2} \neq 0$ , где  $\delta = 0$  – не критическая точка. Следовательно,

можно утверждать, что некоторая гладкая локальная замена координат существует, то есть существует функция  $y(\delta)$ . Тогда, используя определение локально-эквивалентных функций в окрестности какой-либо точки (12), получим представление одной функции через другую:

$$y(\delta) = \operatorname{tg} \left\{ \ln \left[ \frac{(2a\delta + b - d_2)(b + d_2)}{(2a\delta + b + d_2)(b - d_2)} \right] - \gamma \right\} \quad (15)$$

Согласно классификационной теореме Тома [4] семейство функций  $f(\delta)$  будет структурно устойчиво и локально-эквивалентно в окрестности точки  $\delta = 0$  (является не критической и устойчива в том

смысле, что малые возмущения устраняются простой перепараметризацией области определения) канонической форме  $f(\delta) \doteq \delta_1$  (ввиду громоздкости текста теоремы ее полная формулировка не приводится). Здесь знак  $\doteq$  означает «... равно после гладкой замены переменных ...» [3-4]. Аналогично для семейства функций  $g(\delta)$ :  $g(\delta) \doteq \delta_2$ . Очевидно, что аналогичные результаты были получены и с помощью теоремы 1.

Если принять  $(a, b, c)$  за координаты точки в трехмерном пространстве  $(R^3)$  и рассмотреть множество точек поверхности, удовлетворяющих условию  $b^2 = ac$ , то это будет двойной конус (так называемый дискриминантный) с вершиной в начале, содержащей оси  $a$  и  $c$ . Если  $b^2 > ac$  (внешняя поверхность конуса), то расчет проводится с помощью функции (11), в противном случае  $b^2 < ac$  (внутри конуса) – функции (14).

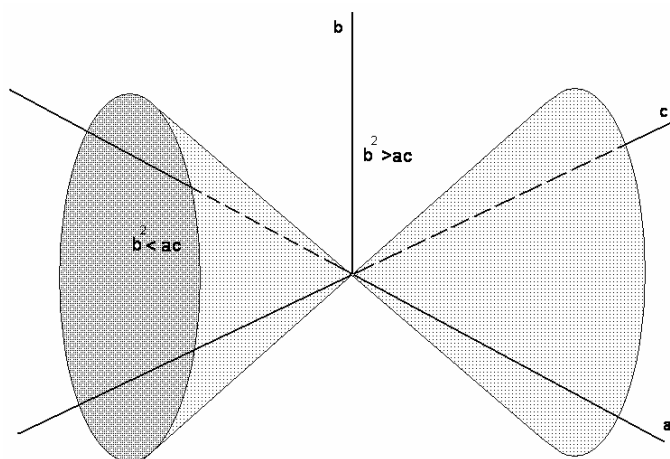


Рисунок 5

Очевидно, что в данном случае конус – это бифуркационное множество, обладающее двойственностью. Когда параметры системы, плавно изменяясь, пересекают поверхность  $b^2 = ac$ , то система скачком переходит из одного состояния устойчивого равновесия в другое. Так как функции эквивалентны, то расчет можно проводить используя одну из них. Тогда может возникнуть вопрос, будет ли точка бифуркации, точнее бифуркационное множество, при  $b^2 = ac$ . Как показали результаты численного эксперимента, значения таких различных функций как арктангенс и натуральный логарифм совпадают с точностью до пятого знака, что свидетельствует о

качественном изменении поведения функций. А, следовательно, можно утверждать, что бифуркационное множество существует.

**Вывод.** Подытоживая все изложенное, можно утверждать, что в данном случае переход от одной функции к другой возможен в силу их эквивалентности. В реальных ситуациях, когда предельное значение напряжений не превышает текущее значение целесообразно использовать следующую формулу для определения долговечности корродирующих стержневых элементов:

$$t = t_0 - \frac{2kQ}{v_0|d|} \left\{ \operatorname{arctg} \left[ \frac{2a\delta + b}{|d|} \right] - \operatorname{arctg} \left[ \frac{b}{|d|} \right] \right\} \quad (16)$$

где  $d = \sqrt{|b^2 - ac|}$ ,  $d \neq 0$ .

Таким образом, с помощью теории катастроф удалось объяснить особенности поведения вещественных гладких функций в процессе решения задач долговечности многоэлементных стержневых конструкций, работающих в условиях коррозионного износа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский В.М. Расчет элементов конструкций, подверженных равномерной коррозии // Исследования по теории оболочек. – Казань, 1976. – Вып. 7. – с. 37 – 42.
2. Зеленцов Д.Г. Расчет конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы. – Днепропетровск: УГХТУ, 2002. – 168 с.
3. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. – Москва: Мир, 1980. – 607 с.
4. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. Книга 1. – Москва: Мир, 1984. – 350 с.

Получено: 12.06.2007 г.

УДК 628.32:004

В.С. Аверьянов, А.Н. Коробочка

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ БЕСКАМЕРНОГО  
ФИЛЬТРОВАНИЯ ВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД**

**Введение.** Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт автотранспорта приводят к образованию различных производственных отходов, которые при определенных условиях оказывают вредное влияние на окружающую среду. Они могут загрязнять почву, водные бассейны и атмосферу. Наиболее распространены и массовыми производственными отходами являются отработанные водные технологические среды (технологическая вода, специальные моечные растворы) от моечных установок для наружной мойки автомобилей и их составных частей.

В процессе мойки автомобилей водные среды насыщаются не только твердыми веществами (гравием, песком, глиной, илом, коллоидными частицами, остатками перевозимых в кузовах автомобилей сыпучих грузов), но и смазочными маслами, остатками топлив. Для мойки снятых с автомобилей при ремонте деталей, узлов и агрегатов применяются специальные моечные машины, в которых используются в растворенном виде моющие средства – каустическая сода, тринатрийфосфат, жидкое стекло, синтетические поверхностно-активные вещества и другие щелочи. После определенного времени эксплуатации моющих растворов требуется замены на новый, а отработавший моющий раствор должен утилизироваться, так как в его состав входят вредные вещества.

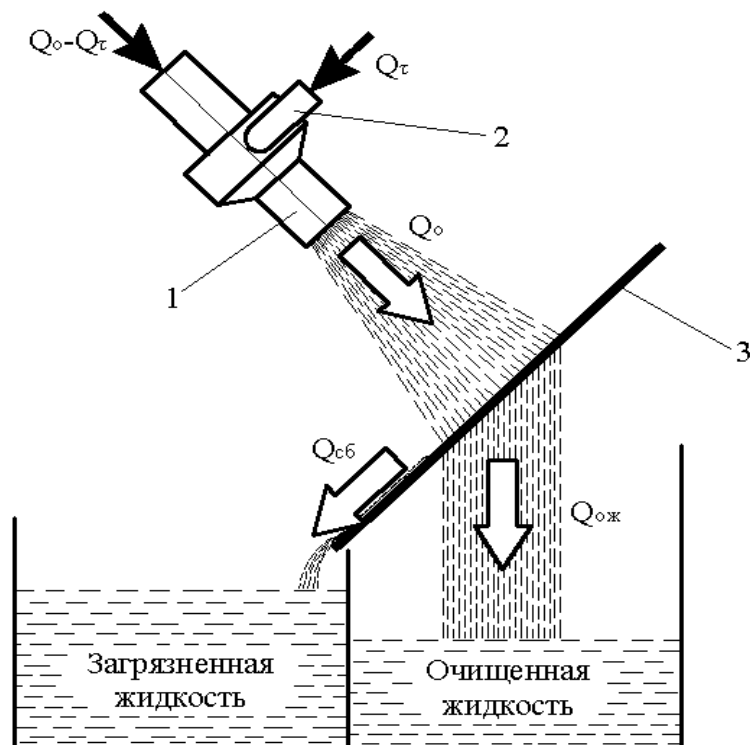
Очистка жидкости от твердых загрязнений и нефтепродуктов должна осуществляться постоянно. Наличие загрязнений снижает качество моечных операций, ухудшает эксплуатационные и функциональные свойства самих водных технологических сред. Для очистки водных технологических сред применяют баки-отстойники, магнитные сепараторы, центрифуги, флотаторы, фильтровальные установки, магнитные фильтры, гидроциклоны. Однако из-за определенных требований к качеству и тонкости очистки больших расходов жидкости не все из этих устройств могут быть рекомендованы. Устройства для очистки водных технологических



сред должны быть непрерывно действующими. В ином случае требуется выделение дополнительных площадей для установки накопительных емкостей. Наиболее перспективными для очистки моющих растворов являются фильтровальные установки

**Решение поставленной задачи.** Традиционная технологическая схема фильтровального процесса основана на создании разности давлений жидкости перед фильтровальной перегородкой и после нее. Такая технологическая схема требует использования нагнетательной и сливной камер, между которыми располагается фильтровальная перегородка. Это, в свою очередь, требует создания эффективных и надежных устройств герметизации нагнетательной и сливной камер. Кроме того, процесс очистки жидкости от механических примесей становится периодически действующим и трудно поддается автоматизации.

Данные недостатки возможно устранить, используя энергию закрученной свободной струи жидкости. Схема процесса фильтрования с использованием энергии закрученной свободной струи жидкости представлена на рисунке 1.

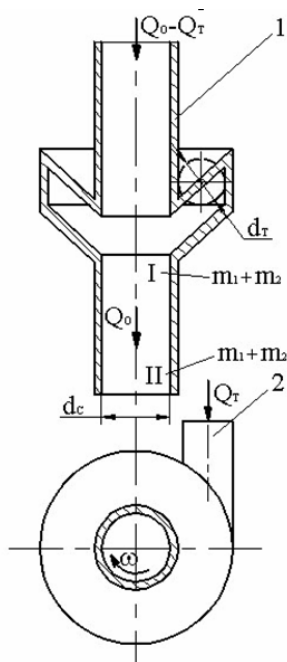


1 – сопло; 2 – тангенциально врезанный патрубок; 3 – фильтровальная перегородка

Рисунок 1 – Схема процесса безкамерного фильтрования

Загрязненная механическими примесями жидкость подается в сопло, через тангенциально врезанный патрубок 2, который служит для винтового закручивания потока жидкости. В процессе фильтрования под действием давления струи загрязненной жидкости часть общего объема жидкости проникает через фильтровальную перегородку 3. При этом твердые частицы, находящиеся в ней, задерживаются на перегородке, а очищенная жидкость поступает в емкость, расположенную за перегородкой. Остальная часть объема жидкости, не проникая за перегородку, сбрасывается обратно в емкость с загрязненной жидкостью, одновременно смывая слой осадка, образующийся на фильтровальной перегородке. Фильтровальная перегородка 3 состоит из опорной сетки, на которую устанавливаются различные фильтровальные ткани. Фильтровальная перегородка может закрепляться относительно оси сопла под углом  $\alpha = 0...90^\circ$ .

Конструкция применяемого на установке сопла представлена на рисунке 2. Сопло работает таким образом, что подача загрязненной жидкости осуществляется одновременно через сопло 1 и тангенциально врезанный патрубок 2. Основной объем жидкости подается через сопло 1 и представляет собой поток жидкости, скорость которого направлена вдоль оси сопла.



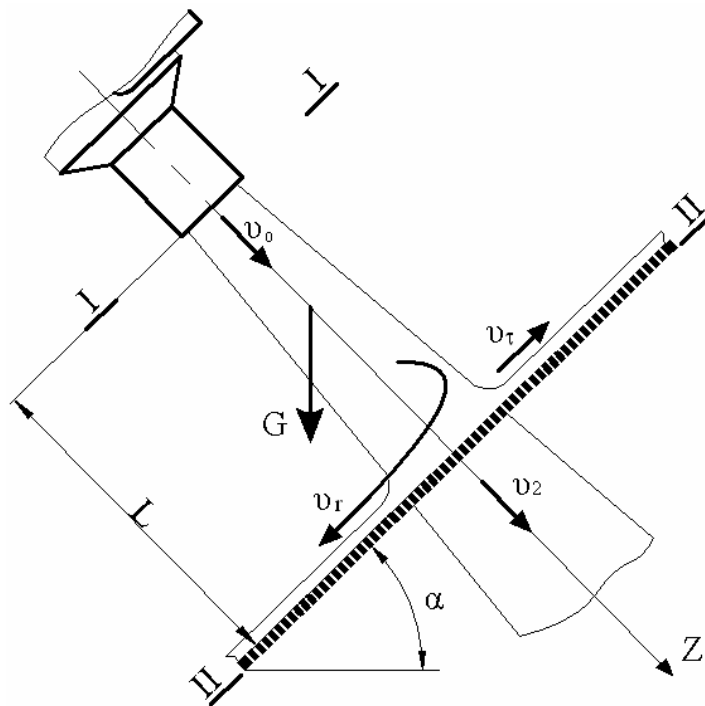
1 – сопло; 2 – тангенциально врезанный патрубок.

Рисунок 2 – Конструкция форсунки

Через патрубок 2 подается дополнительный поток жидкости, который, благодаря тангенциальному расположению патрубка относительно сопла, закручивается и, внедряясь в основной поток жидкости, приводит к появлению тангенциальной составляющей скорости ее движения в сопле. На выходе из сопла поток жидкости представляет собой винтовую закрученную компактную струю, которая имеет большой угол раскрытия и меньшую дальность по сравнению с прямой струей.

Использование сопла такого типа в фильтровальной установке приводит к уменьшению его габаритных размеров при сохранении требуемой производительности, а также увеличению срока службы фильтровальных материалов.

Рассмотрим движение жидкости в фильтровальной установке. На пути движения жидкости установлена преграда – перфорированная отверстиями плоскость (рисунок 3).



$v_0, v_\tau, v_r$  – скорости движения жидкости, м/с;  $L$  – расстояние от форсунки до фильтровальной перегородки, мм;  $\alpha$  – угол наклона фильтровальной перегородки относительно горизонтальной плоскости, град;  $G$  – общий вес жидкости между сечениями I-I и II-II.

Рисунок 3 – Движение жидкости в фильтровальной установке

Уравнение количества движения жидкости в направлении ее движения имеет вид:

$$c \cdot \omega_1 \cdot x_0^2 + G \cdot \cos \alpha = R_{\Pi} + c \cdot \sum \omega_2 \cdot x_2^2 \quad (1)$$

где  $\omega_1$  – площадь части фильтровальной перегородки, на которую попадает струя жидкости,  $\text{м}^2$ ;

$\sum \omega_2$  – суммарная площадь открытых пор фильтровальной перегородки на площади  $\omega_1$ ,  $\text{м}^2$ ;

$x_0$  и  $x_2$  – скорости движения жидкости до и в фильтровальной перегородке,  $\text{м/с}$ ;

$\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;

$R_{\Pi}$  – реакция фильтровальной перегородки, Н;

$G$  – общий вес жидкости между сечениями I-I и II-II (рисунок 3), Н;

$\alpha$  – угол наклона фильтровальной перегородки относительно горизонтальной плоскости, град.

При вычислении реакции  $R_{\Pi}$  логично принять, что давление  $p_R$ , действующее на площадь фильтровальной перегородки, определяется, как при обтекании преграды, и равно:

$$p_R = c \cdot x_0^2 + \frac{G}{\omega_1} \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

и, соответственно, сама реакция равна:

$$R_{\Pi} = p_R \cdot (\omega_1 - \sum \omega_2), \quad (3)$$

$$R_{II} = (c \cdot \omega_1 \cdot x_0^2 + G \cdot \cos \alpha) \cdot \left(1 - \frac{\sum \omega_2}{\omega_1}\right) = (c \cdot \omega_1 \cdot x_0^2 + G \cdot \cos \alpha) \cdot (1 - n), \quad (4)$$

где  $n = \frac{\sum \omega_2}{\omega_1}$ .

Коэффициент сопротивления фильтровальной перегородки определяется из следующего соотношения

$$R'_{\text{ф.п}} = 1 - n = \left(1 - \frac{\sum \omega_2}{\omega_1}\right). \quad (5)$$

Подставив выражение (3) в уравнение количества движения (1), после некоторых преобразований получим:

$$x_2 = \sqrt{x_0^2 + \frac{G \cdot \cos \alpha}{c \cdot \omega_1}}. \quad (6)$$

Общий расход жидкости  $Q_0$ , исходящий из сопла в процессе фильтрования разделяется, как показано выше, на две составляющие:

$$Q_0 = Q_{\text{ож}} + Q_{\text{сб}}, \quad (7)$$

где  $Q_{ож}$  – расход очищенной жидкости, м<sup>3</sup>/с;

$Q_{сб}$  – расход сброса загрязненной жидкости, м<sup>3</sup>/с.

Расход  $Q_{ож}$  можно выразить через скорость  $x_2$  и  $\sum \omega_2$ :

$$Q_{ож} = \sum \omega_2 \cdot x_2 \cdot k_{п}, \quad (8)$$

где  $k_{п}$  – коэффициент, учитывающий проницаемость фильтровальной ткани.

С учетом зависимости (6) получим уравнение для определения расхода очищенной жидкости в процессе фильтрования без закупорки пор фильтровальной перегородки:

$$Q_{ож} = \sum \omega_2 \cdot \sqrt{x_0^2 + \frac{G \cdot \cos \beta}{c \cdot \omega_1}} \cdot k_{п}. \quad (9)$$

Целью дальнейших теоретических исследований является определение величины осевой составляющей скорости движения жидкости в струе на плоскости фильтровальной перегородки.

Выводы. Использование энергии закрученной свободной струи жидкости при бескамерном фильтровании позволит очистить ее со степенью очистки от механических примесей 90-95%. Это позволит повторно использовать очищенную техническую воду в технологических процессах на автотранспортных предприятиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коробочка А.Н., Тихонцов А.М., Захарченко А.В., Пономаренко А. Фильтровальная установка. 23.03 85., Бюл. №11 - №14.

Получено 04.05.2007 г.

УДК 621.785:681.785.369:681.785.789

Г.Ш. Кирия, М.О. Матвеева, Б.В. Климович

## **О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕГО ЧУГУНА К ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ**

### **1 Введение**

В настоящее время продолжается развитие исследований в области создания технологий на основе взаимодействия энергии, вещества и информации в различных процессах. В работе [1] приведен обзор исследований энергоинформационного обмена в системах живой и неживой природы, а также рассмотрена роль информации в процессах самоорганизации во время фазовых превращений. Отмечается, что энергоинформационные технологии приведут к созданию материалов с уровнем свойств, приближающихся к их теоретическим пределам.

Во многих работах получены данные, доказывающие наличие информационных взаимодействий в процессах фазовых превращений в сплавах [2, 3]. Наиболее чувствительными к энергоинформационному воздействию являются пограничные, метастабильные системы [2]. К таким системам можно отнести, например, чугун.

### **2. Цель**

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния энергоинформационного воздействия на затвердевающий чугун. Оценивали влияние такого воздействия на структуру и некоторые свойства металла.

### **3. Описание исследования.**

Объектом исследования служили чугунные образцы диаметром 32 мм и высотой 10 мм, вырезанные из средней части двух литых заготовок диаметром 35 мм и высотой 100 мм. Отливки получали в одной песчаной форме одновременно из одного металла. При этом, металл одной отливки с момента начала заполнения формы и до извлечения ее из формы подвергался энергоинформационному (ЭИ) воздействию с помощью формоактивного генератора.

Такая методика получения образцов позволила обеспечить чистоту эксперимента, исключив неконтролируемое влияние на исследуемый металл таких технологических параметров литья, как химический состав и перегрев металла перед заливкой, скорость и время заливки, скорость охлаждения в форме и температуру отливок при извлечении из формы.

Отливки получали из электропечного чугуна следующего усредненного состава, % по массе: 2,47 углерода; 1,94 кремния; 0,16 марганца; 0,15 серы; 0,07 фосфора; 0,21 хрома; 0,015 никеля; 0,031 молибдена; 0,023 титана; 0,02 вольфрама; тысячные доли сурьмы, свинца и ванадия.

Химический состав чугуна определяли методом спектрального анализа на приборе «Лесо», образцы отбирали в центральной и приповерхностной зонах отливок. В этих же зонах измеряли твердость по Шору и микротвердость отдельных структурных составляющих чугуна (перлита и цементита). Микротвердость цементита и перлита измеряли на приборе ПМТ-3 (№ 59586) при нагрузке 0,49Н и увеличении  $\times 485$ . Величину микротвердости определяли по результатам 51 замера, точность замера диагонали отпечатка индентора  $\pm 0,07$  мкм.

Микроструктуру чугуна опытных плавок исследовали с помощью оптического микроскопа МИМ-8 (№ 59200) при увеличениях  $\times 100$ ,  $\times 200$  раз. Структуру чугуна образцов оценивали по ГОСТ 3443-77 (Международный стандарт ИСО 945-75-чугун).

Количество структурных составляющих определяли точечным методом Глаголева А.А. [4]. Окуляр Гюйгенса 7х с квадратной сеткой (289 узловых точек), 25 полей зрения при увеличении  $\times 420$ . Абсолютная погрешность  $\pm 1$  при доверительной вероятности  $P=0,5$ .

#### 4. Результаты исследований

Результаты оценки указанных показателей приведены в таблице.

Анализ данных приведенных в таблице показывает существенное влияние ЭИ воздействия на такие показатели, как размер и количество графитных включений, количество перлита и цементита, микротвердость цементита. Энергоинформационное воздействие привело к значительному увеличению количества графита в 1,82 раза, количество перлита уменьшилось в 1,1 раза и соответственно цементита увеличилось в 1,4 раза.

## Показатели оценки образцов

Показатели	Отливки	
	не подвергались ЭИ воздействию	подвергались ЭИ воздействию
1. Анализ структурных составляющих чугуна		
Форма графита	ПГф2, пластинчатая завихренная	ПГф2, пластинчатая завихренная
Размер графитовых включений	ПГд45	ПГд90
Распределение графита	ПГр6 Сетчатое	ПГр6 Сетчатое
Количество Г, %	8,63	15,74
Количество перлита, %	84,77	74,52
Дисперсность перлита, мкм	0,58	0,58
Количество цементит, %	6,60	9,53
2. Свойства чугуна		
Твердость по Шору, HSD	39	40
Микротвердость, кгс/мм <sup>2</sup>		
- перлита	412	411
- цементита	769	550

На форму и размер графитных включений, дисперсность перлита, твердость по Шору и микротвердость перлита ЭИ воздействие практически не повлияло.

## 5. Выводы

Результаты настоящего исследования позволяют считать перспективным направление ЭИ – воздействия на затвердевающие метастабильные сплавы с целью улучшения их физико-механических свойств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Долженков И.Е., Клименко А.П., Карнаух А.И., Андрианова И.И. К вопросу об энергоинформационных технологиях / Ж. «Теория и практика металлургии». – 1999. - № 1. – С. 42-47.
2. Вейник А.И. Термодинамика реальных процессов. – Минск: Наука і техника. 1991. – 576 с.
3. Энергоинформационное единство мира – новая парадигма технологического развития: Материалы научно-практической конференции. – Днепропетровск, 1994. - 60 с.
4. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография: Стереология металлических материалов. – М.: Металлургия, 1976. – 272 с.: ил.

Получено 04.04.2007 г.



УДК 622.785

Д.А.Ковалев, А.В.Бабенко, Н.Д.Ванюкова, М.В.Ягольник

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА УПРОЧНЕНИЯ  
ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОКАТЫШЕЙ ИЗ  
МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ШИХТЫ ПРИ ДОБАВКАХ  
ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА**

**Введение**

В металлургической промышленности на тонну стали образуется более 400 кг твердых отходов. Большую часть этих отходов (70 – 80%) составляют шлаки, которые в настоящее время используются при производстве цемента, для дорожного покрытия и в строительстве. Остающаяся часть твердых отходов может быть классифицирована, как пыли, шламы и окалина. Традиционно, большая часть образующихся пылей, шламов и окалин возвращаются в доменный процесс путем их агломерации. Однако их использование в агломерационном производстве ограничено из-за снижения производительности и качества агломерата.

В настоящее время, становится регулярной практика высокотемпературной переработки одних отходов во вращающихся и других печах для получения металлизированных окатышей с одновременным удалением вредных примесей [1]. Для сохранения прочности окатышей, полученных из отходов, в процессе пирометаллургической обработки необходима их исходная прочность (сопротивление сжатию) 40-60 кг/окатыш. [2].

На прочностные характеристики окатышей, полученных из отходов металлургического производства низкотемпературным упрочнением, является существенным влияние содержания цемента, извести и твердого топлива. Содержание углерода в этих окатышах превращает их переводит их в ряд самовосстанавливающихся.

В представленной работе приведены экспериментальные данные, которые использованы для установления механизма упрочнения безобжиговых окатышей, когда в качестве вяжущих применяются портландцемент и известь.

## 1. Материалы и методика исследования

Способ получения окатышей на холодной связке предусматривает применение в качестве связующего портландцемента, позволяющего получать из железосодержащих отходов металлургического производства окатыши с требуемой механической прочностью. Окатыши изготавливают из смеси доменных и сталеплавильных шламов, состоящих из частиц различной крупности, комбинация которых позволяет достичь максимального уплотнения окатышей в процессе их производства на чашевых грануляторах. Добавка тонкоизмельченного портландцемента с большой удельной поверхностью способствует повышению плотности, поскольку многочисленные мелкие частицы заполняют пространство между более крупными частицами доменных шламов. Число точек взаимного контакта зерен увеличивается, а пористость уменьшается, благодаря чему механическая прочность окатышей возрастает.

Окатыши были произведены в лабораторных условиях на тарельчатом грануляторе диаметром 1м. Проба массой 10 кг, включающая шламы доменного и конвертерного производств, окалину, цемент, известь и твердое топливо, смешивалась в барабане-смесителе в течение 4х минут, увлажнялась водой до 12,5-13,5% и снова смешивалась в течение 2х минут. После смешивания проба выдерживалась в течение 20 минут и затем загружалась в чашу окомкователя. Скорость вращения тарели составляла 18 об./мин, а ее наклон - 45°. Тарель с загруженной пробой вращалась в течение 20 минут. Сырые окатыши разгружались на поддон и выдерживались в течение одного часа. Затем окатыши загружались в контейнер и выдерживались 24 часа, после чего рассеивались на фракции: 8-10мм, 10-12мм, 12-15мм, 15-20мм. Химический состав исходных материалов представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав компонентов шихты

	Fe <sub>общ</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	П.П. П.
Конвертерный шлам	53,7	16,9	1,80	0,97	0,10	3,35	0,08	48,3 3	23,00	1,64	3,83
Доменный шлам	42,3	10,8 8	8,06	0,50	0,30	0,88	0,09	9,50	49,80	17,3 0	3,39
Окалина	70,2	1,72	1,36	0,03	0,76	0,43	—	58,5 7	35,28	1,85	—

Коксовая мелочь	0,84	0,60	4,80	0,16	5,52	0,18	0,11	—	1,20	87,4 3	—
Портланд-цемент	2,40	65,7 3	22,0	—	4,40	3,05	1,40	—	3,42	—	—
Известь	1,50	82,0 0	2,06	—	0,80	3,00	—	—	2,14	—	10,00
Окатыш (кокс 4% известь 5% цемент 6% сверх 100%)	52,1 4	10,1 8	4,72	0,60	0,77	1,65	0,08	32,9 0	37,80	9,90	1,30

Таблица 2

## Состав окатышей и крупность материалов

Материал	Доля компонента, %	Содержание фракции - 100мкм, %
Доменный шлам	45,0	61,2
Конвертерный шлам	35,0	36,4
Окалина	20,0	12,8
Коксовая мелочь*	1, 4, 7	65,0
Известь*	2, 5, 8	55,0
Портландцемент *	2, 4, 6	100

\*сверх 100%

В связи с тем, что исследовали влияние добавок портландцемента, извести и коксика на изменение прочности гранул, эти компоненты в разных количествах добавлялись к шихте.

Для полиномиального описания закономерностей изменения прочности от заданных факторов выбрали трехфакторный план Бокса-Бенкина (центральное композиционное ортогональное планирование второго порядка для трехфакторного эксперимента).

## 2. Результаты исследования

План Бокса-Бенкина (k=3) приведен в таблице 3. Интервал варьирования составляет 10-25% максимального значения фактора. Исходя из условий приведения для стандартной матрицы, выбран интервал варьирования и величины уровней факторов. Определены натуральные значения факторов и рассчитаны составы шихт для тринадцати опытов. Все опыты проведены с предварительной их рандомизацией. В случае, если параметры оптимизации (сопротивление сжатию) имеют минимальное и максимальное

значение, опыт проводили дважды. Также был проведен дополнительный опыт для нулевой точки.

### 3. Полиномиальное описание процесса

Матрица, натуральные значения факторов и значения параметров оптимизации приведены в таблице 3.

Коэффициенты регрессии и их ошибка вычисляется после реализации плана по упрощенным формулам:

$$b_0 = T_1 \sum_1^n y_i - T_2 \sum_1^k \sum_1^n x_i^2 \cdot y_i; b_i = T_3 \sum_1^n x_i \cdot y_i;$$

$$b_{ii} = T_4 \sum_1^n x_i^2 y_i + T_5 \sum_1^k \sum_1^n x_i^2 \cdot y_i T_2 \sum_1^n y_i;$$

$$b_{ij} = T_6 \sum_1^n x_i \cdot x_j \cdot y_i; S_{b0} = T_7 S_{on}; S_{bi} = T_8 S_{on}; S_{bii} = T_9 S_{on}; S_{b0} = T_{10} S_{on}.$$

Используя расчетный коэффициент  $T_i$ , рассчитывали коэффициенты регрессии полинома. Зависимость прочности окатышей от содержания в шихте цемента, извести и коксика, приведена в виде:

$$Y = 26 + 0.9375 \cdot (X_1 - 5/3) + 4.9 \cdot (X_2 - 4/2) - 1.975 \cdot (X_3 - 4/3) - 3.75 \cdot (X_1 - 5/3) \cdot (X_2 - 4/2) + 0.625 \cdot (X_1 - 5/3) \cdot (X_3 - 4/3) + 6.9 \cdot (X_2 - 4/2) \cdot (X_3 - 4/3) - 5.125 \cdot (X_1 - 5/3)^2 - 5.6 \cdot (X_2 - 4/2)^2 - 2.55 \cdot (X_3 - 4/3)^2$$

После определения всех параметров оптимизации ( $y_i$ ) и сравнения дисперсии опытных данных и дисперсии адекватности рассчитали критерий Фишера, который меньше табличного, что свидетельствует об адекватности модели. Расчетные данные приведены на рисунках 1-3.

Из приведенных данных следует, что наибольшая прочность окатышей наблюдается при содержании извести – 5,0% и содержании в шихте цемента – 5,0%, коксика – 3,5%. Прочность окатышей значительно снижается при повышении содержания коксика в шихте, что подтверждается данными, приведенными на рисунке 3. При одновременном вводе в шихту цемента и извести увеличение концентрации извести в шихте до 6% приводит к увеличению прочности, а при дальнейшем увеличении концентрации извести прочность окатышей снижается.

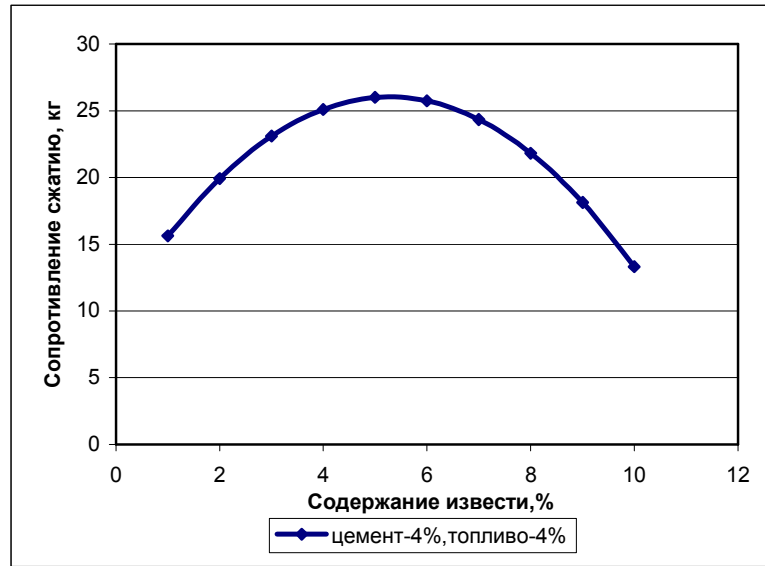


Рисунок 1 - Зависимость прочности окатышей от содержания извести

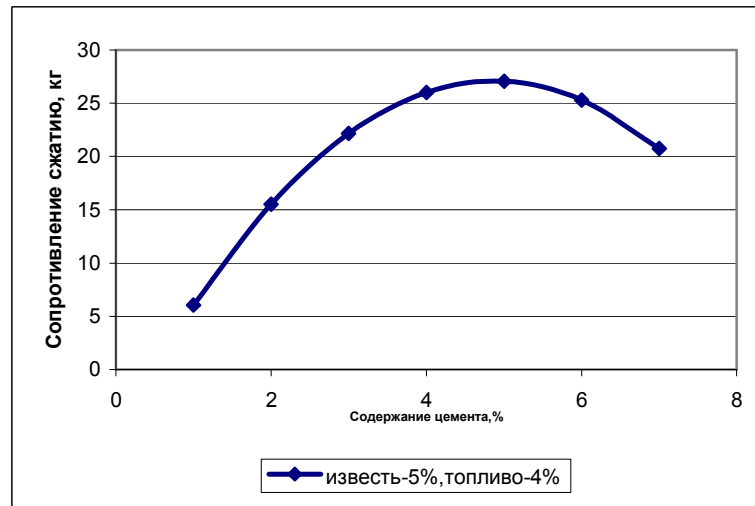


Рисунок 2 - Зависимость прочности окатышей от содержания портландцемента

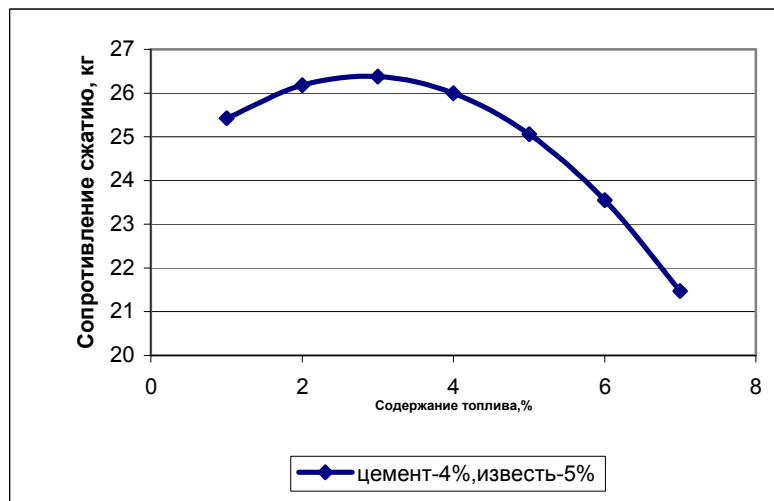


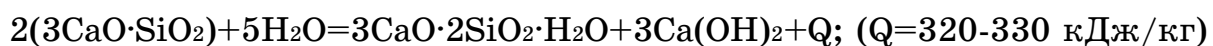
Рисунок 3 - Зависимость прочности окатышей от содержания коксика

Упрочнение окатышей, содержащих в составе портландцемент, происходит за счет твердения цемента.

Порошок портландцемента, состоящий из мономинеральных и полиминеральных частиц силикатов кальция, активно реагирует с водой, которая содержится в окатышах.

Основными стадиями процесса гидратационного твердения портландцемента являются [3]: растворение кристаллов минералов в воде с образованием пересыщенных водных растворов, кристаллизация из растворов новых соединений - кристаллогидратов, перекристаллизация кристаллогидратов с образованием стабильных соединений для данных условий. При этом важную роль играют: температура, давление, химический состав системы, соотношение твердой и жидкой фаз [4].

Гидросиликаты кальция образуются в системе  $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  как продукты гидратации безводных трех или двухкальциевых силикатов. При гидратации  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  и  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  в системе образуются гидросиликаты кальция и гидрат окиси кальция, т.е. эту реакцию гидратации можно назвать инконгруэнтной:



Принимая во внимание, что реакция гидратации протекает с выделением теплоты, исследовали изменение температуры при взаимодействии цемента с водой.

Для контроля изменения температуры использовали лабораторный ртутный термометр, который помещали в слой исследуемого материала. Все материалы предварительно выдерживали при температуре окружающей среды. Отсчет температур начинали с момента попадания воды в цемент. Результаты исследования представлены на рисунке 4.

Механизм гидратации цемента включает несколько стадий: частицы силикатов кальция сразу вступают во взаимодействие с водой и реагируют весьма энергично, о чем можно судить по пику на кривой изменения температуры (рис.4). На этой стадии, в результате быстрой гидратации поверхностных частиц минерала, последние покрываются тонкой пленкой из гелей гидратированных соединений, которая затрудняет доступ молекул  $\text{H}_2\text{O}$  к негидратированной поверхности. Реакция гидратации тормозится и переходит во вторую стадию – индукционный период. Мгновенная поверхностная реакция

сменяется гетерогенно-диффузионным процессом массообмена через образовавшуюся на частице оболочку из гидратов.

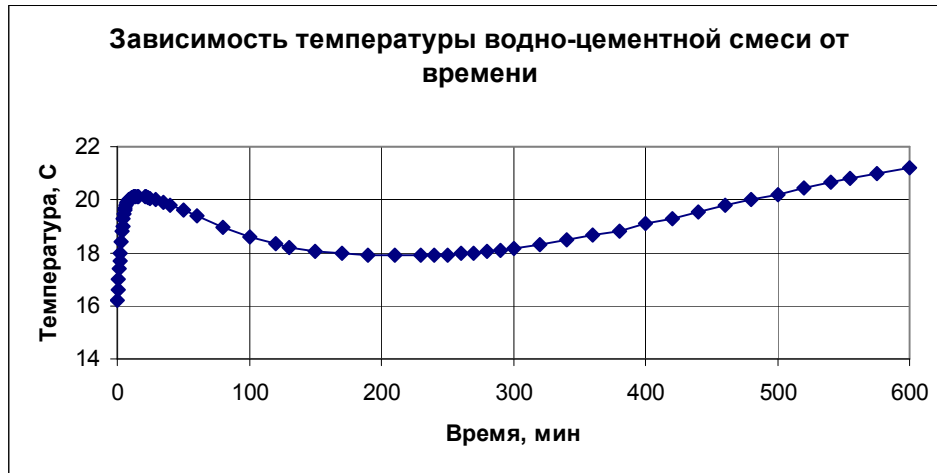


Рисунок 4 - Зависимость температуры водно-цементной смеси от времени

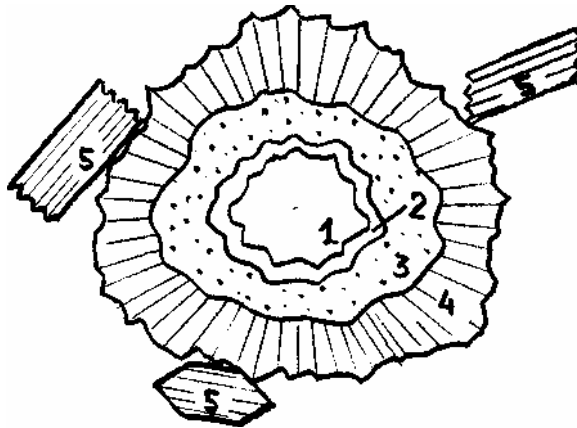


Рисунок 5 - Схематическое изображение реагирующего с водой зерна  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  [4]: 1 — негидратированное ядро, 2 — первичный гидрат  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ , 3 — вторичные гидросиликаты кальция, 4 — третичные гидросиликаты кальция, 5 — отдельные крупные кристаллы.

Механизм гидратации цемента включает несколько стадий: частицы силикатов кальция сразу вступают во взаимодействие с водой и реагируют весьма энергично, о чем можно судить по пику на кривой изменения температуры (рис.4). На этой стадии, в результате быстрой гидратации поверхностных частиц минерала, последние покрываются тонкой пленкой из гелей гидратированных соединений, которая затрудняет доступ молекул  $\text{H}_2\text{O}$  к негидратированной поверхности. Реакция гидратации тормозится и переходит во вторую стадию — индукционный период. Мгновенная поверхностная реакция сменяется гетерогенно-диффузионным процессом массообмена через образовавшуюся на частице оболочку из гидратов.

Таблица 3

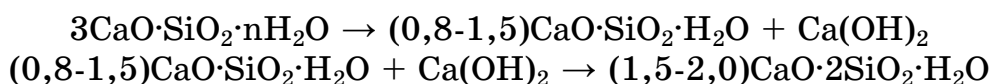
Номер опыта	Значение фактора						Эффект взаимодействия			Квадрат фактора			Сопротивление сжатию, кг/ок. (фракция 12-15мм)			
	X1(известь)		X2(цемент)		X3(топливо)		X1X2	X1X3	X2X3	X12	X22	X32	Серия опытов		Среднее	Расчётное
	код	нат., %	код.	нат., %	код	нат., %							I	II		
1	+	0,24	+	0,18	0	0,12	+	0	0	+	+	0	18,4	---	18,4	17,3375
2	+	0,24	-	0,06	0	0,12	-	0	0	+	+	0	12,7	17,7	15,2	15,0375
3	-	0,06	+	0,18	0	0,12	-	0	0	+	+	0	25,1	---	25,1	22,9625
4	-	0,06	-	0,06	0	0,12	+	0	0	+	+	0	10,9	12,7	11,8	10,3
5	+	0,24	0	0,12	+	0,21	0	+	0	+	0	+	15,4	---	15,4	17,9125
6	+	0,24	0	0,12	-	0,03	0	-	0	+	0	+	23,9	---	23,9	20,6125
7	-	0,06	0	0,12	+	0,21	0	-	0	+	0	+	16,1	---	16,1	14,7875
8	-	0,06	0	0,12	-	0,03	0	+	0	+	0	+	21,9	---	21,9	19,952
9	0	0,15	+	0,18	+	0,21	0	0	+	0	+	+	29,8	31,2	30,5	27,65
10	0	0,15	+	0,18	-	0,03	0	0	-	0	+	+	21,2	---	21,2	17,8
11	0	0,15	-	0,06	+	0,21	0	0	-	0	+	+	12,075	---	12,075	12,6
12	0	0,15	-	0,06	-	0,03	0	0	+	0	+	+	14,7	---	14,7	16,2
13	0	0,15	0	0,12	0	0,12	0	0	0	0	0	0	24,5	27,5	26	26



На протяжении индукционного периода происходят процессы зарождения и медленного роста кристаллов гидросиликатов кальция и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . При достижении этими кристаллами определенных размеров пленка разрушается и открывается доступ воды к негидратированной поверхности частиц. С этого момента наступает третий период – ускоренной гидратации. В результате образования большого количества кристаллогидратов, на поверхности негидратированной части образуется оболочка, следствием чего является снижение скорости реакции – четвертая стадия.

Первичным продуктом гидратации  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$  является фаза, молекулярное отношение  $\text{CaO} : \text{SiO}_2$  в которой приближается к 3, т.е. фаза  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$  [4]. Возможно, что образование этой фазы является одной из причин возникновения первичной пленки на частицах  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  и появление индукционного периода.

Через 2-6 часов  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$  распадается с выделением  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  вторичного гидросиликата кальция меньшей основности по схеме:



Механизм реакций гидратации отдельных минералов в составе цемента в начальный период остается таким же, как и в индивидуальных системах. В настоящее время, большинство исследователей рассматривают стадию взаимодействия кристаллов с водой как топохимическую, сопровождающуюся присоединением поверхностью кристаллов молекул воды или ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  с образованием гидратированного слоя небольшой толщины и последующим переходом частично или полностью гидратированных ионов в раствор [5,6].

Кинетика реакции гидратации цемента лимитируется скоростью диффузии молекул воды и растворенных ионов через слой гидратированных продуктов. На частицах цемента образуются оболочки, придающие им хлопьевидную форму. Разрыв оболочек сопровождается образованием большого количества гидросиликатного геля, заполняющего межзеренное пространство. Из крупнокристаллических продуктов гидратации наблюдается  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Таким образом, основу прочности структуры тела из железосодержащих материалов и минеральных вяжущих составляет каркас из локальных ( $10^{-2}$  см) сростков кристаллов и гидратных фаз и

их агрегатов, заполняющих межзеренное пространство, склеенных в точках фазовых контактов гелем гидратных новообразований. Закономерности образования таких структур позволяют использовать их для регулирования процессов твердения минеральных вяжущих. Одним из приемов такого регулирования является увеличение количества кристаллической фазы в объеме твердеющей системы. Это может быть достигнуто введением в систему кристаллических интенсификаторов, которые должны быть стабильны в данных условиях твердения и при этом быть структурными и химическими аналогами основной массы кристаллов гидратных новообразований.

В качестве добавок интенсификаторов твердения можно использовать портландит –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , который является одной из основных фаз цементного камня и увеличение его количества в твердеющей системе, особенно в ранние сроки твердения, несомненно должно способствовать интенсификации процессов твердения структур.

На рисунке 1 приведена зависимость прочности окатышей от содержания извести в шихте в присутствии твердого топлива, добавка которого необходима для получения самовосстанавливающихся окатышей. Необходимо отметить, что твердое топливо является компонентом шихты, который не участвует в реакции гидратации, а при твердении системы снижает ее прочность (рисунок 4). В то же время известь ( $\text{CaO}$ ) при взаимодействии с водой образует дополнительное количество кристаллогидратов, что способствует увеличению прочности системы. Таким образом, прочность цементного камня, как связующего, зависит решающим образом от количества гидратов и существенно изменяется в присутствии добавок, состав которых не соответствует составу цемента.

### Выводы

Из железосодержащих отходов металлургических производств были получены окатыши на холодной связке с использованием в качестве связующих веществ портландцемента и извести.

Определены компоненты шихты, оказывающие максимальное влияние на процесс упрочнения (цемент, известь, топлива). Для описания зависимости прочности безобжиговых окатышей от содержания этих веществ составлена математическая модель. Наибольшая прочность окатышей наблюдается при содержании

известии ~ 5%, цемента ~ 5%, коксика ~ 3,5% и составляет 26-27 кг/окатыш (фракция 10-12 мм).

Рассмотрен механизм твердения цементного камня и влияние на процесс твердения цементного камня добавок, состав которых соответствует и не соответствует составу цемента (твердое топливо). Доказано, что добавки твердого топлива снижают прочностные характеристики безобжиговых окатышей на холодной связке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов В.М., Казьмин А.А. Удаление вредных примесей из железосодержащих отходов за рубежом // Бюллетень научно-технической информации. – Черная металлургия – 1981 – №17 – с.15-22.
2. Ковалев Д.А., Ванюкова Н.Д., Бабенко А.В. Разработка технологии производства металлизированных аглоокатышей из отходов металлургического производства // Стратегия качества в промышленности и образовании. – Труды II Международной конференции – 2 – 9 июня 2006 г., Варна, Болгария – V.1 – 2006г. – с. №№
3. Бутт М.Ю., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих веществ – М.: Стройиздат – 1980г. – 472 с.
4. Бутт М.Ю., Сычев М.М., Тимашев В.В. Гидратация и твердение портландцемента. М.: Стройиздат. – 1980. – 472 с.
5. Сычев М.М. Твердение вяжущих веществ. М.: Стройиздат. – 1974.– 325 с.
6. Полак А.Ф. Твердение мономинеральных вяжущих веществ. М.: Стройиздат. - -1966. – 145 с.

Получено 27.03.2007 г.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГАЗАЦИИ ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ

**Введение.** Получение качественного металла в сталеплавильных агрегатах ограничивается возможностями регулирования физико-химических условий протекания основных реакций, что вызывает необходимость разработки процессов внепечной обработки стали. Одной из задач ковшевой обработки является снижение концентрации растворенных газов в металле – кислорода, водорода, азота. Основным методом удаления водорода и азота является вакуумирование или продувка металла инертными газами.

Во всех случаях удаления растворенных газов в металле существенную роль играет кинетика процессов на границе металл - газовая фаза и степень приближения к равновесию реакции растворенный газ – газовая фаза, а так же реакции удаления нескольких газов. Величины потоков газов при их совместном удалении является важной характеристикой для анализа поведения азота и водорода в металле. При внепечной обработке сталей рядового сортамента возможно использовать продувочные газовые смеси, содержащие азот. При производстве кислорода и аргона в кислородных цехах попутно получают большие количества азота, который по себестоимости в четыре раза дешевле аргона. Замена части аргона азотом позволит существенно снизить себестоимость стали.

**Постановка задачи.** Создание комплексных математических моделей внепечной обработки металла, позволит расширить класс сталей, обрабатываемых газовой смесью. Моделирование и подробный анализ термодинамических и кинетических особенностей растворения азота в металле позволили выяснить гидродинамические, тепло и массообменные процессы поведения растворенных газов в металле при продувке металла инертными газами в ковше и при вакуумировании.

Разработав математическую модель удаления растворенных газов из металла при внепечной обработке, можно проанализировать

поведение газов в металле и подобрать продувочную смесь газов содержащую азот для продувки различных марок стали.

В основе математической модели лежат уравнения удаления растворенного кислорода

$$[C] = [O] = \{CO\}, \quad (1)$$

водорода и азота – за счет выделения его в виде молекул, образующих пузырьки газа

$$[H] = \frac{1}{2} H_2, \quad (2)$$

$$[N] = \frac{1}{2} N_2, \quad (3)$$

Концентрации азота, водорода и кислорода, равновесные с парциальным давлением  $N_2$ ,  $H_2$  и  $CO$  в пузырьке, составят

$$[H]_r = K_H \sqrt{P_{H_2}}, \quad (4)$$

$$[O]_r = P_{CO} / ([C] K_C), \quad (5)$$

где  $K_N$ ,  $K_H$  и  $K_C$  – константы равновесия реакций растворения азота, водорода и окисления углерода.

Характер процессов массообмена между растворенными в металле газами ( $[H]$ ,  $[N]$ ,  $[O]$ ) и пузырьками барботирующих газов определялось ходом системы к равновесию. Процесс массоотдачи газа, растворенного в металле, с пузырем может быть описан выражением

$$m_r = \int_0^{\tau} (\beta_r ([\Gamma] - [\Gamma]_r) \cdot S_r \cdot d\tau, \quad (6)$$

где  $\beta_r$  – коэффициент массоотдачи между металлом и пузырем,  $[\Gamma]$  и  $[\Gamma]_r$  – концентрация газа в металле и равновесная с пузырем,  $S$  – площадь поверхности раздела газ-металл,  $\tau$  – время всплывания пузыря. Равновесие связано с растворимостью газов при определенном парциальном давлении этого газа в пузырьках.

При расчетах равновесия в системе металл – пузыри необходимо знать парциальные давления реагирующих газов в пузырьке. При наличии нескольких газов в пузырьке  $[\Gamma_1]$ ,  $[\Gamma_2]$ , ...  $[\Gamma_i]$  парциальное давление каждого газа может быть определено по выражению

$$P_i = \frac{(m_i/M_i)P}{(m_1/M_1 + m_2/M_2 + \dots + m_i/M_i)}, \quad (7)$$

где  $m_1$ ,  $m_2$ , ...  $m_i$  – массы газов в газовой смеси,  $M_1$ ,  $M_2$ , ...  $M_i$  – молекулярные массы этих газов,  $P$  – общее давление, под которым находится газовая смесь.

Анализ результатов. В соответствии с разработанной математической моделью (1...7) установлено, что при замене аргона в продувочном газе азотом поведение СО и водорода в пузырях этого газа практически остается одинаковым (рис. 1,2).

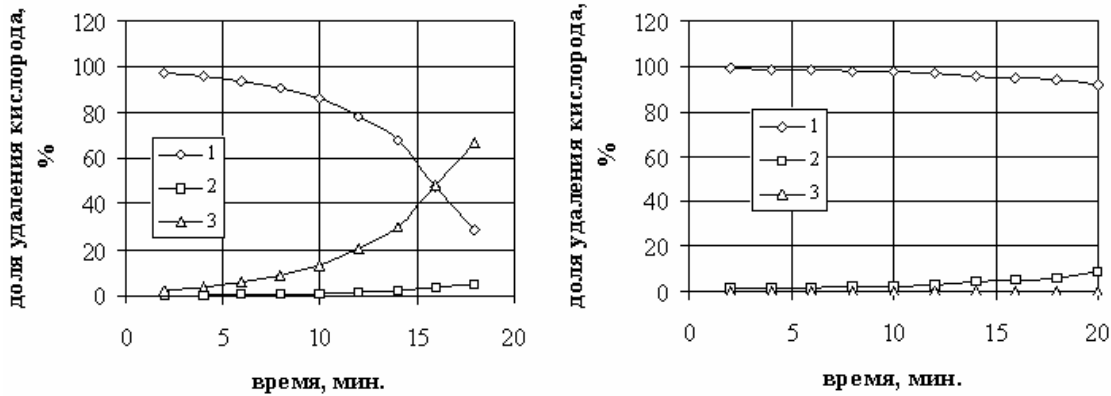


Рисунок 1 - Доля удаления кислорода по статьям при интенсивность продувки аргоном (а) и азотом (б)  $2 \text{ м}^3/\text{мин.}$ : 1 – в пузырь СО, 2 – в пузырь аргона, 3 – через поверхность

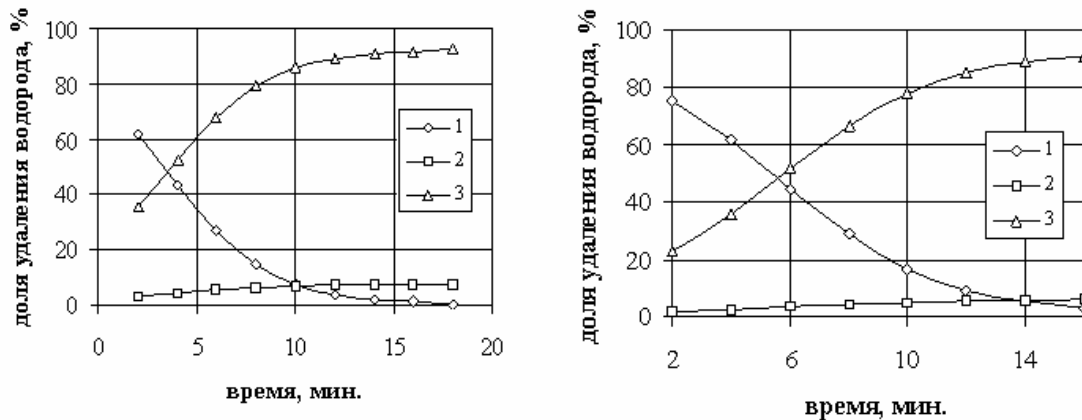


Рисунок 2 - Доля удаления водорода по статьям: 1 – в пузырь СО, 2 – в пузырь аргона, 3 – через поверхность. Интенсивность продувки  $\text{Ar} = 2 \text{ м}^3/\text{мин.}$

Содержание СО и водорода в пузырях продувочного газа не зависит от соотношения в нем аргона и азота.

Замена части аргона азотом в продувочном газе приводит к перераспределению величин и направления потоков азота из металла в пузыри продувочного газа. Доля азота, поступающего из продувочного газа в металл, при этом возрастает, но переход азота из металла в пузыри СО и через поверхность остается достаточным, чтобы обеспечить общее понижение концентрации азота в металле (рис. 3). Для этого необходимо иметь низкое остаточное давление над металлом и соответствующие требования по содержания азота в металле.

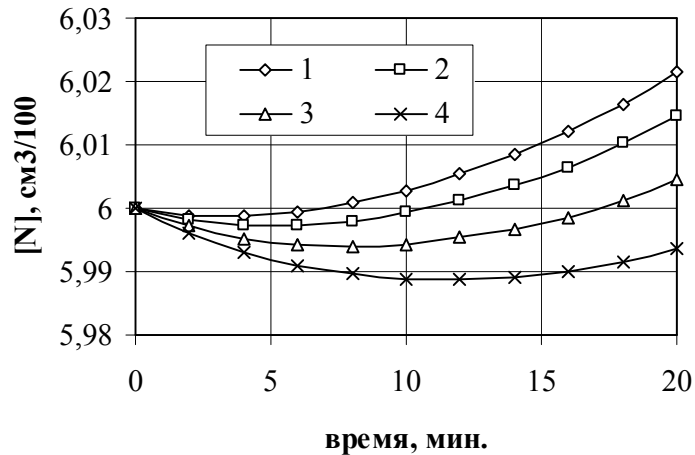


Рисунок 3 - Изменение концентрации азота в металле при различных соотношениях аргона и азота в продувочной смеси: 1- аргона 0, азота 0,1; 2 - аргона 0,2, азота 0,2; 3 - аргона 0,25, азота 0,15; 4 - аргона 0,3, азота 0,1 м<sup>3</sup>/мин.

Оптимальное соотношение азота и аргона в продувочной смеси при производстве сталей составляет 1-3. Использование азота в качестве инертного газа рекомендуется для продувки металла рядового сортамента, в котором отсутствуют нитридообразующие элементы.

Также установлено, что оптимальное соотношение азота и аргона в продувочной смеси при вакуумной обработке стали составляет 1-2. Основу продуктов реакции обезуглероживания составляет СО. По мере удаления кислорода из металла содержание СО в пузырьках продувочного газа падает, а за счет этого возрастает содержание водорода и азота. Содержание СО и водорода в пузырьках продувочного газа не зависит от соотношения в нем аргона и азота при вакуумной обработке.

**Вывод.** Таким образом, полученные в соответствии с математическим моделированием результаты показывают, что оптимальное соотношение продувочной смеси нужно менять в зависимости от выплавляемой марки стали, для получения качественной непрерывной литой заготовки с заданными механическими свойствами. Использование математической модели в производственных условиях позволит увеличить количество азота в продувочной газовой смеси, а замена части аргона азотом существенно снизит себестоимость производства стали.

Получено 30.04.2007 г.

**СОДЕРЖАНИЕ****СИСТЕМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

А.А. Лигун, А.А. Шумейко, Д.В. Тимошенко	ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ЛИНИЙ НА ИЗОБРАЖЕНИИ .....	5
В.В. Скалозуб, А.П. Иванов	УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО ОПИСАНИЯ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ ...	15
Т.В. Бабенко	ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ГІБРИДНОЇ НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ СИНТЕЗУ ІСППР В ЗАДАЧАХ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ .....	22
О.С. Волковский, Е.В. Выборов	ЭВРИСТИКО-ЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ФИЛЬТРАЦИИ СПАМ-СООБЩЕНИЙ .....	28
П.І. Когут, М.Є. Сердюк	ПРО ЗАДАЧУ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ЇХ КАРКАСНОЮ ІНТЕРПОЛЯЦІЄЮ .....	35
В.Ю. Плахотник	КРИТЕРИЙ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ С КОДИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ .....	46
В.Е. Бахрушин, Д.А. Миросенко	ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ КОНСТРУКТОРСКОГО РАСЧЕТА ГОРОДСКОЙ СЕТИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ .....	55
Т.В. Климова, Е.С. Яшина	ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ПРОЕКТА СОЗДАНИЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ АВТОМАТОВ .....	62
А.П. Алпатов, П.А. Белоножко, П.П. Белоножко, А.А. Витушкин, А.А. Фоков	БОЛЬШИЕ ОТРАЖАЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ В КОСМОСЕ. АНТЕННЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ.....	73
А.П. Алпатов, П.А. Белоножко, П.П. Белоножко, А.А. Витушкин, А.А. Фоков	БОЛЬШИЕ ОТРАЖАЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ В КОСМОСЕ. РАДИОТЕЛЕСКОПЫ, СОЛНЕЧНЫЕ КОНЦЕНТРАТОРЫ, ПЛОСКИЕ ОТРАЖАТЕЛИ .....	88

**СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

А.И. Михалев, В.В. Помулев, В.Г. Горб, Ю.С. Пройдак	МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ 3D МЕТАЛЛОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЕРКОЛЯЦИОННЫХ КЛАСТЕРОВ .....	102
В.В. Гоцуленко, В.Н. Гоцуленко, О.В. Дубина, В.И. Романенко, А.В. Садовой, Р.К. Стасевич, Н.Т. Тищенко	К ПРОБЛЕМЕ	



НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПОМПАЖА ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ЛОПАСТНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ .....	109
Д.Г. Зеленцов, О.А. Радуль, Л.И. Короткая АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ФОРМУЛ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТЕРЖНЕВЫХ КОРРОДИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ .....	121
В.С. Аверьянов, А.Н. Коробочка РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ БЕСКАМЕРНОГО ФИЛЬТРОВАНИЯ ВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД .....	130
Г.Ш. Кирия, М.О. Матвеева, Б.В. Климович О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕГО ЧУГУНА К ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ .....	136
Д.А.Ковалев, А.В.Бабенко, Н.Д.Ванюкова, М.В.Ягольник ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА УПРОЧНЕНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОКАТЫШЕЙ ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ШИХТЫ ПРИ ДОБАВКАХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА .....	139
И.В. Голуб, Л.В. Камкина МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГАЗАЦИИ ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ .....	150

**РЕФЕРАТЫ**

УДК 519.2

Лигун А.О., Шумейко О.О., Тимошенко Д.В. **Локалізація та формування ліній на зображенні** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(50). – Дніпропетровськ. 2007. –С.5-14.

Важливу частину в програмній реалізації електронних ділових документів займає векторна розбивка зображення на шари з наступною їхньою обробкою. Одним з найважливіших шарів є шар «ділової графіки», що містить у собі підшар «лінії». Робота присвячена новим підходам до локалізації й формування ліній.

Бібл. 6, іл. 5.

УДК 629.4.016.12

Скалозуб В.В., Іванов О.П. **Управління рухом потягу за допомогою нечіткого опису станів системи** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(50). – Дніпропетровськ. 2007. –С.15-21.

У статті розглядається спосіб вирішення задачі ведення потягу. Запропоновано підхід, що використовує нечіткі моделі і методи представлення, аналізу і вибору керувань. Отриману в ході навчання базу нечітких правил, по суті, що заміняє собою модель керування рухом потяга, можна використовувати у формі поради машиніста для вибору керування на черговій ділянці шляху з урахуванням умов невизначеності.

УДК 681.5:666.3/.7

Бабенко Т.В. **Дослідження структури гібридної нейромережі для синтезу ІСППР в задачах управління технологічними процесами** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(50). – Дніпропетровськ. 2007. –С.22-27.

Рассмотрена возможность использования сети Элмана в качестве компоненты гибридной структуры со свойствами аппроксимации для решения задач прогнозирования значений физико-химических параметров водных суспензий.

Бібл. 7, іл. 2.

УДК 004.773.3

Волковський О.С., Виборов Є.В. **Евристико-логічний метод фільтрації спам-повідомлень** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(50). – Дніпропетровськ. 2007. –С.28-34.

Створено модель евристико-логічної системи для фільтрації повідомлень електронної пошти, що надходять з мережі, від спаму.

Бібл. 4, табл. 3.

УДК 004.932

Когут П.И., Сердюк М.Е. **О задаче реконструкции изображений по их каркасной интерполяции** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(50). – Дніпропетровськ. 2007. – С.35-45.

Дается вариационная постановка задачи воспроизведения статических изображений по результатам их каркасной интерполяции. Установлены достаточные условия ее разрешимости на классе функций с ограниченной вариацией.

УДК 621.039.555

Плахотник В.Ю. **Критерій Прийняття р³шення для системи з кодовою апертурою** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(50). – Дніпропетровськ. 2007. – С.46-54.

Проведено аналіз особливостей статистичних характеристик кореляційного зображення в систем³ одержання зображень в гамма-променях за допомогою кодованих апертур. Показано, що традиційні³ методи прийняття р³шення про наявність³ джерела випром³нювання в полі³ зору не забезпечують бажаного р³вня довірчол³ ймов³рності³. Запропоновано метод обрання критерієм³ прийняття р³шення, що оснований на використанні³ статистики екстремальних значень.

Б³бл. 8, мал. 3.

УДК 528.235:681.3:628.1

Бахрушин В.Є., Миросенко Д.О. **Дослідження й розробка геоінформаційної підсистеми конструкторського розрахунку міської мережі водопостачання** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(50). – Дніпропетровськ. 2007. – С.55-61.

Обґрунтовано актуальність розробки автоматизованої системи конструкторського розрахунку міської мережі водопостачання засобами геоінформаційних технологій. Наведено алгоритм автоматизованого конструкторського розрахунку.

УДК 004.414.041:658.51.012

Т.В. Климова, О.С. Яшина **Застосування імітаційного моделювання щодо планування проекту створення нової техніки із застосуванням теорії автоматів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.–Випуск 3(50).–Дніпропетровськ. 2007. – С.62-72.

Розглянуто задачу аналізу плану проекту шляхом математичного моделювання процесів виконання проекту. Обґрунтовано доцільність застосування щодо вирішення конкретної задачі апарата гібридних недетермінованих автоматів. Побудовано моделі виконання проекту з урахуванням відмов обладнання.

УДК 629.7

Алпатов А.П., Белоножко П.А., Белоножко П.П., Витушкин А.А., Фоков А.А. **Большие отражающие поверхности в космосе. Антенны спутниковой связи** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.–Випуск 3(50).–Дніпропетровськ. 2007. – С.73-87.

Одним з напрямів розвитку сучасної супутникової техніки є створення космічних апаратів з просторово розвиненими периферійними елементами. Перспективними є відбиваючі поверхні великої площі, що використовуються для вирішення задач супутникового зв'язку, радіоастрономії, геліоенергетики.

Розглянуто конструкції сучасних великогабаритних космічних антен, наведені приклади застосування у складі систем супутникового зв'язку.

Зазначені особливості конструкцій, як механічних об'єктів, важливі з точки зору керування їх орієнтацією та формою відбиваючої поверхні.

УДК 629.7

А.П. Алпатов, П.О. Білоножко, П.П. Білоножко, А.А. Вітушкін, О.А. Фоков **Великі відбиваючі поверхні у космосі. Радіотелескопи, сонячні концентратори, пласкі відбивачі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.–Випуск 3(50).–Дніпропетровськ. 2007. – С.88-101.

Одним з напрямів розвитку сучасної супутникової техніки є створення космічних апаратів з просторово розвиненими периферійними елементами. Перспективними є відбиваючі поверхні великої площі, що використовуються для вирішення задач супутникового зв'язку, радіоастрономії, геліоенергетики.

Розглянуто конструкції сучасних великогабаритних радіотелескопів у складі космічних радіоінтерферометрів з надвеликою базою. Наведені проекти систем з використанням сонячних концентраторів та відбивачів сонячного випромінювання.

Зазначені особливості конструкцій, як механічних об'єктів, важливі з точки зору керування їх орієнтацією та формою відбиваючої поверхні.

УДК 530.1

Михалев А.И., Помулев В.В., Горб В.Г., Пройдак Ю.С. **Моделирование динамики формирования 3D металлоструктур на базе перколяционных кластерів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.–Випуск 3(50).–Дніпропетровськ. 2007. – С.102-108.

В статті розглянуто застосування перколяційного підходу для побудови моделей 3D структур металів. Здійснено оцінювання їх кількісних характеристик з застосуванням алгоритмів фрактального й перколяційного аналізу.

Іл. 5., Бібл.: 8 найм., Табл. 1.

УДК 621.63: 621.51

Гоцуленко В.В., Гоцуленко В.М., Дубіна О.В., Романенко В.І., Садовой О.В., Стасевич Р.К., Тищенко М.Т. **До проблеми нейтралізації помпажа двоступінчастого лопатевого нагнітача** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(50). – Дніпропетровськ. 2007. –С.109-120.

Теоретично визначені й досліджені стохастичні автоколивання в системі дуття доменних печей з двоступінчастим лопатевим нагнітачем.

Бібл. 11, іл. 9.

УДК 539.3

Зеленцов Д.Г., Радуть О.А., Коротка Л.І. **Аналіз застосовності аналітичних формул при розв’язанні задач довговічності стержневих кородуючих конструкцій** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(50). – Дніпропетровськ. 2007. –С.121-129.

У статті наводиться докладний аналіз застосовності отриманих раніше залежностей у вигляді аналітичних функцій довговічності стержневого елемента довільного перерізу, що підлягає корозійному зносу. Пропонується підхід, заснований на використанні математичного апарата теорії катастроф, за допомогою якого пояснюються особливості поведінки функцій довговічності.

УДК 628.32:004

Авер’янов В.С., Коробочка О.М. **Розробка технологічної схеми безкамерного фільтрування водних технологічних середовищ** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.–Випуск 3(50).–Дніпропетровськ.2007.–С.130-135.

Представлена технорлогічна схема безкамерного фільтрування водних технологічних середовищ. Отримано математичну залежність для визначення витрати очищеної рідини від механічних домішок з використанням енергії вільного струменя рідини, що дозволить повторне використання водних технологічних середовищ на автотранспортних підприємствах.

Бібл. 1, іл. 3.

УДК 621.785:681.785.369:681.785.789

Кірія Г.Ш., Матвєєва М.О., Клімович Б.В. **О чуттєвості твердіючого чавуну до енергоінформаційного впливу** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.–Випуск 3(50).–Дніпропетровськ. 2007. – С.136-138.

В статті наведені результати експериментальних досліджень енергоінформаційного впливу на твердіючий чавун. Отримані данні дозволяють вважати перспективним подальше розвинення цього напрямку для підвищення фізико-механічних властивостей сплавів.

УДК 622.785

Ковальов Д.А., Бабенко О.В., Ванюкова Н.Д., Ягольник М.В. **Дослідження механізму зміцнення залізомістких обкотишів з багатокомпонентної шихти при добавках портландцементу** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(50). – Дніпропетровськ. 2007. – С.139-149.

З залізовміщуючих відходів металургійного виробництва були отримані обкотиші на холодній зв'язці з використанням в якості в'язучих речовин портландцементу та вапна. Для опису залежності міцності безобпалювальних обкотишів від вмісту цих речовин складена математична модель. Доведено, що домішки твердого палива знижують міцнісні характеристики безобпалювальних обкотишів на холодній зв'язці.

УДК 519. 564. 536

Голуб І. В., Камкін Л.В. **Математичне моделювання процесів дегазації при позапічній обробці сталі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.–Випуск 3(50).–Дніпропетровськ. 2007. – С.150-153.

С использованием математической модели установлены возможности замены аргона азотом для сталей рядового сортамента и получены оптимальные соотношения газов в продувочной смеси, которая используется при обработке стали на установке печь ковш и при вакуумировании. При обработке стали на УВП оптимальный состав азота и аргона в составляет 1-3 и при вакуумировании 1:2. Использование азота как инертный газ в соответственной пропорции не изменяет свойства и структуру непрерывно литой заготовки.

UDK 519.2

A. Ligun, A. Shumejko, D. Timoshenko **Localization and forming of lines on the image** // System technologies. – № 3(50).–Dnepropetrovsk, 2007.–P.5-14.

Vector division of the image into layers with their following processing occupies the important part in program realization of electronic business documents. One of the major layers is the layer "business graphics" which includes a sublayer "lines". Work is devoted to new approaches to localization and forming of lines.

Bibl. 6, ill. 5.

UDC 629.4.016.12

Skalozub V.V., Ivanov O.P. **Control of the train's movement on the basis of the fussy description of the system's states** // System technologies. – № 3(50).–Dnepropetrovsk, 2007.–P.15-21.

In the clause decision of a problem for rational modes of trains control are considered. The approach using fussy models and methods of representation, the analysis and a choice of control is offered. As a matter of fact, base of fussy rules replacing by itself mathematical model of train's motion. It is possible to use the base of fussy rules, received during learning,

in the form of the adviser for a driver on a choice of control on the next site of a way in the terms of indetermination.

UDK 681.5:666.3/.7

Babenko T.V. **Researches of neural network structure for synthesis of the intellectual decision-making support's systems in tasks of technological processes' management** // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.–P.22-27.

The opportunity of Elman network usage in a quality of component of hybrid structure with approximation properties for the decision of tasks of physical and chemical parameters' sizes forecasting of water suspensions is considered

Bibl. 7, ill. 2.

UDC 004.773.3

Volkovskiy O.S., Vyborov E.V. **Heuristic-logical method meant for spam filtration** // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.–P.28-34.

Created the heuristic-logical model of the system meant for filtration the e-mail messages, arriving from the network, from the spam.

Bibl. 4, tabl. 3.

UDC 004.932

Kogut P.I., Serdjuk M.Ye. **On reconstruction problem of still images by their skeleton interpolation** // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.–P.35-45.

A variational formulation of the reconstruction problem of the still images is given. The sufficiently conditions of its solvability in the class of function of bounded variations is established.

UDC 621.039.555

Plakhotnik V.Yu. **Decision-making criterion for the coded aperture imaging system** // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.–P.46-54.

Analysis of the statistical characteristics peculiarities of correlation image in gamma ray imaging system is carried out. It is shown that traditional decision-making methods about a presence of a radiation source do not provide a desired confidence level. The method of decision-making criteria choice is proposed. The method is founded on a using of extreme value statistics.

Bibl. 8, fig. 3

UDC 528.235:681.3:628.1

Bakhrushin V.E., Mirosenko D.A. **GIS subsystem of city water supply network engineering design investigation and development** // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.–P.55-61.

Actuality of automated system for engineering design of city water supply network development by GIS technologies tools is proved. An algorithm of automated engineering design developed by authors is given.

UDC 004.414.041:658.51.012

T.V.Klimova, E.S. Yashyna **The application of the imitation modeling while planning the new equipment creation project with usage of the automatic machine theory** // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.–P.62-72.

The task of the project plan analysis by means of mathematic modeling of the project process realization is considered the expediency of application of the hybrid nondeterminate automatic machine to solve this task is based the project realization models, taking into account the equipment failure, are built.

UDC 629.7

Alpatov A.P., Byelonozhko P.A., Byelonozhko P.P., Vitushkin A.A., Fokov O.A. **Reflecting large surfaces in space. Antennas of satellite communications systems** // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.–P.73-87.

Creation of spacecraft with spatial distribution peripheral components is one of ways to develop modern satellites. Reflecting large surfaces used in satellite communications, radio-astronomy, solar power engineering are promising.

Designs of present-day space large antennas are considered, examples of using those antennas in satellite communications systems are cited.

Features of designs as mechanical objects which are important from the point of view of controlling their attitude and a shape of the reflecting surface are noted.

UDC 629.7

Alpatov A.P., Byelonozhko P.A., Byelonozhko P.P., Vitushkin A.A., Fokov O.A. **Reflecting large surfaces in space. Radio telescopes. Solar concentrators and reflectors of solar radiation** // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.–P.88-101.

Creation of spacecraft with spatial distribution peripheral components is one of ways to develop modern satellites. Reflecting large surfaces used in satellite communications, radio-astronomy, solar power engineering are promising.

Designs of up-to-date large radio telescopes integrated in space super-long-base radio interferometers are examined. Projects of systems using solar concentrators and reflectors of solar radiation are presented.

Features of designs as mechanical objects which are important from the point of view of controlling their attitude and a shape of the reflecting surface are noted.

UDC 530.1



Mikhalev A.I., Pomulev V.V., Gorb V.G., Poydak Yu.S. **Modelling dynamics of formation 3D metal structures on the basis of percolation clusters** // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.–P.102-108.

The article is devoted to percolational approach to construct models of 3D structures of metals and alloys. It is also offered method based on fractal and percolation analysis of estimating quantitative characteristics of 3D structures of metals.

Fig. 5. Ref.: 8 items. Tab. 1.

UDC 621.63: 621.51

Gotsulenko V.V., Gotsulenko V.N., Dubina O.V., Romanenko V.I., Sadovoi A.V., Stasevich R.K., Tishenko N.T. **To a problem of neutralization of surge two-stage supercharger** // System technologies. – № 3(50).–Dnepropetrovsk, 2007.–P.109-120.

Stochastic self-oscillations in system of air blast of blast furnaces with two-level a supercharger are theoretically determined and investigated.

Bibl. 11, ill.9.

UDC 539.3

Zelentsov D.G., Radul O.A., Korotkaya L.I. **The analysis of analytical formulas applicability when solving the problems of corroding bar constructions durability** // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.–P.121-129.

In this article the detailed analysis of previously derived dependence applicability is carried out. It is presented in the form of the analytical functions of arbitrary cross-section bar element durability subjected to corrosive wear. With the help of the approach based on the usage of catastrophes theory mathematical apparatus the peculiarities of durability functions are explained.

UDC 628.32:004

Averyanov V.S., Rorobochka A.N. **Development of the technological scheme tubeless filtering of water technological environments** // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.–P.130-135.

The scheme tubeless filtering of water technological environments is presented technological. Mathematical dependence for definition of the charge of the cleared liquid from mechanical impurity with use of energy of a free jet of a liquid which will allow repeated use of water environments at the motor transportation enterprises is received.

Bibl. 1, pic. 3.

UDK 621.785:681.785.369:681.785.789

Kiriya G.S., Matveeva M.O., Klimovich B.V. **About the sensitivity of freezing cast-iron to energoinformative influence** // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.–P.136-138.

In the article the results of experimental researches of influencing are resulted energoinformative influence on freezing cast-iron. Findings allow to consider perspective further development of this direction for the improvement of physics and mechanical properties of alloys.

UDC 622.785

Kovalyov D.A., Babenko A.V., Vanyukova N.D., Yagolnik M.V. **Research of mechanism of work-hardening of cold binder pellets from a multicomponent charge at additions of cement** // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.–P.139-153.

The cold binder pellets were got from iron containing wastes of metallurgical productions with the use as the connective materials cement and limes. For description of dependence of durability of cold binder pellets from maintenance of these matters a mathematical model is made. It is proved that additions of solid fuel reduce durability descriptions of cold binder pellets.

УДК 519. 564. 536

Golub I.V., Kamkina L.V. // System technologies. – № 3(50).– Dnepropetrovsk, 2007.– P.150-153.

The possibility of replace of argon on nitrogen was under study. It was found the optimal ration of nitrogen and argon in blowing mixtures: at heating in ladle furnace 1-3 and at vacuum degassing 1:2. Use of argon as inert gas was recommended for commercial structural steels without nitride forming elements.

## АВТОРЫ ВЫПУСКА

**Аверьянов Владимир Сергеевич** – аспирант кафедры “Автомобили и автомобильное хозяйство” Днепродзержинского государственного технического университета.

**Алпатов Анатолий Петрович** – д.т.н., профессор, заведующий отделом системного анализа и проблем управления, Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Днепропетровск.

**Бабенко Александр Викторович** - аспирант; НМетАУ.

**Бабенко Татьяна Васильевна** – к.т.н., доцент, руководитель информационно-компьютерного комплекса Национального горного университета.

**Бахрушин Владимир Евгеньевич** – д.ф.-м.н., профессор, директор НДЦ системного анализа, зав. кафедрой системного анализа и высшей математики Гуманитарного университета "Запорожский институт государственного и муниципального управления".

**Белоножко Павел Петрович** – к.т.н., научный сотрудник Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Днепропетровск.

**Белоножко Петр Алексеевич** - к.т.н., старший научный сотрудник Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Днепропетровск.

**Ванюкова Наталья Дмитриевна** - д.т.н., профессор НМетАУ.

**Вернигора В.Д.**

**Витушкин Андрей Андреевич** - младший научный сотрудник, Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Днепропетровск.

**Волковский Олег Степанович** - к.т.н., доцент кафедры Автоматизированных систем обработки информации факультета электроники, телекоммуникации и компьютерных систем Днепропетровского национального университета.

**Выборов Е.В.** - магистр кафедры Автоматизированных систем обработки информации факультета электроники, телекоммуникации и компьютерных систем Днепропетровского национального университета.

**Голуб Ирина Валериевна** - к.т.н., ассистент кафедры ТМП и ФХ, Национальной металлургической академии Украины.

**Горб Валерий Геннадьевич** – аспирант кафедры информационных технологий и систем Национальной металлургической академии Украины.

**Гоцуленко Владимир Владимирович** - преподаватель кафедры компьютерных информационных технологий, Институт предпринимательства “Стратегия”, г. Желтые Воды.

**Гоцуленко Владимир Николаевич** - к.т.н., доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Днепродзержинский государственный технический университет,.

**Дубина Олег Викторович** - к.т.н., Генеральный директор ОАО Днепропетровского металлургического комбината (ДМК).

**Зеленцов Дмитрий Геннадьевич** – к.т.н, доцент, заведующий кафедры высшей математики Государственного высшего учебного заведения «Украинский государственного химико-технологический университет».

**Иванов Александр Петрович** - Аспирант, ассистент кафедры компьютерных информационных технологий, Днепропетровский Национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна.

**Камкина Людмила Владимировна** - д.т.н., профессор, зав. кафедры ТМП и ФХ, Национальной металлургической академии Украины.

**Кирия Геннадий Шалвович** – к.т.н., доцент НМетАУ каф. литейного производства, г. Днепропетровск.

**Климова Татьяна Владимировна** – ст. преподаватель кафедры управления проектами, Национальная Металлургическая академия Украины.

**Климович Богдан Валериевич** – аспирант НМетАУ каф. литейного производства, г.Днепропетровск.

**Ковалев Дмитрий Арсентьевич** - д.т.н., профессор НМетАУ.

**Когут Петро Ілліч** – д.ф.-м.н., професор кафедри диференціальних рівнянь Дніпропетровського національного університету.

**Коробочка Александр Николаевич** – д.т.н., профессор, заведующий кафедры “Автомобили и автомобильное хозяйство” Днепродзержинского государственного технического университета.

**Короткая Лариса Ивановна** – ассистент кафедры высшей математики Государственного высшего учебного заведения «Украинский государственного химико-технологический университет».

**Кошлак Анна Владимировна** - инженер.

**Крюковська Ольга Анатоліївна** - доцент кафедры охраны труда и безопасности жизнедеятельности Днепродзержинского государственного технического университета.

**Лигун Анатолий Александрович** - д.ф.-м.н., профессор кафедры Прикладной математики Днепродзержинского государственного технического университета, лауреат гос. премии Украины в области науки и техники, заслуженный деятель науки и техники Украины.

**Матвеева Марина Олеговна** – к.т.н., доцент НМетАУ каф. литейного производства, г. Днепропетровск.

**Миросенко Дмитрий Алексеевич** – директор научно-производственного объединения "Геоинформатика".

**Михалёв Александр Ильич** – д.т.н., профессор, зав. кафедры информационных технологий и систем Национальной металлургической академии Украины.

**Плахотник В.Ю.** – НИПКИ “Искра”.

**Помулев Валерий Валериевич** – к.т.н., доцент, кафедра информационных технологий и систем Национальной металлургической академии Украины.

**Пройдак Юрий Сергеевич** - д.т.н., профессор, проректор по научной работе Национальной металлургической академии Украины.

**Радуль Оксана Анатольевна** – аспирант кафедры высшей математики Государственного высшего учебного заведения «Украинский государственного химико-технологический университет».

**Романенко Владимир Ильич** - к.т.н. И. О. генерального директора ОАО Днепропетровского металлургического комбината (ДМК).

**Садовой Александр Валентинович** - д.т.н., профессор. Днепропетровский государственный технический университет, проректор по научной работе.

**Сердюк Марина Євгенівна** – асистент кафедри основ творчості, інноватики і інтелектуалізації Національної металургійної академії України.

**Скалозуб Владислав Васильевич** - д.т.н., профессор, зав. кафедрой компьютерных информационных технологий, Днепропетровский Национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна.

**Соколовская Ирина Евгеньевна** - аспирант.

**Стасевич Ришард Казимирович** - к.т.н, ст. научный сотрудник НИП “Дія”.

**Тимошенко Диана Валериевна** - аспирант Днепропетровского государственного технического университета.

**Тищенко Николай Тарасович** - директор НИП “Дія”.

**Фоков Александр Анатольевич** – к.т.н., старший научный сотрудник, Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Днепропетровск.

**Шумейко Александр Алексеевич** - д.т.н., профессор кафедры Программного обеспечения и вычислительной техники Днепропетровского государственного технического университета.

**Ягольник Максим Викторович** - к.т.н.; НМетАУ.

**Яшина Елена Сергеевна** – к.т.н., доцент кафедры информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университета им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт".