

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА  
MATHEMATICS AND MECHANICS

**Тарануха Н.А., Петрова А.Н., Любушкина Н.Н.**  
**Taranukha N.A., Petrova A.N., Lyubushkina N.N.**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
НЕСТАНДАРТИЗИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА УПРУГОЙ СВЯЗИ  
ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

**DEFINING STIFFNESS PROPERTIES OF NON-STANDARDIZED ELASTIC CON-  
STRAINT MATERIALS IN A DYNAMIC SYSTEM**



**Тарануха Николай Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина 27; (4217) 54-30-74. E-mail: taranukha@knastu.ru.

**Mr.Nikolay A. Taranukha** – Doctor of Engineering, Head of the Shipbuilding Department, Komsomolsk-on-Amur Technical University, e-mail: taranukha@knastu.ru



**Петрова Анна Николаевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: petrovaan2006@yandex.ru

**Ms.Anna N. Petrova** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Computer Software and Computing, Komsomolsk-on-Amur Technical University, e-mail: petrovaan2006@yandex.ru



**Любушкина Надежда Николаевна** – доцент кафедры промышленной электроники Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: nadka\_lub@mail.ru

**Ms.Nadezhda N. Lyubushkina** – Assistant Professor, Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur Technical University, e-mail: nadka\_lub@mail.ru

**Аннотация.** В статье приводятся математические модели для определения функций коэффициента жесткости и единичного коэффициента жесткости нелинейно-упругого материала. Исследуется возможность распространения зависимостей, полученных для одного образца, на варианты образцов с другими геометрическими параметрами (длины, площади и формы поперечного сечения).

**Summary:** The paper proposes a mathematical model for determining the functions of the stiffness ratio and unitary stiffness ratio in a nonlinear elastic material. A possibility is considered to apply the dependences derived for one sample to other samples with other geometric parameters (length, area and cross section shape).

**Ключевые слова:** жесткость, большие деформации, математическая модель.

**Key-words:** stiffness, large deformations, mathematical model

УДК 539.3:534.1:517.958

**Введение**

Основными параметрами, описывающими поведение динамической системы, являются частота и декремент затухания. Как известно, собственная частота ( $\lambda$ ) определяется по

формуле  $\lambda(C) = \sqrt{\frac{C}{M}}$ , где  $C$  – суммарная жесткость элементов, сходящихся в узле;  $M$  – суммарная масса [2; 3; 5].

Задача, рассматриваемая в данной статье, состоит в определении коэффициента жесткости образца упругой связи нестандартизированного материала динамической системы. Требуется исследовать возможность применимости данных модельного эксперимента для расчетов реальной конструкции со стержнями из того же материала, но с другими геометрическими параметрами (длина, площадь и форма поперечного сечения).

В качестве нестандартизированного материала выбрана резина. Ее свойства зависят от количества присадок и параметров вулканизации.

### Определение коэффициента жесткости системы

Коэффициент жесткости системы зависит от свойств материала, размеров стержня, деформации. У исследуемого материала, допускающего большие деформации, зависимость  $\sigma(\varepsilon)$  является нелинейной функцией деформации так же, как и функция  $P(\Delta l)$ , поэтому и жесткостная характеристика будет нелинейная.

Теоретический коэффициент жесткости согласно закону Гука определяется по формуле

$$C^{теор} = \frac{E \cdot F}{l_0},$$

где  $E$  – модуль упругости материала;  $F$  – площадь поперечного сечения образца;  $l_0$  – начальная длина образца.

Коэффициент жесткости системы  $C(\Delta l)$  в общем виде определяется некоторой нелинейной функцией. По экспериментальным данным он определяется из отношения:

$$C_i^{экс} = \frac{P_i}{l_i - l_0} = \frac{P_i}{\Delta l_i}. \quad (1)$$

В ходе исследования материалов, допускающих большие деформации и, как следствие, изменение объема, была получена нелинейная деформационная характеристика. По полученной зависимости определено выражение обобщенного закона деформирования для расчета функции модуля упругости. Модуль упругости назван приведенным  $E_{np}$ . Поскольку он получен для обобщенного закона деформирования, то это обстоятельство следует учитывать при определении коэффициента жесткости.

Введем понятие единичного коэффициента жесткости:

$$C^1(\Delta l) = \frac{C(\Delta l)}{F(\Delta l)}. \quad (2)$$

С учетом (1) единичный коэффициент жесткости имеет вид:

$$C^1(\Delta l) = \frac{P_i}{\Delta l \cdot F(\Delta l)} = \frac{\sigma(\varepsilon(\Delta l))}{\Delta l},$$

а с учетом определения  $E_{np}$ , он определяется как:

$$C^1(\Delta l) = \frac{E_{np}(\Delta l) \cdot (\varepsilon_x(\Delta l) + \varepsilon_y(\Delta l) + \varepsilon_z(\Delta l))}{\Delta l}. \quad (3)$$

Таким образом, коэффициент жесткости равен:

$$C_{np}(\Delta l) = \frac{E_{np}(\Delta l) \cdot (\varepsilon_x(\Delta l) + \varepsilon_y(\Delta l) + \varepsilon_z(\Delta l)) \cdot F(\Delta l)}{\Delta l}. \quad (4)$$

На рис. 1 построены зависимости коэффициентов жесткости от удлинения, определенные экспериментально по (1) и теоретически по (4). Графики изменения коэффициента жесткости показаны для образцов разных форм поперечных сечений: 1 – круглой; 2 – квадратной; 3 – прямоугольной. Экспериментальные зависимости обозначены соответственно: 1э, 2э, 3э.

Графики изменения коэффициентов жесткости подтверждают гипотезу, что коэффициент жесткости величина не постоянная. Коэффициент жесткости  $C_{пр}$ , вычисленный через приведенный модуль деформации, имеет отклонение от экспериментального 1,3 %.

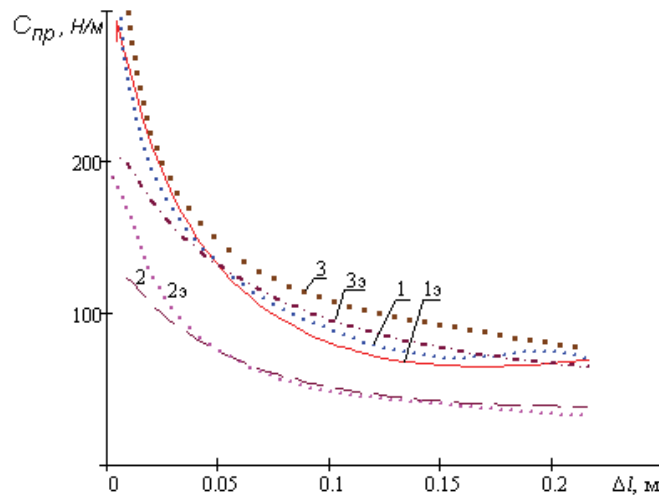


Рис. 1. Коэффициенты жесткости, вычисленные по приведенному модулю деформации

Модели коэффициента жесткости упругой связи будут использованы в дальнейших расчетах колебаний динамических систем с большими деформациями. Для того чтобы определить, как коэффициент жесткости зависит от геометрии образца (длины, площади и формы поперечного сечения), требуется провести экспериментальное исследование.

### Исследование коэффициента жесткости материала упругой связи в зависимости от длины образца

На рис. 2, а показана характеристика удлинения  $P(\Delta l)$  10 образцов (при постоянной форме поперечного сечения). Длина образцов менялась от 0,05 до 0,5 м с шагом 0,05 м. По характеристике удлинения построена деформационная характеристика (см. рис. 2, б).

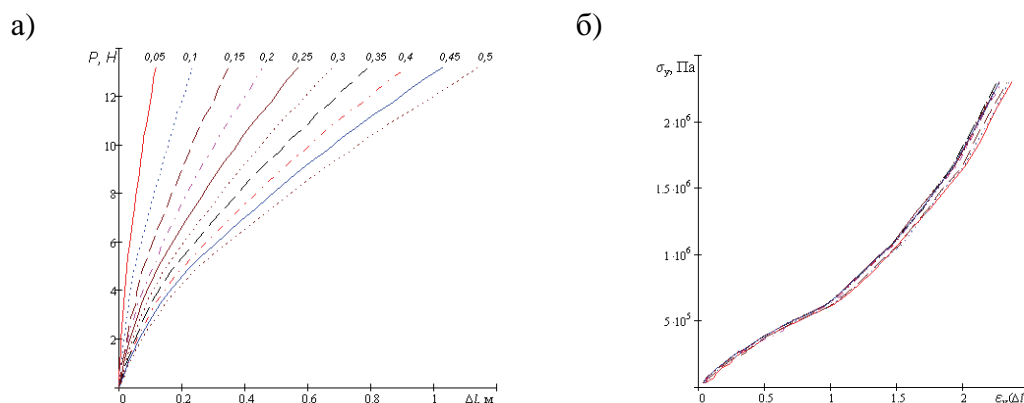


Рис. 2. Характеристики материала в зависимости от длины образца:  
 а – удлинение образцов в зависимости от величины приложенной силы;  
 б – деформационная характеристика

Зависимость напряжения от деформации для 10 образцов имеет общий характер. Коэффициентом пропорциональности является один модуль упругости. По известным значениям удлинения для каждого образца по (1) определены экспериментальные коэффициенты жесткости. Графики показаны на рис. 3, а.

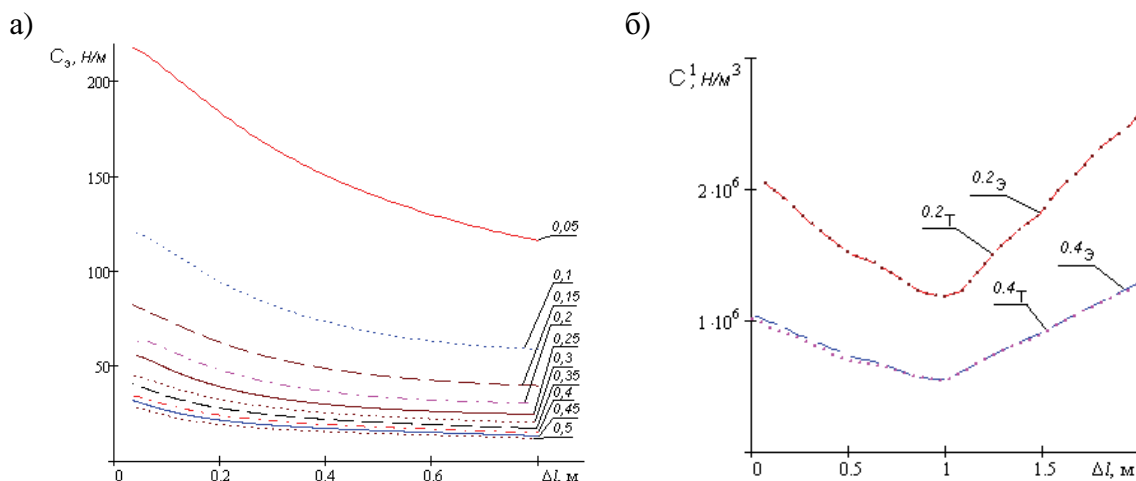


Рис. 3. Исследование коэффициента жесткости в зависимости от длины образца: *а* – экспериментальный коэффициент жесткости; *б* – единичный коэффициент жесткости

По графикам видно, что с увеличением длины образца коэффициент жесткости уменьшается, образец теряет свою жесткость.

Единичный коэффициент жесткости  $C^1(\Delta l)$  по экспериментальным данным определен по формуле

$$C^1 = \frac{P}{\Delta l \cdot F},$$

теоретический единичный коэффициент жесткости вычислен по (3).

При этом для нахождения теоретического единичного коэффициента жесткости всех образцов использован общий приведенный модуль упругости, найденный для образца длиной 0,2 м. На рис. 3, б построены графики экспериментального и теоретического единичного коэффициентов жесткости, вычисленного по приведенному модулю упругости (3), для двух образцов длиной 0,2 и 0,4 м. Пунктиром на рис. 3, б показаны графики единичного коэффициента жесткости, найденные по экспериментальным данным, теоретические графики приведены точками.

Таким образом, найти коэффициент жесткости для образца любой длины можно по результатам исследования одного опытного образца.

### Исследование коэффициента жесткости материала упругой связи в зависимости от формы поперечного сечения образца

Проведены исследования образцов трех форм поперечного сечения: круглого, квадратного и прямоугольного с соотношением сторон  $1 \times 2$ . Для данных образцов выполнены эксперименты на растяжение, определены коэффициенты жесткости.

Коэффициент формы поперечного сечения определяется выражением:

$$K_\phi = \frac{F}{S},$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения;  $S$  – периметр поперечного сечения.

Если  $F = 1 \text{ м}^2$ , то коэффициент формы единичного поперечного сечения определяется по формуле

$$K_{\phi} = \frac{1}{S}.$$

Данный коэффициент уникальным образом определяет форму образца. Необходимо определить коэффициент формы для образцов различных форм поперечного сечения (см. рис. 4).

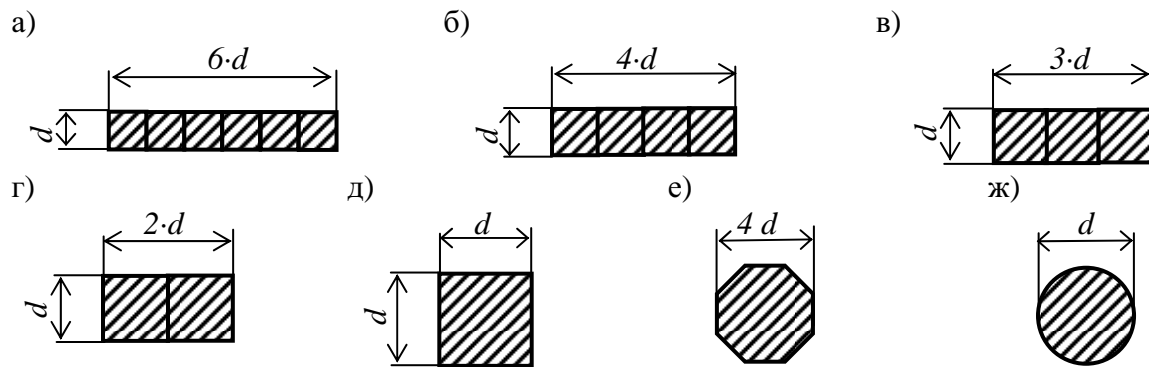


Рис. 4. Виды поперечных сечений образцов

Размер  $d$  находится из условия, что площади всех образцов равны  $1 \text{ м}^2$ . Значения коэффициентов приведены в табл. 1. Круглое поперечное сечение имеет самый большой коэффициент формы, т.к. данная форма самая оптимальная. Существуют коэффициенты формы со значениями  $K_{\phi} < 0,175$  м, но их нельзя относить к стержням. Стержневые элементы имеют коэффициенты формы в диапазоне  $0,236 - 0,282$  м.

Таблица 1

Площадь	$d$ , м	Периметр	Значение коэффициента формы, м	
$F_{1 \times 6} = 6 \cdot d^2$	0,408	$S_{1 \times 6} = 14 \cdot d$	$K_{\phi.1 \times 6} = \frac{3}{7} d$	0,175
$F_{1 \times 4} = 4 \cdot d^2$	0,5	$S_{1 \times 4} = 10 \cdot d$	$K_{\phi.1 \times 4} = \frac{2}{5} d$	0,2
$F_{1 \times 3} = 3 \cdot d^2$	0,577	$S_{1 \times 3} = 8 \cdot d$	$K_{\phi.1 \times 3} = \frac{3}{8} d$	0,217
$F_{1 \times 2} = 2 \cdot d^2$	0,707	$S_{1 \times 2} = 6 \cdot d$	$K_{\phi.1 \times 2} = \frac{1}{3} d$	0,236
$F_{1 \times 1} = 1 \cdot d^2$	1	$S_{1 \times 1} = 4 \cdot d$	$K_{\phi.1 \times 1} = \frac{1}{4} d$	0,25
$F_{\text{восьм}} = 14 \cdot d^2$	0,267	$S_{\text{восьм}} = 13,64 \cdot d$	$K_{\phi.\text{восьм}} = \frac{14}{13,64} d$	0,275
$F_{\text{круг}} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$	1,128	$S_{\text{круг}} = \pi \cdot d$	$K_{\phi.\text{круг}} = \frac{1}{4} d$	0,282

Проведены исследования образцов трех форм поперечного сечения: круглого, квадратного и прямоугольного с соотношением сторон  $1 \times 2$ . Для данных образцов выполнены эксперименты на растяжение, определены коэффициенты жесткости. Коэффициент жестко-

сти зависит от площади поперечного сечения, поэтому коэффициент жесткости, приходящийся на единицу площади  $C^1$  найден по (2).

На рис. 5 построена зависимость единичного коэффициента жесткости (вычисленного через приведенный модуль упругости) от коэффициента формы. Точками обозначены значения единичных коэффициентов, определенные по экспериментальной зависимости. Линиями показаны распределения теоретических единичных коэффициентов жесткости, вычисленных через приведенный модуль для разных относительных деформаций.

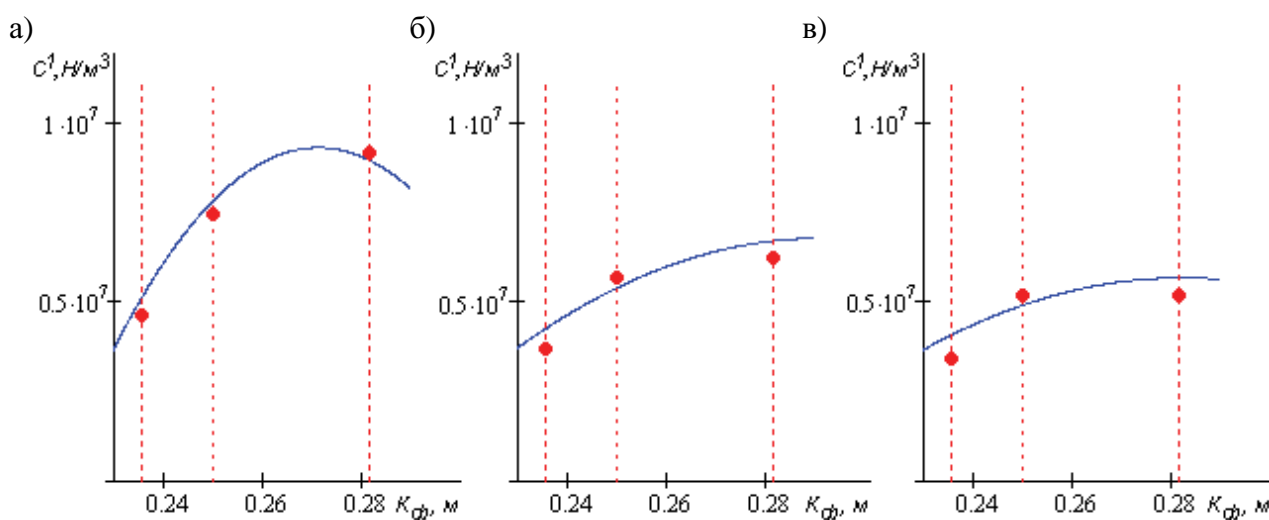


Рис. 5. Зависимость единичного коэффициента жесткости от коэффициента формы: а – для 20 % деформации; б – для 40 % деформации; в – для 60 % деформации: точки – экспериментальные значения; линии – расчетные значения

По рис. 5 видно, что имеется хорошее совпадение между теоретическим и экспериментальным значениями коэффициентов жесткости. В табл. 2 представлены среднеквадратичные погрешности определения единичного коэффициента жесткости через приведенный модуль упругости.

Таблица 2

Относительная деформация, %	20	40	60
Среднеквадратичная погрешность определения, %	3,6	5,9	7,7

Из табл. 2 видно, что максимальная погрешность определения единичного коэффициента жесткости по приведенному модулю упругости составляет 7,7 %, что говорит о близости к экспериментальному распределению. Если выполнить аналогичные вычисления единичного коэффициента жесткости через касательный модуль упругости, то максимальная относительная погрешность составит 14,9 %, что недопустимо.

Решение данной проблемы иным путем дает менее точные результаты, но требует меньшего количества модельных экспериментов.

На рис. 6 приведены графики изменения произведения единичной жесткости на начальную длину  $C^1 \cdot l_0$  для образцов с различной формой поперечного сечения.

Так как в пределах линейного закона Гука выполняются соотношения:

$$C^1 \cdot l_0 = \frac{C \cdot l_0}{F} = \frac{P \cdot l_0}{\Delta l \cdot F} = \frac{\sigma \cdot l_0}{\Delta l} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E,$$

то для нелинейно-упругого материала графики должны быть близки. Расхождение графиков, приведенных на рис. 6, не превосходит 2 %.

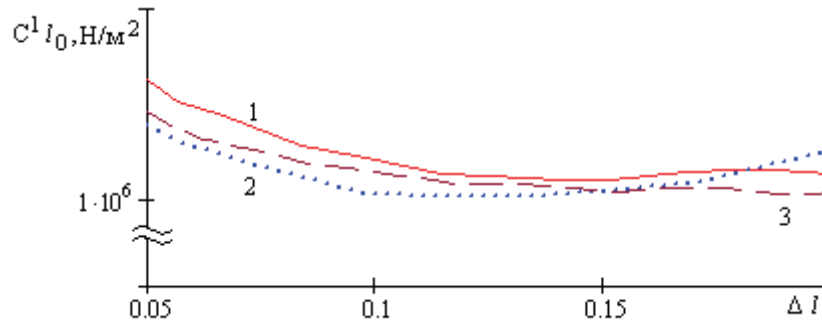


Рис. 6. Графики изменения  $C^1 \cdot l_0$  от формы поперечного сечения

На рис. 7 приведены графики зависимости единичного коэффициента жесткости для различных форм и площадей поперечного сечения, различных начальных длин образцов, рассчитанных теоретически по (3), используя экспериментальные данные образца с круглым сечением. Для сравнения приведены экспериментально определенные значения единичного коэффициента жесткости для каждой формы поперечного сечения.

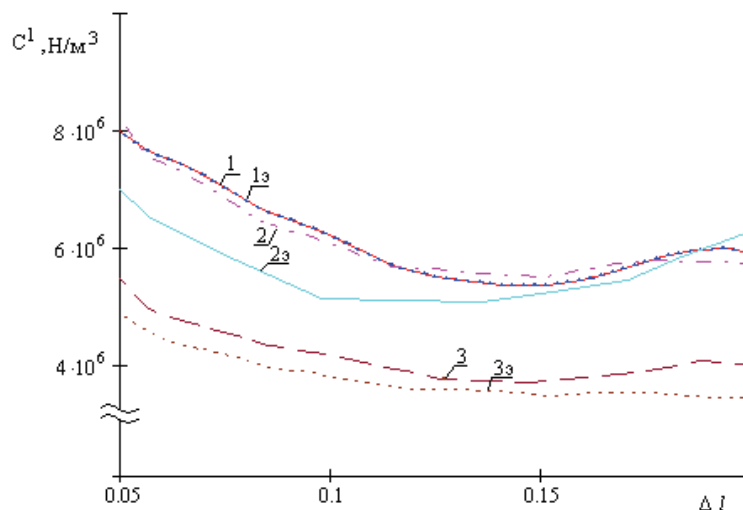


Рис. 7. График изменения единичного коэффициента жесткости от формы поперечного сечения

Из анализа графиков можно сделать вывод, что полученное выражение для расчета единичной жесткости (3) можно использовать для расчета единичной жесткости произвольного стержня (с другой формой и площадью поперечного сечения) по данным модельного эксперимента. Относительная погрешность расчетов составляет 8,9 %.

Итак, в работе приведена формула для расчета коэффициента жесткости (4) и единичного коэффициента жесткости (3). Дальнейшие исследования показали пригодность полученных формул для расчетов колебательных процессов [1; 4; 5].

### **Заключение**

В результате исследований было доказано, что, имея данные модельного эксперимента, можно рассчитать коэффициент жесткости стержня из того же материала, произвольной длины, площади и формы поперечного сечения. Этот вывод был использован при исследовании динамических систем из нестандартизированного материала с большими деформациями.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Любушкина, Н. Н. Программно-информационное обеспечение задачи о колебаниях стержня с большими деформациями / Н. Н. Любушкина, А. Н. Петрова, Н. А. Тарануха // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2 (14). – С. 30-39.
2. Тарануха, Н. А. Математическое моделирование колебаний сложных оболочек. Гидроупругая постановка с учетом сопротивления / Н. А. Тарануха, О. В. Журбин. – Владивосток: Дальнаука, 2008. 253 с.
3. Тарануха, Н. А. Математическое моделирование колебательных процессов в стержне с большими деформациями / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КНАГТУ», 2007. – 19 с. – Деп. в ВИНТИ 26.09.2007. 903-В2007.
4. Тарануха, Н. А. Программно-аппаратный комплекс по обработке результатов эксперимента колеблющейся системы / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КНАГТУ», 2007. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ 26.09.2007. 902-В2007.
5. Тарануха, Н. А. Механика морских динамических систем с большими деформациями из нестандартизированного материала / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Морские интеллектуальные технологии. – 2010. – № 3.
6. Тарануха, Н. А. Математическая модель шарнирной стержневой системы с большими перемещениями узлов / Н. А. Тарануха, К. В. Жеребко, А. Н. Петрова, М. Р. Петров // Известия вузов. – Строительство. – 2003. – № 3. – С. 12–18.

**Бердонос В.Д., Редколис Е.В.**  
**Berdonosov V.D., Redkolis E.V.**

**О КЛАССИФИКАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СОЗДАНИЯ ПРОГРАММ (CASE)**

**ON CLASSIFICATION OF COMPUTER-AIDED SOFTWARE ENGINEERING SYSTEMS (CASE)**



**Бердонос Витор Дмитриевич** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681024, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Интернациональный 59 – 5; +7 (962) 2875141. E-mail: ktriz@knastu.ru.

**Berdonosov Victor D.** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Information Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. 681024, Komsomolsk-on-Amur. E-mail: ktriz@knastu.ru



**Редколис Елена Валерьевна** – аспирант кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 42/3 – 6; +7 (924) 2257042. E-mail: Lulumzja@mail.ru.

**Redkolis Elena V.** – PhD Candidate, Department of Information Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. 681013, Komsomolsk-on-Amur. E-mail: Lulumzja@mail.ru

**Аннотация.** Авторы с различной степенью глубины ознакомились с несколькими сотнями CASE-систем. Предлагается рассмотреть эволюцию CASE-систем. При этом движущей силой эволюции является разрешение противоречий, возникающих на предыдущих стадиях, причём разрешение противоречий осуществляется инструментами ТРИЗ. Критериями, в соответствии с которыми происходило и происходит развитие CASE-систем, являются полезность и затратность. В работе выделены линии эволюции CASE-систем, их достоинства и недостатки, а также проанализированы назначение и тенденции развития каждой линии. Использование данного подхода для целей обучения позволяет значительно сократить время на освоение всего разнообразия CASE-систем за счёт систематизации знаний. С другой стороны, такая систематизация позволит, во-первых, выявить приоритетные направления дальнейшего развития CASE-систем, во-вторых, существенно упростит подбор подходящей для целей использования CASE-системы на предприятии и, в-третьих, апробировать применение инструментов ТРИЗ для разрешения противоречий, возникающих в CASE-системах.

**Summary:** The authors of the present paper have reviewed several hundreds of Computer-Aided Software Engineering (CASE) systems. It is proposed to examine the evolution of CASE-systems. Herewith, the motivating force of this evolution is viewed as the resolution of conflicts that appeared at the previous stages; such contradictions/conflicts are resolved using TRIZ tools. The criteria that are linked to the TRIZ concept of «ideality» and according to which CASE-systems develop are practicality and investment. In the paper, the CASE-systems development lines are singled out, their advantages and disadvantages and the purpose and development trends of each line are analyzed. Application of this approach for training allows reducing significantly the time needed for learning different CASE-systems, by means of knowledge systematization. On the other side, this systematization will allow 1) to identify the priority development areas for CASE-systems, 2) to simplify significantly the choice of CASE-systems being used at enterprises, and 4) to approve the TRIZ tools application for contradiction resolution in CASE-systems.

**Ключевые слова:** CASE, жизненный цикл программного обеспечения, процессно-ориентированный подход, систематизация знаний.

**Keywords:** CASE, software life cycle, process-oriented approach, systematization of knowledge

УДК 007

### **Введение**

В работах [1; 2] предлагается использовать ТРИЗ для систематизации знаний исследуемой предметной области. Для относительно простой с точки зрения эволюции развитие предметной области (или её фрагмента) можно представить вектором. В этом векторе объекты исследуемой предметной области выстраиваются по степени увеличения идеальности в ТРИЗовском смысле, а переход от объекта к объекту реализуется как последовательное преодоление противоречий инструментами ТРИЗ. Для более сложных предметных областей рассматривается не вектор, а карта (матрица), в которой представлен вектор групп объектов, и каждая группа тоже в свою очередь представлена векторами. Например, для предметной области «Численные методы» [2, 17]: группы объектов – это математические модели реального физического мира, а сами объекты – это методы реализации соответствующей модели. Таким образом, для построения карты эволюции необходимо:

- собрать сведения об объектах исследуемой предметной области;
- выявить группы объектов и оценить идеальность каждой группы;
- расположить группы объектов по степени увеличения идеальности;
- выявить определяющее противоречие для каждой группы;
- определить инструмент ТРИЗ, разрешивший противоречие;
- проделать приведённые выше шаги для объектов каждой группы.

Использование такого подхода к классификации объектов рассматриваемой предметной области позволяет выделить логику систематизации, которая заключается в увеличении идеальности. Движение по линиям увеличения идеальности сопровождается логическими метками – приёмами разрешения противоречий. Это позволяет значительно быстрее освоить классификацию.

### **Эволюция CASE-систем**

Первоначально термином «CASE» определялись инструменты автоматизированного проектирования и создания программных средств. Акроним «CASE» был введен компанией, занимавшейся производством программного обеспечения (ПО), «Nastec Corporation of Southfield» в 1982 г. по отношению к интегрированному графическому и текстовому редактору «GraphiText».

Однако буква «S» в акрониме «CASE» последние 5-6 лет трактуется в более широком смысле: и как первоначальное «software», и как «system». Обусловлено это тем, что ПО – частный случай систем вообще. В настоящее время к функциям CASE-систем относится поддержка практически всего жизненного цикла (ЖЦ) не только ПО, но и организационно-управляющих систем. CASE-системы автоматизируют методы проектирования, документирования и разработки структурированного компьютерного кода на желаемом языке программирования, проводят анализ и частичную оптимизацию систем и др.

В настоящее время, по некоторым публикациям, используются более трех сотен CASE-систем. Естественно, ориентироваться в таком многообразии достаточно тяжело.

### Классификация CASE-систем

На сегодняшний день существует ряд классификаций CASE-систем, классификационными признаками в которых выступают: поддерживаемые этапы ЖЦ ПО, используемый тип (или вид) моделирования, степень интегрированности системы с СУБД, степень интегрированности по выполняемым функциям, применяемые методологии и модели, доступные платформы и т.д. Однако ни одна из них не дает исчерпывающей систематизации рассматриваемым системам.

Наиболее проработанной и обоснованной представляется классификация, созданная в 1993 г. А. Фуггетта [3] (профессор информатики в Политехническом университете Милана, старший исследователь в Центре исследования и образования в области информационных технологий (SEFRIEL)), положенная в основу данной работы.

В своей работе А. Фуггетта подробно рассматривает имеющиеся к 1993 г. попытки классифицирования CASE-систем, выявляет их достоинства и недостатки, а также представляет вниманию читателей собственный вариант классификации.

Классификация выполнена по категориям CASE-систем и отражает степень интегрированности по выполняемым функциям. Все рассматриваемые системы разделены им на три класса [3, 28]:

1 «Tools» – инструменты, поддерживающие только определенные задачи в процессах ЖЦ ПО и организационно-управляющих систем.

2 «Workbenches» – рабочие приложения, поддерживающие только определенный вид деятельности. Могут включать в себя системы класса «Tools» или иметь самостоятельную сложную модульную структуру.

3 «Environments» – программные среды, поддерживающие все (или большую часть) процессы ЖЦ ПО и организационно-управляющих систем. Могут включать в себя системы классов «Tools», «Workbenches».

Такое разделение актуально и в настоящее время.

В процессе работы нами были пересмотрены все классы в классификации А. Фуггетта и внесены некоторые изменения (см. рис. 1):

1 «Tools» [3, 29]:

а) *инструменты редактирования* («editing tools» или «editors»);

б) *инструменты программирования* («programming tools»), которые поддерживают различные функции программирования;

в) *инструменты верификации и валидации* («verification and validation tools»). Целью валидации является гарантирование того, что функции реализованного продукта полностью соответствуют желаниям потребителя. Целью верификации – гарантирование того, что структура продукта полностью соответствует установленным требованиям;

г) *инструменты управления конфигурацией* («configuration-management tools»), которые осуществляют управление и контроль функционирования сложных систем, спроектированных из многих частей;

д) *инструменты управления проектами* («project-management tools»).

2 «Workbenches» [3, 32]:

а) *рабочие приложения для бизнес-планирования и моделирования* («business planning and modeling workbenches»), которые поддерживают выявление и формализацию сложных бизнес-процессов;

б) *рабочие приложения для анализа и проектирования* («analysis and design workbenches»), которые автоматизируют большинство методологий анализа и проектирования;

в) *рабочие приложения для разработки пользовательского интерфейса* («user-interface development workbenches»);

г) *рабочие приложения для проектирования и программирования файлов и баз данных* («programming and designing of databases and files workbenches»), которые поддерживают расширенные функции программирования;

д) *рабочие приложения для верификации и валидации* («verification and validation workbenches»), которые содержат модули и встроенные системы тестирования;

е) *рабочие приложения для проведения обратного проектирования и технической поддержки* («maintenance and reverse-engineering workbenches»);

ж) *рабочие приложения для управления конфигурацией* («configuration-management workbenches»), которые поддерживают контроль версий, управление изменениями, учет состояния объектов конфигурационного управления, возможность разработки приложений «клиент-сервер» требуемой конфигурации и т.д.

3 «Environments» [3, 34]:

а) *инструментальные программные среды* («toolkits») – свободно интегрируемые наборы инструментальных средств, легко расширяемые посредством соединения различных CASE-систем классов «Tools» и «Workbenches». Поддержка ограничивается функциями программирования, управления конфигурацией и управления проектами;

б) *языко-ориентированные программные среды* («language-centered environments»), написанные под определенный язык, позволяют пользователям объединять несколько сред или расширять их функциональность посредством написания дополнительных модулей;

в) *интегрированные программные среды* («integrated environments»), которые имеют однородный совместимый интерфейс и общую базу данных, обеспечивающую централизованное управление информацией;

г) *программные среды четвертого поколения* («fourth generation environments»), которые поддерживают обработку сложно структурированных данных и разработку определенного класса программ: программы обработки электронных данных, бизнес-ориентированные приложения;

д) *процессо-ориентированные программные среды* («process-centered environments»), которые базируются на формализации бизнес-процессов. Разработка в таких системах осуществляется посредством автоматизации фрагментов процессов.

Рассмотренные примеры CASE-систем были распределены по группам классификации (см. рис. 1, приложение 1, табл. П1.1). Следует отметить, что примеры CASE-систем были отобраны на основе обзоров фирм-разработчиков систем, упоминаний в периодических изданиях, а также отзывов компаний, использующих CASE-системы.

Отметим, что данная классификация не является полностью законченной. Перспективным является выделение в классах «Tools» и «Workbenches» групп, в зависимости не от выполняемых функций, а от технологии и специфики их реализации (подобное выделение групп сейчас имеет место в классе «Environments»). Однако выполнение такой работы требует наличия большей информации о специфических особенностях построения и функционирования CASE-систем. Такого рода информация может быть получена от производителей и поставщиков CASE-систем, а также путем непосредственного тестирования доступных на рынке систем.

### **Направления эволюции CASE-систем**

Рассмотрим эволюцию CASE-систем в виде матрицы [1]. Отметим, что при этом движущей силой эволюции является разрешение противоречий, возникающих на предыдущих стадиях, разрешение которых осуществляется инструментами ТРИЗ [2, 18], а сама эволюция характеризуется повышением идеальности.

Перечислим критерии, связанные с ТРИЗовским понятием «идеальности», в соответствии с которыми происходило и происходит развитие CASE-систем:



1 Критерии, отражающие полезность использования CASE-систем (распределены по фазам ЖЦ ПО).

1.1 Фаза формирования требований. Критерии:

1.1.1 Ввод и редактирование спецификаций требований и проектных спецификаций.

1.2 Фаза проектирования. Критерии:

1.2.1 Построение диаграмм:

1.2.1.1 Бизнес-процессов;

1.2.1.2 Данных;

1.2.1.3 Пользовательских диаграмм;

1.2.1.4 Прочих типов диаграмм.

1.2.2 Анализ моделей.

1.2.3 Контроль построения диаграмм:

1.2.3.1 Контроль соответствия декомпозиций диаграмм;

1.2.3.2 Контроль соответствия диаграмм разных типов.

1.2.4 Оптимизация:

1.2.4.1 Бизнес-процессов;

1.2.4.2 Данных.

1.2.5 Имитационное моделирование.

1.2.6 Синтаксический и семантический контроль проектных спецификаций.

1.2.7 Проектирование интерфейса:

1.2.7.1 Проектирование архитектуры ПО;

1.2.7.2 Прототипирование;

1.2.7.3 Генерация экранных форм.

1.2.8 Возможность трассировки.

1.2.9 Возможность создания библиотек моделей, словарей.

1.2.10 Автоматизированное проектирование отчетов.

1.3 Фаза реализации. Критерии:

1.3.1 Работа с кодом:

1.3.1.1 Синтаксически управляемое редактирование;

1.3.1.2 Генерация кода;

1.3.1.3 Компиляция кода;

1.3.1.4 Генерация структуры базы данных, а также фрагментов кода для СУБД;

1.3.1.5 Анализ правильности модели данных;

1.3.1.6 Обратный инжиниринг;

1.3.1.7 Анализ исходного кода;

1.3.1.8 Реструктуризация исходного кода.

1.3.2 Документирование:

1.3.2.1 Проверка полноты и непротиворечивости документации в соответствии со стандартами документирования;

1.3.2.2 Редактирование с помощью форм;

1.3.2.3 Возможности издательских систем;

1.3.2.4 Поддержка функций и форматов гипертекста;

1.3.2.5 Извлечение данных из хранилища;

1.3.2.6 Генерация документации по стандартам;

1.3.2.7 Генерация документации по спецификациям пользователя.

1.4 Фаза тестирования и отладки. Критерии:

1.4.1 Описание тестов;

1.4.2 Фиксация и повторение действий оператора;

1.4.3 Автоматический запуск тестовых примеров;

- 1.4.4 Регрессионное тестирование;
  - 1.4.5 Автоматизированный анализ результатов тестирования;
  - 1.4.6 Анализ тестового покрытия;
  - 1.4.7 Анализ производительности;
  - 1.4.8 Анализ исключительных ситуаций при тестировании;
  - 1.4.9 Динамическое моделирование среды;
  - 1.4.10 Отладка.
  - 1.5 Фаза внедрения. Критерии:
    - 1.5.1 Управление конфигурацией:
      - 1.5.1.1 Контроль доступа и изменений;
      - 1.5.1.2 Управление версиями;
      - 1.5.1.3 Учет состояния объектов конфигурационного управления;
      - 1.5.1.4 Архивирование.
    - 1.5.2 Возможность разработки приложений «клиент-сервер» требуемой конфигурации.
    - 1.5.3 Возможность адаптации проекта к различным системно-техническим платформам.
  - 1.6 Прочие фазы (сопровождение, эксплуатация). Критерии:
    - 1.6.1 Возможность экспорта данных (открытость архитектуры, количество совместимых приложений и форматов);
    - 1.6.2 Интеграционные возможности, импорт данных;
    - 1.6.3 Возможность поддержки нескольких языков программирования, сред разработки;
    - 1.6.4 Управление проектами;
    - 1.6.5 Поддержка коллективной работы.
- 2 Критерии, отражающие:*
- 2.1 Стоимость приобретения;
  - 2.2 Стоимость инсталляции;
  - 2.3 Стоимость первоначальной адаптации к условиям конкретной фирмы;
  - 2.4 Стоимость обучения;
  - 2.5 Стоимость сопровождения;
  - 2.6 Стоимость технической поддержки.

Для построения линий эволюции все рассматриваемые CASE-системы были оценены по выделенным критериям. Оценка производилась на основании материалов обзоров производителей и поставщиков систем, а также на основании отзывов покупателей и на основании опыта работы авторов данной статьи с некоторыми системами.

Кроме того, при построении линий развития была выделена группа свободно распространяемых CASE-систем (псевдоидеальных систем). К системам этой группы относятся, как правило, малофункциональные продукты класса Tools, свободно предоставляемые на рынке CASE-систем: ArchE, Topcased, AmaterasUML, Umbrello UML Modeller, Open ModelSphere, StarUML, Jink-uml, Fujaba, Poseidon, MOSKitt, BOUML, Acceleo, Astade, Gmodeler, Case/4/0, Violet, ArgoUML, TAU, SQLyog, Software Ideas Modeler, UMLet, ADONIS, Dia, dbForge Studio for MySQL.

С точки зрения здравого смысла системы этой группы, ввиду ограниченности своей функциональности, находятся в начале вектора эволюции (как и все системы класса «Tools» по отношению к классам «Workbenches» и «Environments»). Однако, возможно, получение дополнительной информации о значениях критериев 2.2-2.5 для таких систем поможет более точно определить место систем в общей линии эволюции.

Графики идеальности, полезности и затратности CASE-систем классов «Tools» и «Workbenches» представлены на рис. П1.1, а и рис. П1.2, а приложения 1. Также на графике присутствует линия скорректированной идеальности.

Коррекция идеальности была выполнена по причине того, что многие системы имеют расширенную функциональность в рамках только одной фазы ЖЦ и не поддерживают другие фазы (или не имеют возможности интеграции с системами, поддерживающими другие фазы). Коррекция была произведена путем умножения показателя идеальности на отношение количества фаз ЖЦ, поддерживаемых определенной системой, к количеству фаз ЖЦ в целом, охватываемых CASE-системами.

### Формулирование противоречий

После того как для каждой рассматриваемой CASE-системы были получены значения идеальности, примеры конкретных систем были соотнесены с классификацией (см. рис. 1). Это позволило сформировать карту эволюции (см. рис. 2).

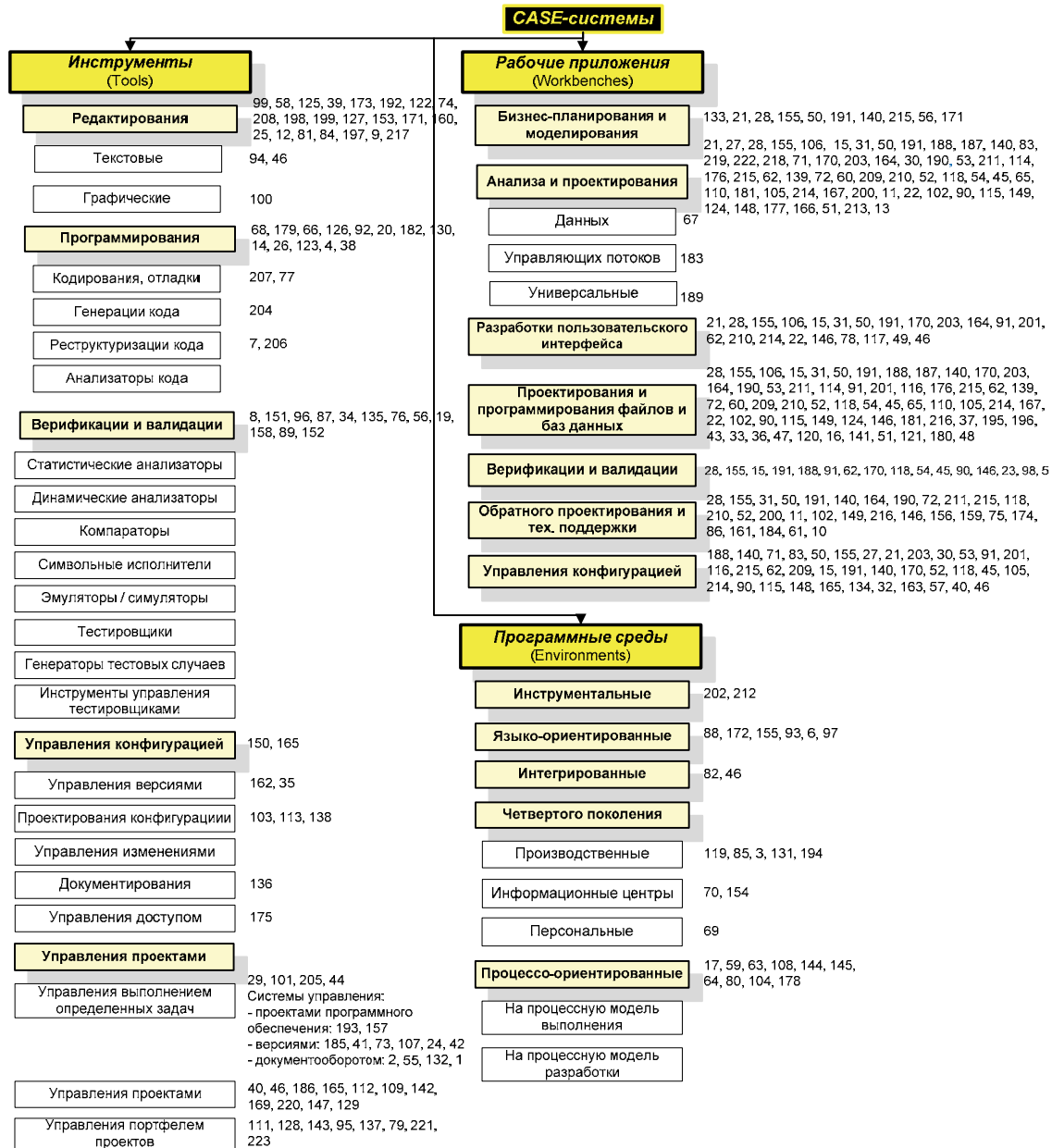


Рис. 1. Классификация CASE-систем

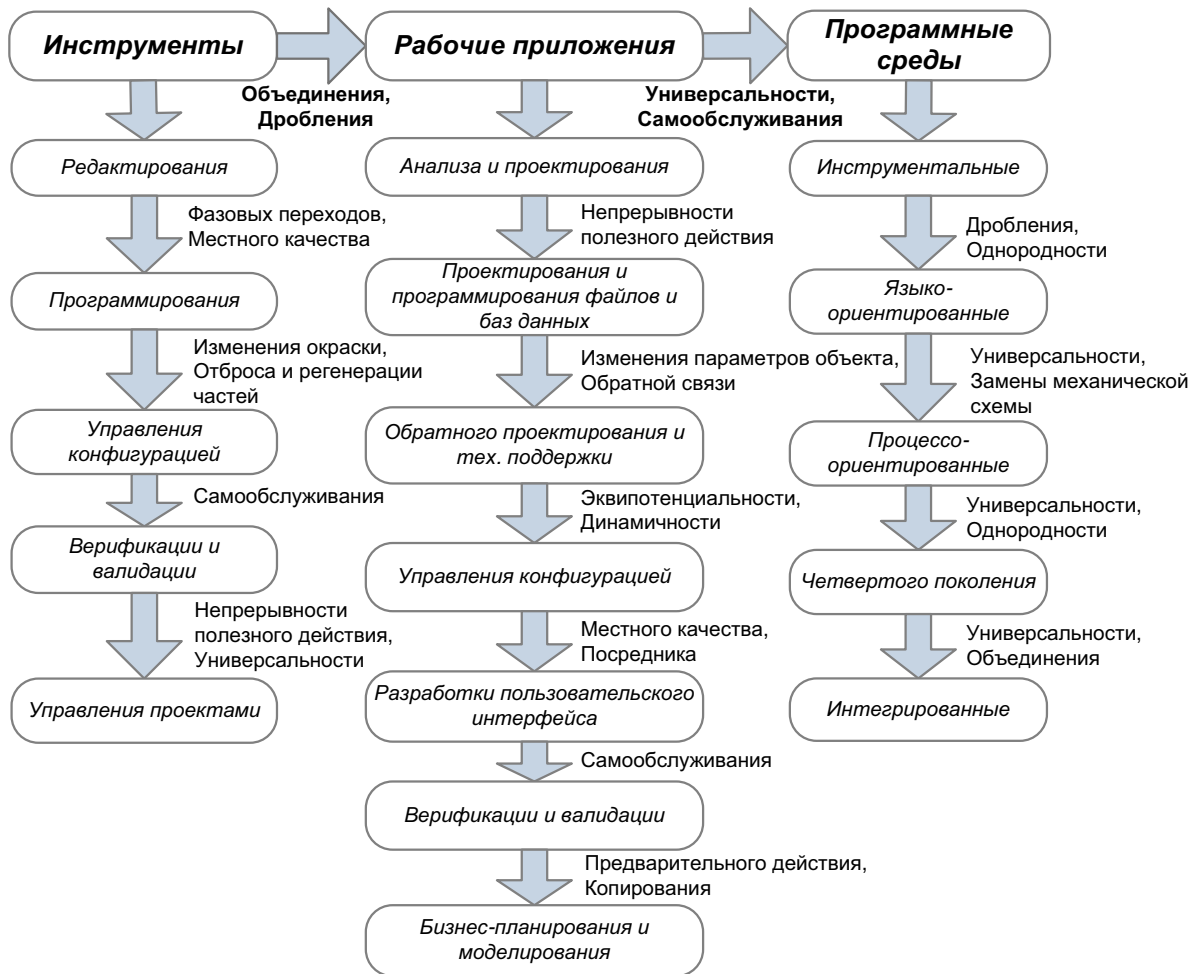


Рис. 2. Карта эволюции CASE-систем

В основной линии развития CASE-систем были выделены следующие *противоречия* (см. рис. 3):

1 противоречие на этапе появления систем класса «Workbenches»: при увеличении количества выполняемых функций недопустимо растет требуемый уровень интеграции системы с другими платформами и программными продуктами;

2 противоречие на этапе появления систем класса «Environments»: при увеличении количества охватываемых этапов ЖЦ проектируемых систем недопустимо увеличиваются затраты на получение результатов.

Аналогично эволюции классов «Tools» и «Workbenches» представлялась эволюция для каждого класса программных продуктов.

Противоречия, возникающие в процессе эволюции CASE-систем, были разрешены с использованием специальных приемов разрешения противоречий (см. рис. 4).

Приведем пример выявления противоречий в классе систем «Environments».

*Системное свойство* программных продуктов данной группы – поддержка различных фаз ЖЦ ПО и организационно-управляющих систем. *Главная полезная функция* – поддержка большинства фаз ЖЦ ПО и организационно-управляющих систем. *Объект воздействия* – различные задачи в рамках фаз ЖЦ. *Источник энергии* – данные различного вида (графические, текстовые, табличные). *Двигатель* – математическая модель преобразования данных. *Трансмиссия* – механизмы анализа преобразованных данных. *Рабочий орган* – интерфейс CASE-системы. *Орган управления* – интерфейс управления. *Параметры системы*:

П1: фазы ЖЦ, требующие «поддержки» («1» – формирование требований, «2» – проектирование, «3» – реализация, «4» – тестирование и отладка, «5» – внедрение, «6» – сопровождение и эксплуатация);

П2: тип системы («1» – ПО, «2» – организационно-управляющая).

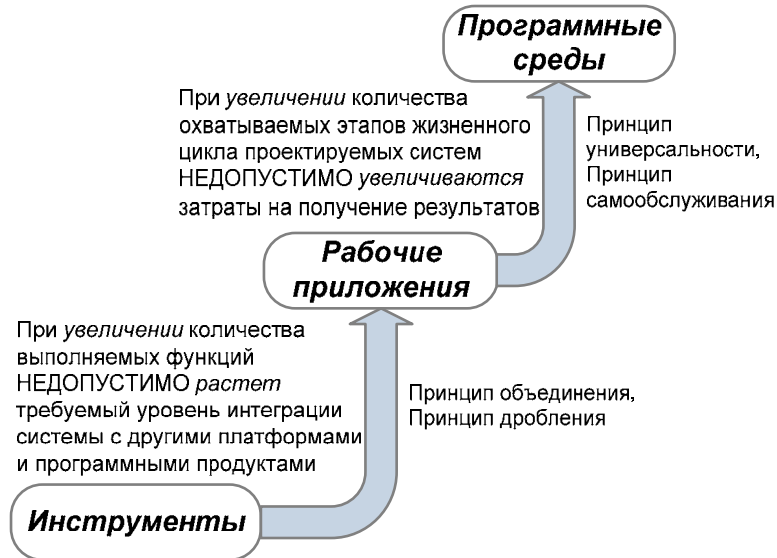


Рис. 3. Разрешение противоречий

«Инструментальные программные среды» [П1: 3, 5. П2: 1, 2]. Поддержка в системах ограничена функциями программирования, управления конфигурацией и управления проектами. Возникает *противоречие*: при увеличении количества выполняемых функций НЕДОПУСТИМО *растет* требуемый уровень интеграции системы с другими платформами и программными продуктами.

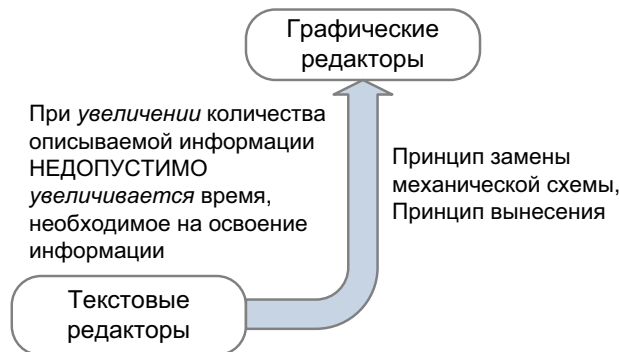


Рис. 4. Эволюция инструментов редактирования («editing tools»)

Противоречие разрешается при помощи использования принципа «дробления» и принципа «однородности»: осуществляется переход к «Языко-ориентированным программным средам» – системам, которые обеспечивают легкое расширение среды посредством написания дополнительных модулей на «заданном» языке.

Переход к «Языко-ориентированным программным средам» [П1: 3, 4, 5. П2: 1, 2] порождает новые проблемы. Код, написанный на другом языке программирования в такой сис-

теме, не может быть выполнен. Возникает *противоречие*: при *увеличении* уровня интеграции НЕДОПУСТИМО *сокращается* количество доступных языков программирования.

Противоречие разрешается при помощи использования принципа «универсальности» и принципа «замены механической схемы»: осуществляется переход к «Процессо-ориентированным программным средам», которые поддерживают крупномасштабную разработку без привязки к конкретному языку.

В свою очередь, использование «Процессо-ориентированных программных сред» [П1: 1, 2, 3, 4, 5, 6. П2: 1, 2] сталкивается с проблемой обязательной графической формализации бизнес-процессов и т.д.

### **Заключение**

Двумерная классификация (карта эволюции) CASE-систем, представленная в данной статье, является наиболее эффективной для целей обучения, а также для систематизации информации о большинстве CASE-систем, имеющих в настоящее время на рынке программного обеспечения. Такая систематизация существенно упростит подбор подходящей для определенных целей использования на предприятии CASE-системы.

В представленной классификации по одной координате располагаются классы CASE-систем («Tools» – инструменты, «Workbenches» – рабочие приложения, «Environments» – программные среды), а по другой – линии эволюции систем каждого класса. CASE-системы в рамках одной линии выстроены по степени увеличения их идеальности.

Отметим также, что дальнейшая разработка карты эволюции CASE-систем путём достройки позволит предсказать направления развития как классов систем, так и линий эволюции в рамках каждого класса.

Наиболее эволюционированными системами в классе «Environments» являются интегрированные CASE-системы: DEC Cohesion, IBM AD/Cycle; в классе «Workbenches» – системы бизнес-планирования и моделирования: ARIS (Business Performance Edition), CA ERwin Modeling Suite, Rational Rose, Oracle Designer, Borland Together и др.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Berdonosov, V. «Fractality of knowledge and TRIZ», Proceedings of the ETRIA TRIZ Future Conference, Kortrijk, 9-11 October 2006, published by CREAX Press, ISBN 90-77071-05-9. – pp. 31-36.
2. Berdonosov, V., Redkolis, E. «TRIZ-fractality of mathematics» Proceedings of the ETRIA TRIZ Future Conference, Frankfurt on Mian, 6-8 November 2007, published by Kas-sel University Press GmbH, ISBN 978-3-89958-340-3. – pp. 15-22.
3. Fuggetta, A. A Classification of CASE Technology. Dipartimento di Elettronica ed Inf., Politecnico di Milano: Computer, vol. 26, no. 12, Dec. 1993, doi:10.1109/2.247645. – pp. 25-38.



### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П1.1

#### Спецификация CASE-систем

Название системы	Название системы
1. АРХИВНОЕ ДЕЛО	112. Microsoft Project
2. ЕВФРАТ-Документооборот	113. MMS
3. 4 GL/Online	114. Model Maker
4. Acceleo	115. Modelio
5. Act	116. MOSKitt
6. Ada	117. Multi/CAM
7. AdaReformat	118. MySQL Workbench
8. AdaXRef	119. Natural 2
9. ADONIS	120. NETRON/CAP
10. Adpac CASE Tools	121. NewEra
11. Agilej	122. ObjectDomain
12. AmaterasUML	123. Objecteering MDA Modeler
13. Analyst/designer	124. ObjectiF
14. AndroMDA	125. OmniGraffle
15. AnyLogic	126. Omondo
16. APS	127. Open ModelSphere
17. Arcadia	128. OpenAir
18. ArchE	129. OpenProj
19. Arena	130. OptimalJ
20. ArgoUML	131. Pacbase
21. ARIS	132. PayDox
22. Astade	133. PC Prim
23. Battlemap	134. PCMS
24. Bazaar	135. Playback
25. Bonapart	136. Plib86
26. BOUML	137. PM.Contract
27. Business Studio	138. Pmaker
28. CA ERwin Modeling Suite	139. Poseidon
29. CA Estimacs	140. Power Designer Process Modeler
30. CASE.АНАЛИТИК	141. PowerBuilder
31. Case/4/0	142. Primavera
32. CCC	143. Primavera ProSight
33. Chen Toolkit	144. Process Weaver
34. CICS Simulcast	145. Process Wise
35. CMS	146. PRO-IV Workbench
36. COBOL2/Workbench	147. Projectmate
37. Code Center	148. ProKit*Workbench
38. CodeLogic	149. Prosa UMLmodeler
39. Concept Draw	150. PVCS (Intersolv)
40. Coordinator	151. Q/Auditor
41. CVS	152. Quality Works
42. Darcs	153. QuickCRC
43. Data Base Design	154. Ramis
44. DateBook	155. Rational Rose
45. dbForge Studio for MySQL	156. Recorder
46. DEC Cohesion	157. Redmine
47. DECASE	158. Re-Think
48. Delphi	159. Rigi
49. Design/OA	160. SAP Strategic Management

Название системы	Название системы
50. Designer Oracle	161. Scan/COBOL
51. Developer	162. SCCS
52. Devgems Data Modeler	163. SCLM
53. DeZign forData-bases	164. S-Designor
54. Dia	165. SE Companion
55. DocsVision	166. SELECT
56. DOORS	167. Select Architect
57. DSEE	168. Sementalk
58. DVDdraw	169. SensoryProTracker
59. East	170. Silverrun
60. EasyCASE	171. Simprocess
61. Ensemble	172. Smalltalk
62. Enterprise Architect	173. SmartDraw
63. Enterprise II	174. SmartSystem
64. EPOS	175. SoDA
65. ER / Studio	176. Software Ideas Modeler
66. ESS-Model	177. Software Through Pictures
67. Excelerator	178. SPADE/SLang
68. Extend	179. SQL Maestro
69. Filemaker Pro	180. SQLWindows
70. Focus	181. SQLyog
71. Fox Manager	182. StarUML
72. Fujaba	183. Statemate
73. Git	184. SuperStructure
74. Gmodeler	185. SVN
75. Hindsight	186. Synchronize
76. HP Basic Branch Analyzer	187. System Architect
77. HP Cross Compilers	188. TAU
78. HP Interface Architect	189. TeamWork
79. HP Project and Portfolio Management	190. Toad Data Modeler
80. HPSF	191. Together Borland
81. HyperionPerformance Scorecard	192. Topcased
82. IBM AD/Cycle	193. Trac
83. IBM WebSphere Business Modeler	194. Transform
84. IDEF0.EMTools	195. Turbo C++
85. Informix	196. Turbo Pascal
86. Inspector/Recorder	197. UFO-toolkit
87. Instrumentation Tool	198. Umbrello UML Modeller
88. Interlisp	199. UMLet
89. Ithink Analyst	200. UMLStudio
90. iUML	201. Uniface
91. JAM	202. UNIX Programmer's Workbench
92. Jink-uml	203. Vantage Team Builder
93. KEE	204. VAX Cobol Generator
94. KeyOne	205. VAX Notes
95. Kildrummy	206. Via/Renaissance
96. lint-Plus	207. Via/Smarttest
97. Lisp	208. Violet
98. Logiscope	209. Visible Analyst Workbench
99. MacBubbles	210. Visio
100. MacDraw	211. Visual Paradigm Suite
101. MacProject	212. VMS VAX Set

Название системы		Название системы	
102.	Magic Draw	213.	vsDesigner
103.	Make	214.	Webratio
104.	Marvel	215.	Win(MAC)A&D
105.	Mavim Rules	216.	Win(Mac)Translator
106.	MEGA	217.	Workflow Modeler
107.	Mercurial	218.	Бизнес-Инженер
108.	Merlin	219.	ИНТАЛЕВ
109.	MetaFour	220.	Команд
110.	Metastorm Pro Vision	221.	ЛИДЕР
111.	MS Office Project Portfolio Server	222.	ОРГ-Мастер Про

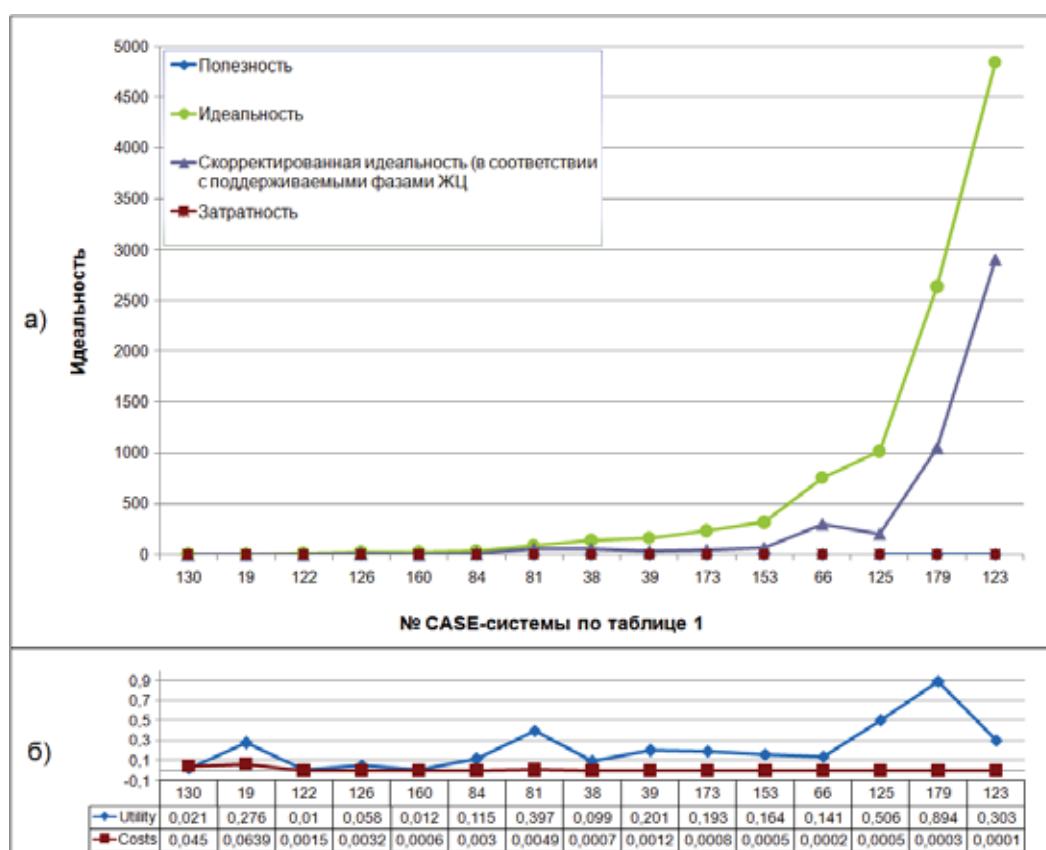


Рис. П1.1. Эволюция систем группы «Tools»:

а – графики полезности, затратности, идеальности, скорректированной идеальности;  
 б – графики полезности и затратности в более крупном масштабе

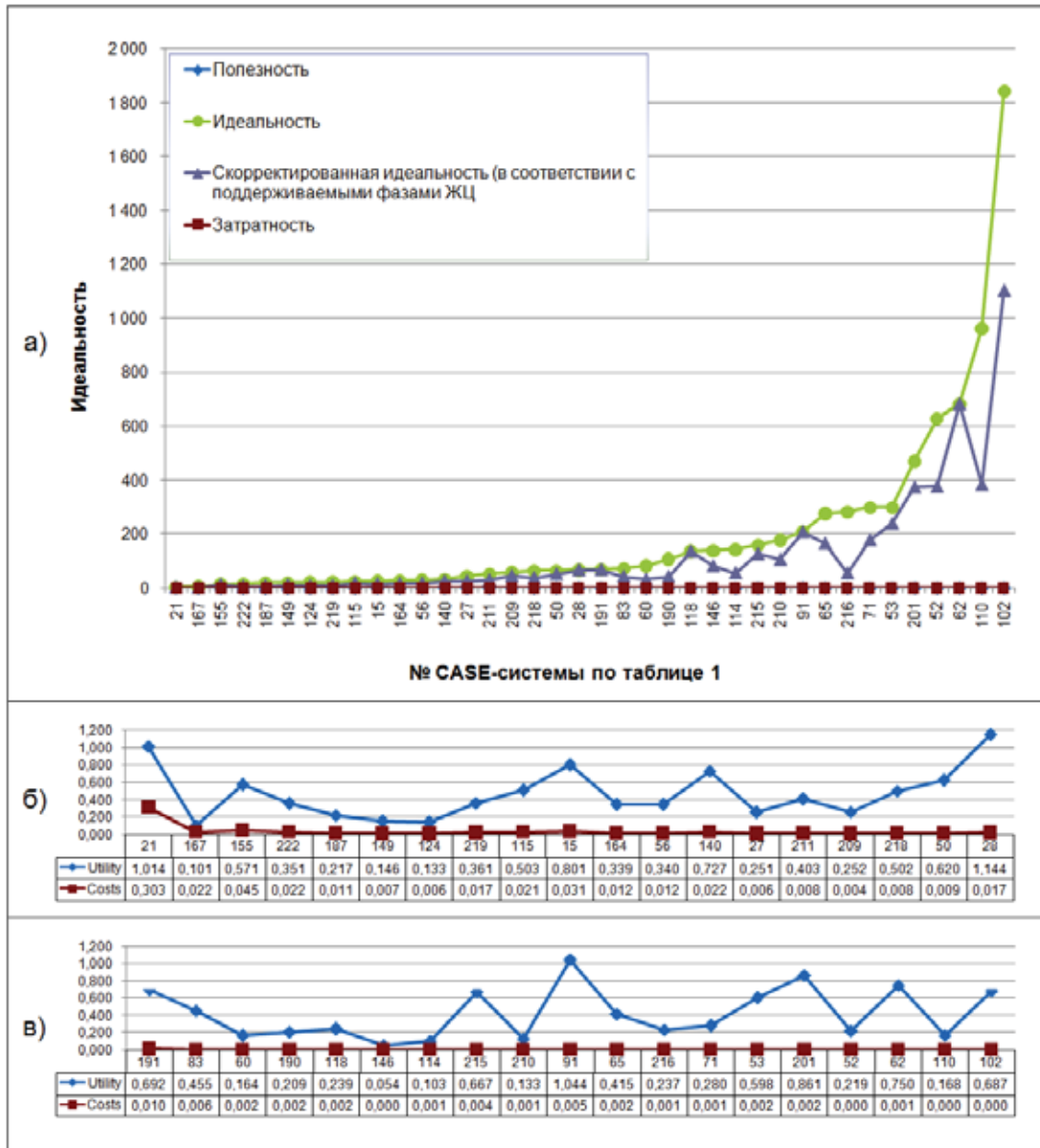


Рис. П1.2. Эволюция систем группы «Workbenches»:

а – графики полезности, затратности, идеальности, скорректированной идеальности;  
 б, в – графики полезности и затратности в более крупном масштабе

**Комаровский Ю. А.**  
**Komarovskiy Yu.A.**

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ GPS-КОМПАСОВ

### A COMPARATIVE ANALYSIS OF RANDOM MEASUREMENT ERRORS IN GPS-COMPASSES



**Комаровский Юрий Александрович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры теории и устройства судна Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского (Россия, Владивосток). E-mail: [komarovskiy@msun.ru](mailto:komarovskiy@msun.ru).

**Mr. Yuriy A. Komarovskiy** – PhD in Engineering, Senior Researcher at the Department of Ship Theory and Naval Architecture, Admiral G. I. Nevelskoi Maritime State University (city of Vladivostok), e-mail: [komarovskiy@msun.ru](mailto:komarovskiy@msun.ru).

**Аннотация.** На основе результатов обработки статистического материала показано, что величина случайной погрешности определения курса GPS-компасом JLR-20/30 ниже по сравнению с GPS-компасом JLR-10T.

**Summary:** Based on the results of a statistical data analysis we have shown that the magnitude of random errors in heading measured with the GPS-compass JLR-20/30 is lower than that measured with the GPS-compass JLR-10T.

**Ключевые слова:** GPS-компас, точность, систематическая погрешность, случайная погрешность.

**Key-words:** GPS-compass, accuracy, systematic error, random error

УДК 621.396.932.1:629.783

Развитие спутниковых навигационных систем привело к появлению принципиально новых технологий в морском судоходстве. Примером тому служат многофункциональные GPS-приёмники, главной особенностью которых выступает функция курсоуказания. Поэтому чаще всего их называют GPS-компасами. На самом деле, GPS-компас представляет собой совокупность двух GPS-приёмников, реализующих разные принципы измерения и обработки сигналов спутниковой радионавигационной системы (СРНС) Навстар GPS.

Один приёмник выполняет измерения доплеровских сдвигов частоты, а также псевдодальностей до каждого спутника СРНС Навстар GPS, находящегося в зоне радиовидимости. По псевдодальностям компьютер приёмника вычисляет геодезические координаты фазового центра антенны в задаваемой системе координат. Ими являются широта, долгота, возвышение над геоидом и разность высот между поверхностью геоида и поверхностью референц-эллипсоида. По измерениям доплеровских сдвигов несущих частот вычисляются элементы вектора абсолютной скорости носителя приёмника. В судовых GPS-приёмниках они обозначаются как COG (Course Over Ground) и SOG (Speed Over Ground). К сожалению, до сих пор элементы вектора абсолютной скорости зачастую интерпретируются неверно. Чтобы внести ясность в терминологию, обратимся к рис. 1, а.

На рис. 1, а в точке А расположена антенна судового GPS-приёмника. Истинный курс ИК является углом между северной частью истинного меридиана и носовой частью диаметральной плоскости судна. В навигации истинный курс отсчитывается от 0° до 360° по ходу часовой стрелки. Судно под действием движителей перемещается со скоростью  $V_0$  относительно воды. Воздействие ветра и течения приводит к тому, что судно движется не по линии истинного курса,

а по линии пути судна при суммарном угле сноса  $c$  (ПУ<sub>С</sub>) с абсолютной скоростью  $V$ . В англоязычной морской терминологии SOG соответствует абсолютной скорости  $V$ , а COG является ничем иным, как ПУ<sub>С</sub>, но не истинным курсом судна. В общем случае COG отличается от истинного курса судна. Они равны только при полном отсутствии ветра и течения и при условии движения судна строго неизменным курсом. Положение судна всегда характеризуется величиной истинного курса, независимо от того движется судно или оно ошвартовано. Величины COG и SOG отличаются от нуля только при движении судна, независимо от того, работают судовые движители или судно лежит в дрейфе.

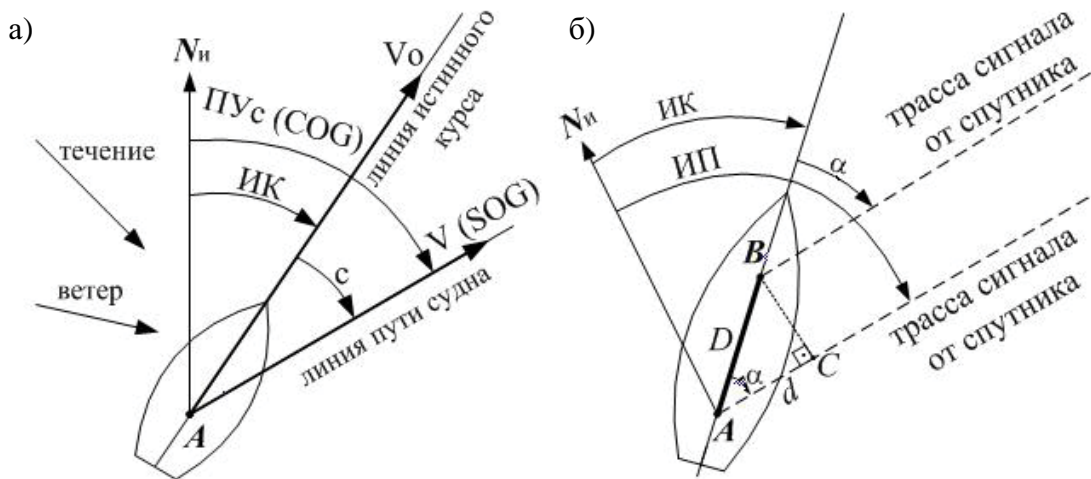


Рис. 1. Основные понятия спутниковой навигации

Другой GPS-приёмник, входящий в состав многофункционального приёмника, предназначен для определения истинного курса судна. Воспользуемся рис. 1, б для пояснения принципа его работы. На рис. 1, б в точках  $A$  и  $B$  расположены две приёмные антенны. Расстояние  $D$  между фазовыми центрами антенн всегда известно с высокой точностью. Это расстояние принято называть измерительной базой антенной системы. Направление базы совпадает с диаметральной плоскостью судна. Поскольку расстояние между спутником и судном превышает 20 000 км, а размеры баз существующих компасов колеблются от 0,5 м до 4 м, то можно считать, что трассы сигналов, поступающие в антенны  $A$  и  $B$  от одного и того же спутника, будут параллельны. Угол  $\alpha$  – это угол, отсчитываемый от носовой части диаметральной плоскости судна от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . Он образуется в результате пересечения трассы сигнала от спутника с направлением измерительной базы.

Так как антенны  $A$  и  $B$  разнесены, то электромагнитные колебания, поступающие от одного и того же спутника, в них будут иметь разные фазы. Обозначим через  $d$  (отрезок  $AC$ ) разность фаз, выраженную в линейных единицах

$$d = n\lambda + \Delta\lambda ,$$

где  $\lambda$  – длина волны электромагнитных колебаний, излучаемых передатчиком спутника, м;  $n$  – целое число длин волн, укладываемых в базу;  $\Delta\lambda$  – разность фаз в пределах одного фазового цикла,  $0 \leq \Delta\lambda \leq \lambda$ .

На рис. 1, б разность фаз  $d$  определяется проекцией базы  $D$  на линию трассы распространения сигнала от спутника, то есть

$$d = D \cos \alpha .$$

Понятно, что максимальная разность фаз может быть в том случае, если спутник относительно судна находится строго по носу или строго по корме. Разность фаз будет равна нулю, когда спутник окажется строго на траверзе правого или левого борта. Следовательно, направление на спутник со стороны базы, то есть курсовой угол спутника, определится как

$$\alpha = \arccos(d / D) .$$

Для вычисления истинного курса судна кроме  $\alpha$  необходимо знать истинный пеленг (ИП) на спутник. Истинный пеленг в спутниковом компасе рассчитывается как геодезическое направление с судна, координаты которого определяются по кодовым измерениям первым приёмником, на подспутниковую точку на поверхности земного эллипсоида. Координаты подспутниковой точки вычисляются по пространственным координатам спутника, которые непрерывно вычисляются компьютером спутникового компаса по эфемеридам, транслируемым спутником в его навигационном сообщении. Отсюда истинный курс судна определяется известной разностью  $ИК = ИП - \alpha$ .

Таким образом, спутниковый компас – это совокупность как минимум двух разнесённых антенн, столько же приёмников, способных выполнять фазовые измерения для определения курсовых углов спутников, приёмника, выполняющего кодовые измерения, для определения координат судна и элементов вектора его абсолютной скорости, а также вычислительного устройства, рассчитывающего в масштабе реального времени курс судна.

Сейчас отечественные суда оборудуются двухантенными и трёхантенными многофункциональными GPS-приёмниками. Третья антенна значительно расширяет возможности приёмников. Создаётся измерительная плоскость, благодаря которой определяются ещё и углы крена и дифферента, а также угловые скорости изменения курса, крена и дифферента в реальном масштабе времени. Появление третьей антенны создаёт три измерительные базы, что должно вызвать снижение случайной погрешности определения истинного курса по сравнению с двухантенным GPS-приёмником. Проверке этого предположения посвящена данная статья.

Первые наблюдения за работой двухантенного GPS-компаса JLR-10T были выполнены автором с 19 по 23 октября 2009 г. на судне “Fesco”, которое находилось в неподвижном состоянии, так как стояло на берегу на кильблоках. Трудность проведения эксперимента заключалась в том, что по условиям места проведения наблюдений к GPS-компасу невозможно было подключить компьютер для автоматизации сбора данных, а поэтому величины курсов записывались вручную. Наблюдения проводились короткими сериями по 560 – 1200 измерений. Измерения записывались через 2 – 3 с. Всего было выполнено 45 серий в разное время суток. Затем полученные данные были оцифрованы и обработаны. На рис. 2 представлены в качестве иллюстрации графики изменения истинного курса GPS-приёмника JLR-10T во 2-й (рис. 2, а) и в 19-й сериях (рис. 2, б).

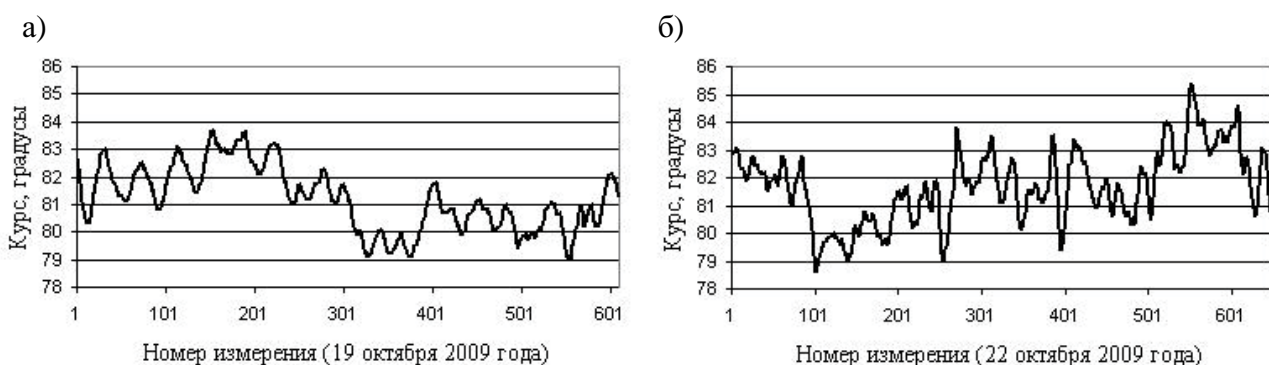


Рис. 2. Графики изменения курса JLR-10T на неподвижном судне

Обработка собранного статистического материала позволила сделать следующие выводы [1 – 3]. Размах варьирования курса достигал  $7,9^\circ$ . Наблюдается значительное доминирование систематических погрешностей над случайными, в чём можно убедиться, анализируя графики на рис. 2. Величины систематических погрешностей зависят от расположения спутников относительно антенны GPS-компаса JLR-10T. Величины систематических погрешностей имеют ярко выраженный суточный ход с периодом в одни звёздные сутки.

Экспериментальные наблюдения осенью 2009 г. выполнялись через неравные интервалы времени. По этой причине они непригодны для исследования случайной компоненты погрешности курсов GPS-компаса JLR-10T. Весной 2010 г. был собран дополнительный статистический материал. Наблюдения проводились 12, 13 и 17 мая двумя сериями в день на том же судне при прежних условиях. На этот раз фиксация курсов выполнялась строго через 5 с.

Случайная компонента погрешности оценивалась с помощью простого сглаживания методом скользящего среднего. Обозначим через  $c_i$  – отсчёт курса GPS-компаса в момент времени  $t_i$ . Тогда формирование величины курса в любой момент времени может быть представлено в виде следующей аддитивной модели:

$$c_i = h_i + \Delta c_i, \quad \Delta c_i = C + c(t_i) + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где  $h_i$  – истинное значение курса;  $\Delta c_i$  – погрешность измерения курса;  $C$  – постоянная составляющая погрешности;  $c(t_i)$  – систематическая составляющая погрешности (тренд);  $\varepsilon_i$  – случайная компонента погрешности измерения курса.

Постоянная составляющая носит характер инструментальной погрешности. Её величина зависит от типа приёмника и отсутствия параллельности между измерительной базой и диаметральной плоскостью судна. Предполагается, что она неизменна в течение эксплуатации компаса. Величина систематической погрешности зависит от времени звёздных суток, так как оно определяет расположение спутников СРНС Навстар GPS относительно судна [1, 2]. Следовательно, в общем случае на систематическую погрешность будет оказывать влияние и курс судна. Предполагается, что систематическая погрешность представляет собой неслучайную непрерывную функцию. Её можно определить по результатам, полученным в ходе продолжительных экспериментов на неподвижном судне. Аналитическое выражение систематической погрешности может быть получено в ходе регрессионного анализа данных эксперимента. Отсюда постоянная погрешность рассчитывается следующим образом:

$$C = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} c(t) dt,$$

где  $T_S$  – продолжительность звёздных суток.

Случайная погрешность измерения не зависит от времени и представляет собой  $i$ -ю реализацию стационарного случайного процесса. Предполагается, что она удовлетворяет следующим условиям А. Н. Колмогорова [4]:

- 1) Начальный момент первого порядка случайной величины равен нулю:

$$M = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon f(\varepsilon) d\varepsilon = 0,$$

где  $f(\varepsilon)$  – дифференциальная функция распределения случайной величины  $\varepsilon$ .

- 2) Центральным моментом второго порядка случайной величины является величиной постоянной:

$$D = \int_{-\infty}^{+\infty} [\varepsilon - c(t)]^2 f(\varepsilon) d\varepsilon = const.$$

- 3) Корреляционный момент двух реализаций  $x$  и  $y$  случайной величины  $\varepsilon$  равен нулю:

$$\mu_{xy} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)(y - m_y) f(x, y) dx dy = 0.$$

Следовательно, в данном случае будем считать случайной погрешностью такую случайную величину, которая по всему ансамблю измерений создаёт систему взаимно некоррели-

рованных случайных величин, математические ожидания которых равны нулю, а дисперсии конечны.

Поскольку вид и параметры функций, выражающих систематические погрешности приёмников JLR-10T, не известны, то воспользоваться моделью (1) для оценок случайных погрешностей не представляется возможным. Выходом из этой ситуации может послужить процедура сглаживания наблюдений.

Выберем из всего массива наблюдений последовательность отсчётов курсов  $c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n$ , представляющую собой моментный ряд. Назовём число  $n$  шириной окна сглаживания. Пусть  $c_i$  соответствует середине окна сглаживания. Сглаженным значением, соответствующим  $c_i$ , будет  $\zeta_i$ ,

$$\zeta_i = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_i + c_n}{n}.$$

При  $n \rightarrow \infty$   $\zeta_i \rightarrow c(t_i)$  на основании первого свойства случайной величины.

Если при той же ширине окна сглаживания выполнить осреднение для  $i + 1$  середины и т. д., то в итоге получим сглаженный временной ряд, длина которого будет на  $n$  короче исходного временного ряда. Такую процедуру принято называть простым линейным сглаживанием временного ряда с помощью скользящего среднего [5]. В зависимости от вида исходного временного ряда помимо линейного сглаживания могут применяться экспоненциальное сглаживание, а также сглаживание с помощью гладких функций. Поскольку исходная информация о статистических свойствах составляющих модели (1) отсутствует, то в данном исследовании ограничимся применением процедуры простого линейного сглаживания скользящим средним для оценки характеристик случайных погрешностей курса спутниковых компасов. Будем рассматривать  $\delta_i$  в качестве оценки  $\varepsilon_i$ ,  $\delta_i = c_i - \zeta_i$ . Следовательно, в первом приближении  $\delta_i$  – это случайная составляющая погрешности определения курса.

Предварительные расчёты показали, что ширину окна сглаживания в данном исследовании следует задавать минимальной, то есть равной трём. Это соответствует 15 с. Увеличение окна сглаживания приводило к росту среднего квадратического отклонения (СКО) величины  $\delta_i$ . Объяснение тому кроется в высокой изменчивости  $c_i$ .

На рис. 3, а представлен график изменения курса JLR-10T в серии № 3, выполненной 13 мая 2010 г. На рис. 3, б можно видеть график изменения случайной погрешности курса этой серии.

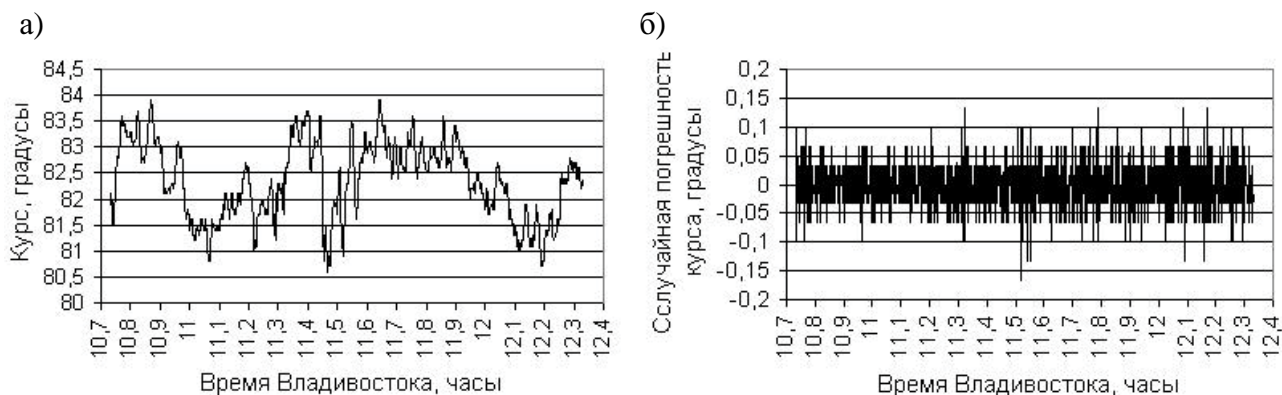


Рис. 3. Графики изменения курса и случайной погрешности курса JLR-10T

Анализ графика, приведенного на рис. 3, б, позволяет предположить существование стационарности процесса изменения случайной величины  $\delta_i$ .

В табл. 1 сведены основные статистические характеристики распределения случайных погрешностей курсов GPS-компаса JLR-10T в весенних наблюдениях 2010 г. Так как условия наблюдений не изменялись, то имел смысл объединить величины случайных погрешностей курсов всех шести серий. Характеристики сводного массива помещены в нижней строке табл. 1.

Таблица 1

Статистические характеристики распределения случайных погрешностей курсов GPS-компаса JLR-10T

Серия	Среднее, градусы	СКО, градусы	Размах, градусы	Асимметрия	Объём выборки
Серия 1	$-1,6 \times 10^{-16}$	0,0329	0,2	-0,052	358
Серия 2	$4,6 \times 10^{-5}$	0,0328	0,166	0,006	718
Серия 3	$2,2 \times 10^{-5}$	0,0425	0,333	-0,034	1150
Серия 4	$-2,9 \times 10^{-5}$	0,0344	0,333	-0,194	1150
Серия 5	$2,89 \times 10^{-5}$	0,0343	0,266	-0,002	1150
Серия 6	$-5,8 \times 10^{-5}$	0,0365	0,3	-0,048	1150
Сводный массив	$-5 \times 10^{-5}$	0,0363	0,333	-0,058	5676

Из табл. 1 следует, что средние значения случайной погрешности измерения курса двухантенным спутниковым компасом JLR-10T близки к нулю и знакопеременны. Знакопеременность средних можно объяснить недостаточными объёмами выборок, а также недостаточно малым окном сглаживания. Следует отметить малые величины средних квадратических отклонений. Они практически равны за исключением третьей серии, график изменения курсов в которой можно видеть на рис. 3. Близость величин СКО, а также малые величины средних являются свидетельством выполнения первых двух условий А. Н. Колмогорова. Сравнительно малы размахи варьирования. Асимметрии распределений случайных погрешностей в сериях малы, но имеют отрицательные значения, что можно объяснить недостатками неавтоматизированной регистрации курсов во время проведения наблюдений. Эксцесс объединённой выборки равен 0,522. Это не позволяет уверенно считать здесь распределение случайных погрешностей соответствующим закону Гаусса.

В 2010 г. несколько судов были оборудованы трёхантенными GPS-компасами JLR-20/30. Поэтому появилась возможность провести экспериментальные наблюдения и сравнить точность JLR-20/30 с точностью двухантенного компаса JLR-10T. Сложность организации экспериментов заключалась в том, что суда, на которых были установлены JLR-20/30, постоянно выполняли прибрежные рейсы и только в ночное время становились к причалу. Чтобы уменьшить рыскание судна на курсе при стоянке на швартовых, требовалась штилевая погода. Первые наблюдения в условиях полного штиля оказались возможными на пароме “Бригадир Ришко” в ночь с 13 на 14 сентября 2010 г. Паром ошвартовался носом к причалу к востоку от северной опоры строящегося моста через бухту Золотой Рог. Наблюдения проводились тремя сериями. Курсы фиксировались так же, как и на судне “Fesco”. График изменения курса парома и график изменения случайной погрешности изменения курса можно видеть на рис. 4.

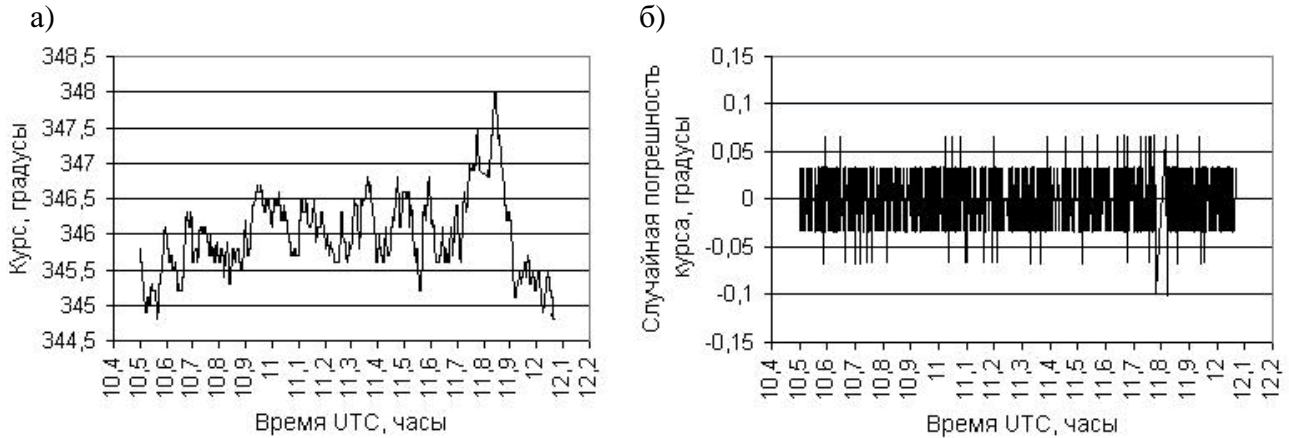


Рис. 4. Графики изменения курса (а) и случайной погрешности курса JLR-20/30 (б)

На характер изменения курса, несомненно, повлияло рыскание парома. Но поскольку стоял штиль, то эти колебания происходили с низкой частотой. На рис.4, а явно прослеживаются колебания курса с частотами, близкими тем, которые можно видеть на рис. 3, а. Следовательно, можно предположить присутствие в показаниях трёхантенного спутникового систематической погрешности, характеристики которой сходны с аналогичной погрешностью GPS-компыа JLR-10T. Из сравнения рис. 3, б и рис. 4, б следует вывод о более низком уровне величин случайных погрешностей у GPS-компыа JLR-20/30. В табл. 2 помещены характеристики распределения случайных погрешностей компыа JLR-20/30.

Таблица 2

Статистические характеристики распределения случайных погрешностей курсов GPS-компыа JLR-20/30 на пароме “Бригадир Ришко”

Серия	Среднее, градусы	СКО, градусы	Размах, градусы	Асимметрия	Объём выборки
Серия 1	$8,05 \times 10^{-18}$	0,0279	0,166	-0,0552	1104
Серия 2	$-3,2 \times 10^{-5}$	0,0296	0,2	0,0079	1155
Серия 3	$2,94 \times 10^{-5}$	0,0291	0,233	0,0282	1134
Сводный массив	$-9,8 \times 10^{-7}$	0,0291	0,233	-0,003	3393

Эксперимент с компыа JLR-20/30 был продолжен на т/х “Владимир Родик”. Наблюдения проводились 22 сентября 2010 года при стоянке теплохода у правой стороны пирса Чуркинской переправы в бухте Золотой Рог. Судно было ошвартовано левым бортом. Стояла маловетренная погода, действовал прижимной слабый ветер. Результаты обработки экспериментальных наблюдений приведены в табл. 3.

Таблица 3

Статистические характеристики распределения случайных погрешностей курсов GPS-компыа JLR-20/30 на т/х “Владимир Родик”

Серия	Среднее, градусы	СКО, градусы	Размах, градусы	Асимметрия	Объём выборки
Серия 1	$2,88 \times 10^{-5}$	0,03	0,2	-0,073	1156
Серия 2	$3,13 \times 10^{-5}$	0,0352	0,3	0,089	1066
Серия 3	$3,06 \times 10^{-5}$	0,0297	0,266	-0,142	1091
Сводный массив	$3,02 \times 10^{-5}$	0,0317	0,333	-0,021	3313

Если сравнить величины СКО, помещённые в табл. 1 и табл. 2, то можно уверенно считать показания спутникового компаса JLR-20/30 менее подверженными воздействию случайных погрешностей по сравнению с компасом JLR-10Т, несмотря на то, что паром во время наблюдений не был абсолютно неподвижным. Более высокие величины СКО случайных погрешностей в наблюдениях на т/х “Владимир Родик” объясняются неустойчивым положением диаметральной плоскости судна. Водоизмещение т/х “Владимир Родик” во много раз меньше водоизмещения парома “Бригадир Ришко”. Поэтому даже лёгкий прижимной ветер мог вызвать высокочастотные колебания диаметральной плоскости, которые отсутствуют в наблюдениях на пароме.

По результатам проделанного анализа можно сделать следующие выводы и предложения.

1. Многофункциональные GPS-приёмники с функциями курсоуказания представляют собой принципиально новое техническое средство судовождения. Оно требует всестороннего изучения. Поэтому крайне важно продолжить исследования, направленные на оценку точности, а также на повышение точности и технологичности таких приёмников.

2. Как видно из представленного выше статистического материала, в большей степени точность курсоуказания зависит от систематического тренда. Удаление программными средствами систематической погрешности из показаний спутниковых компасов поставит точность спутниковых компасов намного выше точности современных судовых гироскопов, оставаясь на порядок дешевле их.

3. Случайная погрешность трёхантенного спутникового компаса заметно ниже случайной погрешности двухантенного компаса.

4. Дальнейшие исследования необходимо проводить на основе автоматической регистрации курсов с интервалом 1 с.

5. Экспериментальные наблюдения на пароме “Бригадир Ришко” и на т/х “Владимир Родик” создают предпосылки для разработки нового метода оценки точности GPS-компасов на основе субтракции динамики ошвартованного судна.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Комаровский, Ю. А. Влияние расположения спутников на точность работы GPS-компаса JLR-10Т / Ю. А. Комаровский // Проблемы транспорта Дальнего Востока : пленарные доклады восьмой междунар. науч.-практ. конф. (FEBRAT-09) (30 сентября – 2 октября 2009 г.). – Владивосток: ДВО Российской Академии транспорта, 2009. – С. 103-105.
2. Комаровский, Ю. А. Повторяемость погрешностей курса спутникового компаса / Ю. А. Комаровский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск : Изд-во НГАСУ, 2009. – № 2. – С. 144-148.
3. Комаровский, Ю. А. Особенности эксплуатации двухантенных спутниковых компасов / Ю. А. Комаровский // Судовождение – 2010 : сб. науч. тр. – Новосибирск : Изд-во НГАСУ, 2010. – С. 108-116.
4. Скворцов, М. И. Систематические погрешности в судовождении / М. И. Скворцов. – М. : Транспорт, 1980. – 168 с.
5. Андерсон, Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон. – М. : Мир, 1976. – 755 с.

**Трещев И.А., Коньшин А.В.**  
**Treshchev I.A., Konshin A.V.**

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИПТОПРЕОБРАЗОВАНИЙ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ СИСТЕМ С SMP-АРХИТЕКТУРОЙ В ЗАДАЧАХ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ**

### **USING CRYPTOTRANSFORMATIONS BASED ON GENETIC ALGORITHMS FOR SYSTEMS WITH THE SMP-ARCHITECTURE FOR INFORMATION SECURITY PROBLEMS**



**Трещев Иван Андреевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, тел.: 8-962-287-19-91. E-mail: kalkt@yandex.ru

**Mr. Ivan A. Treshchev** - Ph.D., Assistant Professor, Department of Computer Software and Computing, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 27, Lenina prospect, 681013 Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk region, Russian Federation,

tel.: 8 (962) 2871991, e-mail: kalkt@yandex.ru



**Коньшин Алексей Владимирович** – студент пятого курса (специальность 010503 «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем») Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, тел.: 8-914-779-66-86. E-mail: alexey@konshin.ru

**Mr. Alexey V. Konshin** – fifth-year MA student of “Software and administration of information systems”, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 27, Lenina prospect, 681013 Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk region, Russian Federation,

tel.: 8 (914) 7796686, e-mail: alexey@konshin.ru

**Аннотация.** Данная работа посвящена рассмотрению возможности применения генетических алгоритмов в задачах защиты информации. Построена математическая модель простого генетического алгоритма с одноточечным кроссинговером, простой мутацией и элитным отбором, описан процесс его функционирования. Авторы предлагают многоэтапную схему шифрования с использованием генетического алгоритма с учетом мутации генов отдельных особей и возможные пути распараллеливания данной схемы для систем с SMP-архитектурой.

**Summary:** The paper is concerned with the issue of using genetic algorithms for information security problems. Proposed is a mathematical model of a simple genetic algorithm with one-point crossing over and easy mutation with elite pick; the work of the algorithm is described. The authors propose a multistage encryption scheme using the genetic algorithm with mutations in the genes of individuals, and possible ways of parallelizing this scheme for systems with the SMP-architecture.

**Ключевые слова:** параллельные генетические алгоритмы, защита информации, моделирование, криптография.

**Key-words:** parallel genetic algorithms, information security, modeling, cryptography

УДК 003.26, 004.056.5

#### **Введение**

Генетические алгоритмы (ГА) «базируются на идее эволюции и естественного отбора и функционируют подобно естественным системам» [8, 43]. Главной идеей является адапта-

**Трещев И.А., Коньшин А.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИПТОПРЕОБРАЗОВАНИЙ  
НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ СИСТЕМ С SMP-АРХИТЕКТУРОЙ  
В ЗАДАЧАХ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ**

ция начальной популяции индивидов к некоторому окружению таким образом, что выживание и воспроизводство индивидов «основывается на определении полезности и вредности признаков» [1, 87].

Выделяют «три основных типа параллельных ГА» [7, 142]:

- 1) глобальные однопопуляционные ПГА, модель «master-slave»;
- 2) однопопуляционные ПГА;
- 3) многопопуляционные ПГА.

**Математическая модель генетического алгоритма, описание процесса его функционирования**

Пусть  $E_2 = \{0,1\}$ . Под операцией  $\oplus$  будем понимать суммирование по модулю 2. В дальнейшем будем рассматривать генетические алгоритмы, где гены в наборе хромосом кодируются одним из элементов множества  $E_2$ . Простой генетический алгоритм – это пятерка  $\langle S, F, C, M, h \rangle$ , где  $S \subseteq E_2^h$  — популяция особей, каждый элемент которой представляет из себя набор генов,  $h$  – количество хромосом;  $F : E_2^h \rightarrow R$  – функция жизнеспособности особей, определяющая значение из области положительных действительных чисел, характеризующее степень выживания особи в условиях естественного отбора;  $C : S \times S \times \{0,1,\dots,h-1\} \rightarrow E_2^h \times E_2^h$  – функция одноточечного кроссинговера особей, определяющая скрещивание, в результате которого образуются новые особи, замещающие своих родителей и набор хромосом которых складывается из разбиения хромосом родителей взятых попарно, причем функция  $C$  действует для «хвостов» наборов хромосом родителей следующим образом:

$$\forall s, v \in S \quad s = (x_0, x_1, \dots, x_{h-1}), v = (y_0, y_1, \dots, y_{h-1}) \Rightarrow$$

$$C(s, v, l) = ((x_0, x_1, \dots, y_l, y_{l+1}, \dots, y_{h-1}), (y_0, y_1, \dots, x_l, x_{l+1}, \dots, x_{h-1})).$$

Каждый шаг эволюции можно описать при помощи следующего алгоритма:

1.  $i = 0, R = \emptyset$ .

2. Выбираются две наиболее жизнеспособные особи:

$$T = \emptyset, v_i = \max_{t \in S} (F(t)), T = T \cup \{v_i\}, u_i = \max_{t \in S \setminus T} (F(t)), T = T \cup \{u_i\},$$

если максимумов несколько, то выбирается любой.

3. Генерируется случайное  $l_i \in \{0,1,\dots,h-1\}$ .

4. Выполняется кроссинговер

$$C(v_i, u_i, l_i) = (m, n), S = S \setminus T, R = R \cup \{m, n\}, i = i + 1, \text{ где } m, n \text{ – новые особи.}$$

5. Шаги 2 – 4 выполняются до тех пор, пока  $|S| \geq 2$ .

6. Если  $|S| = 1$ , тогда  $R = R \cup S$ .

7. Для следующего этапа эволюции принимается  $S = R$ .

В результате скрещивания в общем случае особи изменяются и для них «необходимо выполнить пересчет функций жизнеспособности» [9, 122].

$M : S \times \{0,1,\dots,h-1\} \times E_2 \rightarrow E_2^h$  – функция одноточечной мутации особей, определяющая видоизменение случайного гена в наборе хромосом случайно взятых особей, действующая следующим образом:  $M((x_0, x_1, \dots, x_q, \dots, x_{h-1}), q, k) = (x_0, x_1, \dots, x_q \oplus k, \dots, x_{h-1})$ , где число  $q \in \{0,1,\dots,h-1\}$  определяет номер гена для мутации, а  $k \in E_2$  – будет ли производиться мутация гена с номером  $q$  для данной особи.

Процесс мутации в генетическом алгоритме можно описать при помощи следующей схемы:

1.  $i = 0, R = \emptyset$ .

2. Генерируется случайное  $k_i \in E_2$  и  $q_i \in \{1, 2, \dots, h-1\}$ .
3. Выбираем произвольный элемент  $s_i \in S$ .
4.  $R = R \cup M(s_i, q_i, k_i)$ .
5.  $S = S \setminus \{s_i\}, i = i + 1$ .
6. Шаги 2 – 5 выполняются до тех пор пока  $|S| > 0$ .
7. Для следующего этапа мутации принимается  $S = R$ .

При разработке программного обеспечения обратимого криптопреобразования с использованием многоступенчатой схемы на основе генетического алгоритма с учетом мутации авторами была использована модель простого синхронного генетического алгоритма – шестерка  $\langle S, F, C, M, h, t \rangle$ , где  $\langle S, F, C, M, h \rangle$  – описывает генетический алгоритм,  $t$  – константа, задающая время, через которое будет происходить процесс кроссинговера. Синхронные генетические алгоритмы позволяют более точно моделировать процесс эволюции на ЭВМ, задавая временные ограничения на процесс кроссинговера и синхронизировать работу вычислительных узлов для проведения расчетов.

#### **О построении параллельных генетических алгоритмов для систем с SMP-архитектурой**

Для построения параллельного алгоритма, благодаря использованию модели синхронных генетических алгоритмов, мы предлагаем для систем с SMP-архитектурой поместить начальную популяцию в общей памяти и «использовать идеологию master-slave» [3, 79]. Для выполнения кроссинговера отсортируем популяцию в порядке убывания функции жизнеспособности особей, после чего начальную популяцию «расслоим» на непересекающиеся области.

Представим начальную популяцию –  $A$  как объединение  $n$  непересекающихся подпопуляций, где  $n$  – число вычислительных узлов, тогда

$$A = \bigcup_{i=1}^n A_i, A_i \subseteq A, \forall i, j, i \neq j \Rightarrow A_i \cap A_j = \emptyset.$$

Для равномерной загрузки вычислительных узлов авторами использовалось разбиение с равномоными подпопуляциями. Причем и кроссинговер и мутация в каждой из подпопуляций выполнялись независимо. Если определить ускорение вычислений как отношение времени исполнения на одном вычислительном узле ко времени исполнения на  $n$  узлах, то рассматриваемый подход позволяет добиться максимального теоретически возможного ускорения.

Каждый порождаемый поток на вычислительных узлах проводит кроссинговер и мутацию для своей подпопуляции.

После одного шага эволюции необходимо вновь отсортировать популяцию в соответствии с новыми значениями функции жизнеспособности. Для синхронизации используется параметр  $t$  математической модели, который вычисляется как отношение предполагаемого времени выполнения генетического алгоритма на одном вычислительном узле к числу вычислительных узлов. Главный поток начинает опрашивать состояние дочерних только по прошествии времени  $t$ , это позволяет свести к минимуму затраты на синхронизацию потоков.

Альтернативный подход к распараллеливанию заключается в организации «многостадийного конвейера» [4, 183]. Каждый этап – сортировка, кроссинговер, мутация – выполняется на отдельном вычислительном узле. Каждая последующая стадия конвейера ожидает, когда данные предыдущего этапа будут готовы, после чего начинает функционировать. В данном случае, так же как и для приведенного ранее метода, необходимо «расслоить» популяцию, и выполнять каждую стадию конвейера для отдельной подпопуляции. По мере готовности подпопуляция «продвигается по конвейеру» а на текущую стадию поступает новая часть популяции. Отметим, что в отличие от рассмотренного выше метода применение данной схемы будет требовать гораздо больше затрат на синхронизацию потоков и является ме-

нее масштабируемой, хотя сочетает в себе как функциональный, так и параллелизм по данным. В данном случае параметр  $t$  – время, через которое очередная стадия начинает опрашивать предыдущую, что также снижает затраты на синхронизацию потоков.

**Схема шифрования на основе генетического алгоритма и сравнение с аналогами**

В [5, 31] рассмотрено шифрование на основе генетического алгоритма, выполняемое за один раунд эволюции, без мутации. Мы предлагаем модифицированную многоэтапную схему шифрования, где эволюция проводится в несколько этапов с использованием генетического алгоритма с учетом мутации генов отдельных особей.

«Псевдослучайная последовательность для шифра генерируется с использованием NLFFSR» [6, 452] (Non Linear Feed Forward Shift Register – нелинейный «выталкивающий» сдвиговый регистр с обратной связью). Общая схема получения бита псевдослучайной последовательности представлена на рис. 1, где суммирование ведется по модулю 2. Нелинейный сдвиговый регистр представляет собой линейный сдвиговый регистр – LFFSR (Linear Feed Forward Shift Register – линейный «выталкивающий» сдвиговый регистр с обратной связью), над каждой  $n$ -кой выходных бит которого выполняется заданное нелинейное преобразование, где  $n$  – разрядность сдвигового регистра. Причем выделяют два вида NLFFSR: первый – когда нелинейное преобразование выполняется над результирующими битами LFFSR, второй – когда нелинейное преобразование выполняется внутри LFFSR. Авторами в работе исследовались генетические алгоритмы на основе первого типа.

Описание принципов функционирования LFFSR можно найти, например в [2, 49]. Свойства последовательности выдаваемой LFFSR тесно связаны с характеристическим неприводимым полиномом степени  $n$  над полем  $F_2 - C(c_1, c_2, \dots, c_n, x) = 1 + \sum_{i=1}^n c_i x^i$ .

Нами был использован восьмиразрядный линейный сдвиговый регистр с обратной связью. В качестве характеристического неприводимого полинома выбран  $f(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ , то есть  $c_8, c_4, c_3$  и  $c_2$  равны единице и нелинейное преобразование

$$g(a_{n-1}, a_{n-2}, a_{n-3}, a_{n-4}, a_{n-5}, a_{n-6}, a_{n-7}, a_{n-8}) = [(a_{n-1} \wedge a_{n-3}) \oplus (a_{n-2} \wedge \bar{a}_{n-4})] \oplus \\ \oplus [(a_{n-5} \wedge a_{n-7}) \oplus (a_{n-6} \wedge \bar{a}_{n-8})]$$

где сложение выполняется по модулю 2.

Инициализирующее значение для сдвигового регистра задавалось 11111111, что позволяет получить последовательность бит периода 255 или 32 десятичных чисел.

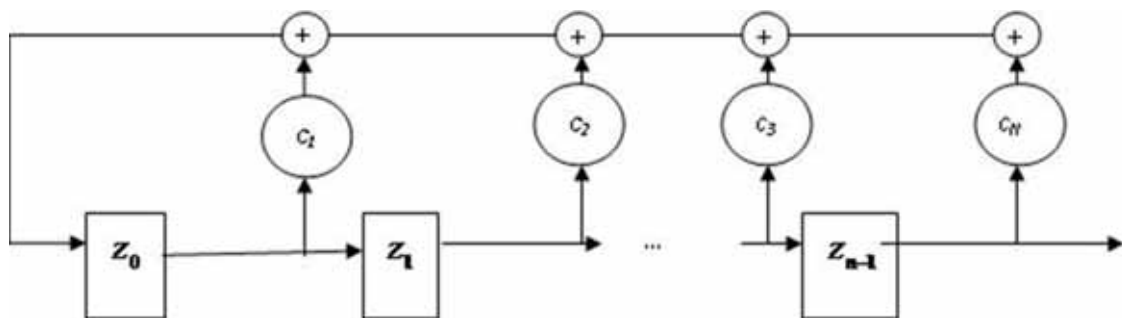


Рис. 1. Линейный сдвиговый регистр

После каждого шага значение  $z_0 = \sum_{i=0}^{n-1} z_i \wedge c_{i+1}$ , где суммирование ведется по модулю

2, и каждое  $z_{n-1}$  формирует бит выходной последовательности.

Последовательность бит, генерируемая LFFSR:



**Трещев И.А., Коньшин А.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИПТОПРЕОБРАЗОВАНИЙ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ СИСТЕМ С SMP-АРХИТЕКТУРОЙ В ЗАДАЧАХ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ**

8. Производим мутацию слова  $D_i$  если  $A_{k*j+1} > 127$ , инвертируя  $(A_{k*j+2} \bmod 16)$  бит слова, то есть выполняем  $M(D_i, A_{k*j+2} \bmod 16, A_{k*j+1} \div 128)$ .

9. Производим мутацию слова  $D_{i+1}$  если  $A_{k*j+3} > 127$ , инвертируя  $(A_{k*j+4} \bmod 16)$  бит слова, то есть выполняем  $M(D_i, A_{k*j+4} \bmod 16, A_{k*j+3} \div 128)$ .

10.  $k = k + 1$ .

11. Повторяем шаги 7–10, пока  $k < M$ , где  $M$  – требуемое количество этапов эволюции.

12.  $j = j + 5 * M$ .

13. Выберем  $A_j$  и  $A_{j+1}$ .

14. Пусть  $Y_i = A_j \text{ xor } (A_j \ll 8)$ ,  $Y_{i+1} = A_{j+1} \text{ xor } (A_{j+1} \ll 8)$ .

15. Получаем два зашифрованных слова  $E_i = D_i \text{ xor } Y_i$ ,  $E_{i+1} = D_{i+1} \text{ xor } Y_{i+1}$ .

16.  $j = j + 2$ .

17.  $i = i + 2$ .

18. Повторяем шаги 5 – 12, пока не закончатся слова на входной ленте.

Для обратного криптопреобразования необходимо выполнить все шаги описанного алгоритма шифрования в обратном порядке.

**Результаты тестирования**

Для тестирования использовались различные потоки входных данных (изображения). Результаты выполнения криптопреобразования над потоком входных данных и обратного преобразования на основе генетического алгоритма с одноточечным кроссинговером и простой мутацией представлен на рис. 2. Как видно, результаты обратимого криптопреобразования достаточно сильно влияют на исходные данные и затрудняют анализ исходных данных.

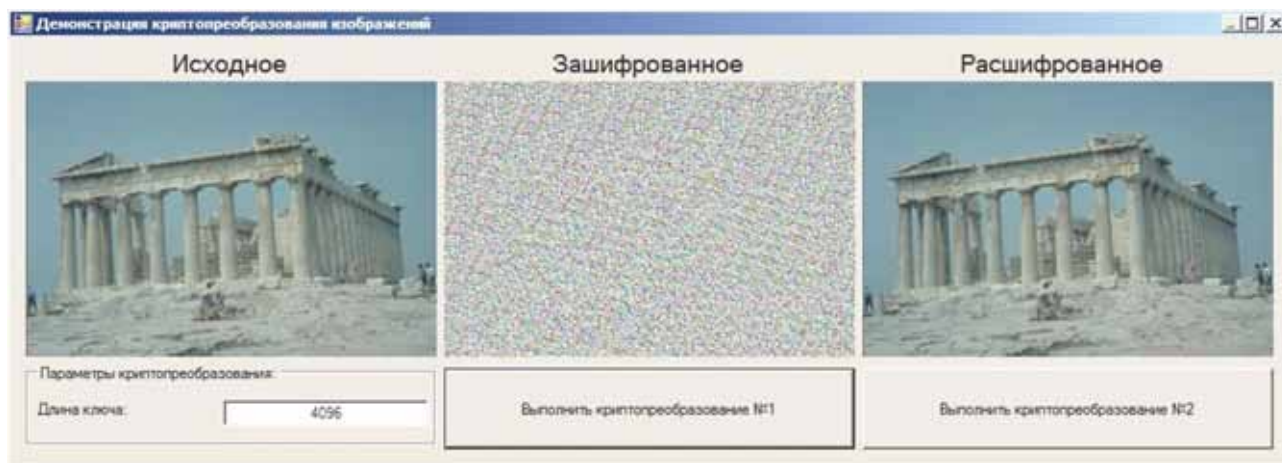


Рис 2. Пример криптопреобразования исходного сообщения

На рис. 3 представлены графики зависимости времени исполнения параллельного и последовательного алгоритма на основе расслоения и организации конвейера для различных изображений (рассматривается время на выполнение криптопреобразования исходных данных и обратное преобразование).

Тестирование разработанных приложений производилось на HP Workstation xw8200 под управлением Microsoft Windows 2000, оснащенных двумя микропроцессорами Intel Pentium 4 Xeon 3,6Ghz (1Mb L1 cache), с поддержкой технологии Hyper Threading, объем оперативной памяти 4Gb.

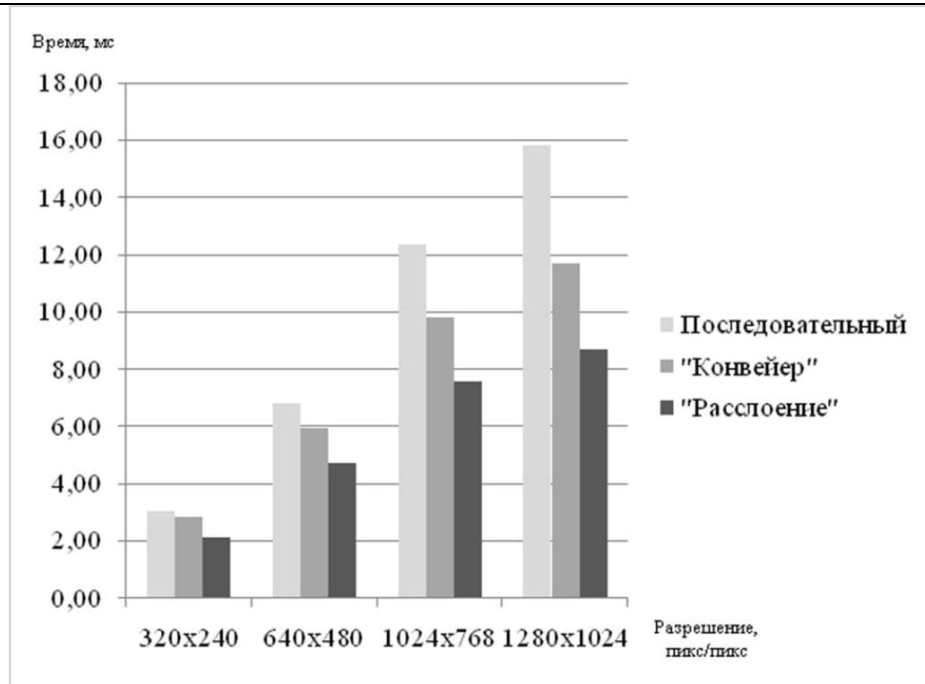


Рис. 3. Диаграмма зависимости времени выполнения прямого и обратного криптопреобразования для различных изображений.

### Заключение

В работе рассмотрен один из подходов к построению математической модели простого генетического алгоритма с одноточечным кроссинговером и простой мутацией, описан процесс его функционирования. На основе рассматриваемой математической модели предложены пути распараллеливания генетических алгоритмов для систем с SMP-архитектурой. Построена схема для обратимого криптопреобразования исходных данных на основе нелинейного сдвигового регистра с обратной связью.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Курейчик, В. М. Генетические алгоритмы : моногр. / В. М. Курейчик. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 1998. – 242 с.
2. Мартынов, А. И. Методы и задачи криптографической защиты информации /А. И. Мартынов : учеб. пособие – Ульяновск : УЛГТУ, 2007. – 92 с.
3. Топорков, В. В. Модели распределенных вычислений / В. В. Топорков. – М. : ФИЗМАТ-ЛИТ, 2004. – 320 с.
4. Трещёв, И. А. Программное обеспечение для перебора последовательностей на компьютерах с SMP-архитектурой / И.А. Трещев // XXXI Дальневосточная школа-семинар имени академика Е.В. Золотова. – Владивосток : Дальнаука, 2006. – С. 183.
5. Alba E., Troya J.M.A Survey of Parallel Distributed Genetic Algorithms/ E. Alba, J.M. Troya // Complexity. – 1999. – Vol.4 – P.31–52.
6. Alba E., Troya J.M.Analyzing Synchronous and Asynchronous Parallel Distributed Genetic Algorithms / E. Alba, J.M. Troya // Future Generation Computer Systems. – 2001. – Vol.17. – p. 451-465.
7. Cantu-Paz E. A.Survey of Parallel Genetic Algorithms / E. A. Cantu-Paz // Reseaux et Systems Repartis. Paris: Hermes. – Vol. 10. – 1997. – 141–171 p.
8. Goldberg D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning / D. E. Goldberg// Boston: Addison-Wesley. – 1989. – 372 p.
9. Michalewicz Z. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs / Z. Michalewicz // Berlin: Springer Verlag. – 1996. – 387 p.

**Сариллов М.Ю.**  
**Sarilov M.Yu.**

**К ВОПРОСУ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ  
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

**ON THE ISSUE OF THE ADAPTIVE CONTROL OVER THE PROCESS OF ELECTRIC-  
AL DISCHARGE MACHINING**



**Сариллов Михаил Юрьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [sarilov@knastu.ru](mailto:sarilov@knastu.ru).

**Mikhail Y. Sarilov** – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: [sarilov@knastu.ru](mailto:sarilov@knastu.ru)

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены вопросы устойчивости и автоматизации электроэрозионной обработки. Предложено дифференциальное уравнение устойчивости процесса обработки в целом, а также уравнение устойчивости импульса по методу Ляпунова. Описаны пять основных видов импульсов, присутствующих при электроэрозионной обработке. Предложена схема адаптивного управления процессом ЭЭО.

**Summary:** The paper examines the issues of sustainability and automation of electrical discharge machining. Proposed is a differential equation of the stability of the processing in general, and also an equation of the stability of the pulse by the Lyapunov method. Also the paper describes five main types of pulses present at spark processing. A scheme for adaptive control of the EDM is proposed.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, автоматизация, эвакуация, устойчивость, адаптивное управление, импульс, нейронная сетка, зазор, станок, производительность.

**Key-words:** electrical discharge processing, automation, evacuation, stability, adaptive control, pulse, neural nets, gap, machine performance

УДК 621.9.048.4: 681.324

Традиционно процесс электроэрозионной обработки (ЭЭО), как объект автоматизации, рассматривается в виде трех тесно взаимосвязанных между собой систем регулирования:

а) системы автоматического регулирования межэлектродного расстояния, поддерживающей величину зазора на уровне, не превышающем расстояния возникновения стабильных электроимпульсных разрядов, но в то же время достаточном для обеспечения беспрепятственной эвакуации продуктов эрозии;

б) системы оптимального управления электрической мощностью, вводимой в зону обработки, для достижения максимальной производительности при изменяющейся площади обработки;

в) системы автоматического регулирования частоты и тока для получения заданного качества поверхности в минимальное время.

Из этих систем первая находится на стадии промышленного применения, вторая – частично на стадии промышленного применения и экспериментального опробования и, наконец, последняя система – на стадии исследования [1].

Таким образом, традиционная схема автоматизации электроэрозионных операций до настоящего времени еще не реализована в полной мере, и перспективы ее развития остаются под вопросом. Между тем, более эффективным видится подход в формировании единой, не



разделенной на подсистемы, адаптивной системы управления процессом ЭЭО, созданной на общем принципе анализа устойчивости процесса обработки, оцениваемой в различных масштабах времени.

Под устойчивостью будем понимать способность сохранять в течение заданного промежутка времени стабильными такие параметры ЭЭО, как производительность, качество получаемой поверхности, точность формообразования и стойкость электрода-инструмента, несмотря на возникновение в системе случайных или закономерных возмущений.

Если обозначить через  $p_1, p_2, \dots, p_n$  параметры, определяющие процесс ЭЭО, тогда динамика процесса описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями, которые могут быть решены относительно производных по времени:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = Y_1(p_1, p_2, \dots, p_n, t) \\ \dots \\ \frac{dp_n}{dt} = Y_n(p_1, p_2, \dots, p_n, t) \end{cases} \quad (1)$$

где  $Y_1, \dots, Y_n$  – известные функции переменных  $p_1, p_2, \dots, p_n$  по времени  $t$ , удовлетворяющие условиям существования и единственности решения. Невозмущенному состоянию процесса отвечает определенное частное решение

$$p_1 = f_1(t), p_2 = f_2(t), \dots, p_n = f_n(t)$$

дифференциальных уравнений (1), удовлетворяющих условиям:

$$\text{при } t = t_0: p_1 = f_1(t_0), p_2 = f_2(t_0), \dots, p_n = f_n(t_0). \quad (2)$$

Изменив условия (2) и дав начальным значениям параметров  $p_1, p_2, \dots, p_n$  небольшие по модулю приращения  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ , получим начальные условия, соответствующие возмущенному развитию процесса обработки:

$$\text{при } t = t_0: p_1 = f_1(t_0) + \varepsilon_1, p_2 = f_2(t_0) + \varepsilon_2, \dots, p_n = f_n(t_0) + \varepsilon_n.$$

Обозначив значения параметров  $p_j$  в возмущенном развитии процесса через  $p_j(t)$ , а в невозмущенном – через  $f_j(t)$ , получим вариации  $\Delta p_j$  параметров процесса ЭЭО:

$$\Delta p_j = p_j(t) - f_j(t), (j = 1, 2, \dots, n).$$

Тогда, исходя из критерия Ляпунова, условие устойчивости процесса ЭЭО будет иметь вид:

$$\lim_{t \rightarrow \tau} \Delta p_j(t) \leq \delta_j, \quad (3)$$

где  $\delta_j$  – максимально допустимое отклонение  $j$ -го параметра обработки;  $\tau$  – заданный интервал времени.

С позиций адаптивного управления технологическими параметрами ЭЭО устойчивость динамической системы процесса формообразования удобно рассматривать в трех масштабах времени.

Если интервал времени  $\tau$  в условии (3) ограничить длительностью импульса  $\tau \leq t_{ин}$ , а в качестве  $\Delta p$  считать отклонение от падения напряжения на межэлектродном промежутке, то при соблюдении условия (3) можно говорить об устойчивости процесса ЭЭО в *масштабе времени единичного импульса*.

Неустойчивость в масштабе импульса означает, что по каким-либо причинам единичный электроимпульсный разряд не может быть инициирован, а если возникает, то обрывается, не совершив требуемой полезной работы. Такая неустойчивость напрямую влияет на производительность обработки и косвенно на качество обработанной поверхности.

Устойчивость в масштабе импульса может быть достаточно легко исследована с помощью прямого метода Ляпунова исходя из дифференциального уравнения установившихся режимов вольтовой дуги в цепи с сопротивлением  $R$  и самоиндукцией  $L$ :

**Сарилов М.Ю.**

## К ВОПРОСУ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \varphi(i) = E, \quad (4)$$

где  $i$  – ток, протекающий между электродами;  $E$  – напряжение источника питания;  $\varphi(i)$  – нелинейная зависимость между током  $i$  и напряжением  $u$  в дуговом промежутке.

За невозмущенное развитие дугового процесса примем условие  $i = I$  (где  $I$  – ток в установившейся дуге), а за возмущенное – выражение  $i = I + \varepsilon$ . Тогда функцией Ляпунова для уравнения (4) является определенно-положительная функция [2]:

$$V = \frac{1}{2} L \varepsilon^2.$$

Ее производная по времени  $\dot{V}$ , вычисленная в силу дифференциального уравнения возмущенного режима дугового разряда, будет отрицательно-определенной функцией  $\varepsilon$  при выполнении условия  $R + \dot{\varphi}(i) > 0$  и, следовательно, на основании теоремы Ляпунова об устойчивости. При выполнении данного условия режим протекания электроимпульсного разряда будет асимптотически устойчив.

Таким образом, зная характер зависимости  $\varphi(i)$ , несложно реализовать электронную схему автоматического поддержания устойчивости процесса ЭЭО в масштабе времени единичного импульса.

Если интервал времени в условии (3) сделать бесконечно большим  $\tau = \infty$ , то можно говорить об устойчивости в *масштабе времени технологической операции*. Данный вид устойчивости ЭЭО будет иметь место при соблюдении в заданном весьма большом интервале времени баланса вновь образующихся эвакуируемых продуктов эрозии. Если обозначить через  $M_0$  общий объем продуктов эрозии, образующихся в единицу времени, а через  $M_v$  – количество продуктов эрозии, которое может быть удалено при данных условиях в ту же единицу времени (скорость эвакуации), то условие устойчивости процесса ЭЭО в масштабе времени технологической операции запишется как:

$$M_0 \leq M_v.$$

Неустойчивость ЭЭО в масштабе времени технологической операции существенно снижает производительность обработки, но может быть устранена различными технологическими приемами, улучшающими условия эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки, например применением принудительной прокачки рабочей жидкости, вибрации или вращения электродов.

Промежуточное положение между масштабами времени единичного импульса и технологической операции занимает наиболее информативный с позиций диагностики процесса ЭЭО *масштаб времени серии импульсов*. Этот масштаб определяется интервалом времени  $\tau = nt_{и}$ , где  $n$  – количество импульсов в серии. Неустойчивость ЭЭО в масштабе серии импульсов (которую коротко можно охарактеризовать как неперIODичность возникновения полноценных рабочих электроэрозионных разрядов в межэлектродном промежутке) не только снижает производительность обработки, но и существенно ухудшает качество получаемой поверхности, а также приводит к интенсивному износу электрода-инструмента и, как следствие, снижает точность формообразования. Рассмотрение механизма возникновения электроимпульсного разряда показало, что существует, по крайней мере, пять видов электрических импульсов, подводимых в зону обработки [3]:

1) *рабочий импульс*, после которого возникают стабильный дуговой разряд и лунка на поверхности электрода-заготовки, соответствующая некоторым номинальным средним условиям ЭЭО;

2) *импульс холостого хода*, характеризующийся отсутствием возникновения дугового разряда между электродами из-за слишком большого зазора;



3) *импульс короткого замыкания*, который наблюдается при замыкании электродов через микронеровности на их поверхностях и также не сопровождающийся возникновением дугового разряда;

4) *повторный импульс*, то есть совмещение в пространстве предыдущего и последующего разрядов, что обычно происходит, когда пауза между импульсами мала. Поскольку на заготовке нет пространственного переноса лунок, то нарушается сам принцип электроэрозионного формообразования;

5) *фиктивный импульс*, сопровождающийся пробоем газовой, но не жидкой фазы, и характеризующийся малым объемом лунки, возникающей на электроде-заготовке.

В настоящее время для получения информации о состоянии межэлектродного зазора и диагностики возникающих там электроимпульсных разрядов используют электрические характеристики процесса ЭЭО. Но при таком подходе не представляется возможным провести четкую классификацию между рабочими, повторными и фиктивными импульсами. А между тем повторные импульсы крайне нежелательны в процессе ЭЭО, так как нарушают равномерность распределения эрозионных лунок на поверхности электрода-детали, чем снижают качество обработанной поверхности, а также в силу несимметричного распределения энергии возникающего дугового разряда вызывают интенсивный износ электрода-инструмента.

Проведенные экспериментальные исследования показали [4], что повторные, а также (в несколько меньшей степени) фиктивные импульсы характеризуются избытком энергии, которая в отсутствии процесса образования эрозионной лунки рассеивается в виде ударной волны, распространяющейся в рабочей жидкости и электродах и четко фиксируемой с помощью датчика акустической эмиссии, закрепленного на электроде-инструменте.

Таким образом, для четкой диагностической классификации периодических импульсных процессов, происходящих в межэлектродном промежутке, необходимо трехканальное регистрирующее устройство, фиксирующее импульсы напряжения  $U_j$  между электродами, тока  $I_j$  и импульсы акустической эмиссии  $A_j$ , возникающие в процессе обработки ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

На базе данной диагностики был осуществлен принцип адаптивного управления, заключающийся в создании таких условий процесса ЭЭО, при которых серия импульсов состояла бы из максимально большого количества равномерно следующих рабочих импульсов, не перемежаемых повторными или фиктивными импульсами, и не прерывалась при этом импульсами холостого хода или короткого замыкания. То есть был использован метод управления устойчивостью процесса ЭЭО в масштабе времени серии импульсов.

Так как серия импульсов представляет собой явление, плохо формализуемое с помощью аналитических зависимостей, то прямой метод Ляпунова для анализа устойчивости процесса ЭЭО в этом масштабе времени оказался неприменим. Поэтому для оценки устойчивости были использованы методы нелинейной динамики, в частности критерий оценки хаотичности временных рядов с помощью вычисления фрактальной размерности  $D_0$ , реконструированного по ряду аттрактора динамической системы.

В качестве элементов временного ряда использовались показатели полезной работы, совершенной каждым из единичных энергетических импульсов серии, – объем  $V_j$  лунки, формируемой импульсом на электроде-заготовке. Объем  $V_j$  предложено находить из эмпирической зависимости вида:

$$V_j = \mathfrak{F}(U_j I_j - k A_j), \quad (5)$$

где  $\mathfrak{F}$  – нелинейная функция;  $k$  – эмпирический коэффициент.

В этом выражении член  $U_j I_j$  характеризует количество электрической энергии, введенной в межэлектродный зазор, а член  $k A_j$  – количество энергии, не потраченной на эрозию электродов, а рассеянной в виде ударной волны.

Так как характеристики функции  $\mathfrak{F}$  заранее неизвестны, то для реализации формулы (5) была использована нейронная сеть – трехслойный персептрон (на рис. 1 обозначена цифрой

III). Обучение сети производилось на основе экспериментальных данных методом обратного распространения ошибки.

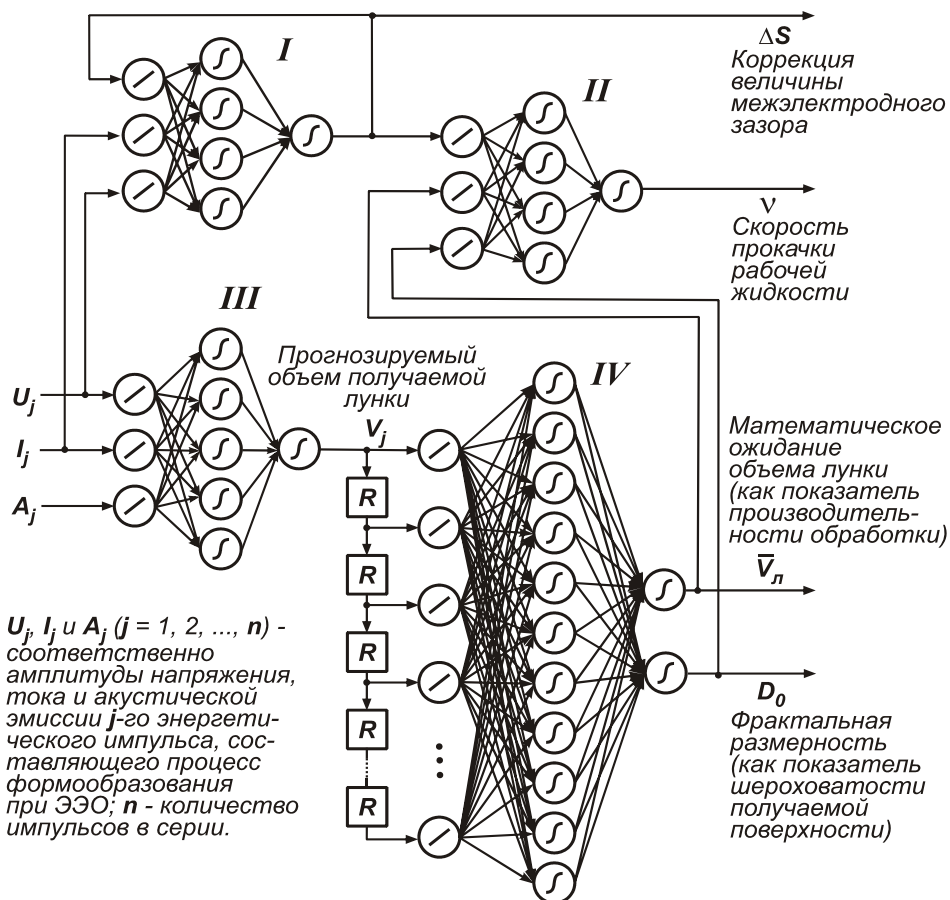


Рис.1. Адаптивная система управления процессом ЭЭО. Нейронная сеть **I** управляет устойчивостью обработки в масштабе времени единичного импульса, сеть **II** контролирует устойчивость процесса в масштабе времени технологической операции, сети **III** и **IV** управляют устойчивостью ЭЭО в масштабе времени серии импульсов.

Сформированный временной ряд  $V_1, V_2, \dots, V_n$  служит исходными данными для реконструкции аттрактора динамической системы процесса ЭЭО. Реконструкция проводилась методом задержек с помощью динамической нейронной сети (на рис. 1 обозначена цифрой IV). Данная сеть имеет 4096 входов, на которые с помощью сдвиговых регистров (на рисунке обозначены буквой R) подаются значения  $V_j$ . Таким образом, сеть непрерывно анализирует параметры последних 4096 эрозионных лунок, образующихся ( $V_j$  много больше 0 для рабочих,  $V_j$  стремится к 0 для повторных и фиктивных импульсов) или не образующихся ( $V_j$  равно 0 для импульсов холостого хода и короткого замыкания) после соответствующих им 4096 электрических разрядов, поданных на электроды. Обновление временного ряда происходит последовательно – каждый вновь формирующийся на выходе сети III элемент  $V_1$  сдвигает ряд на одну позицию в сторону увеличения порядковых номеров элементов ряда и «выталкивает» из регистров самый последний элемент. Сети III и IV синхронизированы между собой тактовыми сигналами, которые вырабатывает сеть III и частота которых совпадает с частотой следования электрических импульсов, подаваемых генератором станка в зону обработки.

Первый слой сети IV состоит из 4096 нейронов с линейной активационной функцией и служит для нормирования входных данных. Второй слой состоит из 1024, а третий – из 2 нелинейных нейронов с сигмоидной логистической функцией активации. Основной функцией нелинейных слоев сети IV является реконструкция аттрактора и вычисление его фрактальной размерности  $D_0$ . Параллельно с этим сетью решается задача вычисления среднего значения

объема  $\bar{V}_л$  эрозионной лунки для серии из последних 4096 произведенных генератором станка электрических импульсов:

$$\bar{V}_л = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_j, n = 4096.$$

Для чистовых режимов обработки (частота генератора  $f_r = 22$  кГц) окно усреднения составляет 0,186 с, для черновых ( $f_r = 4$  кГц) – 1 с.

Получаемый сетью параметр фрактальной размерности  $D_0$  аттрактора динамической системы процесса ЭЭО очень тесно коррелирует с шероховатостью  $R_a$  получаемой поверхности, поэтому используется в адаптивной системе, как информативный признак качества обработки. Параметр  $\bar{V}_л$  позволяет судить о том, насколько интенсивно происходит эрозия электрода-заготовки, то есть является информативным признаком производительности ЭЭО. Опираясь на эти два информативных признака, производится управление устойчивостью процесса ЭЭО в масштабе времени серии путем подстройки в соответствии с типовыми алгоритмами оптимизации электрических режимов обработки (частота, скважность, количество задействованных ключей генератора), обеспечивая тем самым максимальную производительность при сохранении приемлемого качества обработанной поверхности.

Аналогичным образом с использованием нейронносетевых алгоритмов производится управление устойчивости процесса ЭЭО в других масштабах времени – масштабе времени и масштабе технологической операции. Для этого в состав адаптивной системы управления (рис. 1) введены две нейронные сети I и II, которые управляют соответственно величиной межэлектродного расстояния  $S$  и скоростью  $v$  прокачки рабочей жидкости. Сеть I регистрирует факт наличия в процессе обработки импульсов холостого хода или короткого замыкания и в зависимости от этого вырабатывает отрицательный либо положительный сигнал коррекции  $\Delta S$  величины межэлектродного зазора. Сеть II отслеживает величину межэлектродного зазора, а также устойчивость возникновения рабочих разрядов в серии импульсов и контролирует скорость течения рабочей жидкости таким образом, чтобы добиться максимальной эвакуации продуктов эрозии из зазора, но с другой стороны не нарушать при этом механизм мостикообразования и условий устойчивого возбуждения разрядов.

Описываемая адаптивная система была реализована в части управления устойчивостью процесса ЭЭО в масштабе времени серии импульсов. Объектом управления служил электроэрозионный копировально-прошивочный станок 4Л721Ф1. Адаптивная система управления исполнена в виде ПЭВМ, оснащенной четырехканальным цифровым осциллографом, программным образом реализованными нейронными сетями и алгоритмами оптимизации. Станок был оснащен дополнительными датчиками тока, напряжения и акустической эмиссии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кабалдин, Ю. Г. Повышение устойчивости процесса электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта / Ю. Г. Кабалдин, М. Ю. Сариллов, С. В. Биленко. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 191 с.
2. Электроимпульсная обработка металлов / А. Л. Лившиц, А. Т. Кравец, И. С. Рогачев, А. Б. Сошенко – М. : Машиностроение, 1967. – 294 с.
3. Меркин, Д. Р. Введение в теорию устойчивости движения / Д. Р. Меркин – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 304 с.
4. Сариллов, М. Ю. Выбор параметров управления процессом электроэрозионной обработки / М. Ю. Сариллов, М. А. Покотило // Известия ТулГУ. – Тула : ТулГУ, 2006. – С. 80-87.

**Сулицин А.В., Мысик Р.К., Голоднов А.И., Брусницын С.В.**  
**Sulitsin A.V., Mysik R. K., Golodnov A. I., Brusnitsin S. V.**

**ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА МАКРО- И МИКРОЛИКВАЦИЮ  
КАДМИЯ В СЛИТКАХ КАДМИЕВОЙ БРОНЗЫ**

**VIBRATION INFLUENCE ON THE INVERTED-V-SHAPED AND DENDRITIC SEGREGATION OF CADMIUM IN INGOTS OF CADMIUM BRONZE**



**Сулицин Андрей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» Уральского государственного технического университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург). E-mail: [kafedralp@mail.ru](mailto:kafedralp@mail.ru).

**Mr. Andrey V. Sulitsin** – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University (city of Yekaterinburg), e-mail: [kafedralp@mail.ru](mailto:kafedralp@mail.ru).



**Мысик Раиса Константиновна** – доктор технических наук, профессор кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» Уральского государственного технического университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург). E-mail: [kafedralp@mail.ru](mailto:kafedralp@mail.ru).

**Ms. Raisa K. Mysik** – Doctor of Engineering, Professor, Department of the Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University, (city of Yekaterinburg), e-mail: [kafedralp@mail.ru](mailto:kafedralp@mail.ru).



**Голоднов Антон Игоревич** – ассистент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» Уральского государственного технического университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург). E-mail: [kafedralp@mail.ru](mailto:kafedralp@mail.ru).

**Mr. Anton I. Golodnov** – Assistant Lecturer, Department of the Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University, (city of Yekaterinburg), e-mail: [kafedralp@mail.ru](mailto:kafedralp@mail.ru).



**Брусницын Сергей Викторович** – доктор технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» Уральского государственного технического университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, Екатеринбург). E-mail: [kafedralp@mail.ru](mailto:kafedralp@mail.ru).

**Mr. Sergey V. Brusnitsyn** - Doctor of Engineering, Professor, Department of the Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University, (city of Yekaterinburg), e-mail: [kafedralp@mail.ru](mailto:kafedralp@mail.ru).

**Аннотация.** В работе рассмотрено влияние вибрационной обработки расплава на ликвацию кадмия в слитках кадмиевой бронзы. В ходе исследований установлено, что вибрационная обработка расплава с частотой 25 Гц и амплитудой 0,4 мм снижает обратную и внутридендритную ликвацию кадмия в слитках кадмиевой бронзы.

**Summary:** The paper is concerned with the influence of vibration treatment of melt on the inverted-V-shaped and dendritic segregation of cadmium in ingots of cadmium bronze. In the course of research it was



determined that vibration treatment of melt with the frequency of 25 Hz and amplitude of 0,4 mm decreases the inverted-V-shaped and dendritic segregation of cadmium in ingots of cadmium bronze.

**Ключевые слова:** вибрация, ликвация, кадмиевая бронза.

**Key-words:** Vibration, segregation, cadmium bronze

УДК 621.74:669.35.6

В настоящее время кадмиевая бронза БрКд1 широко применяется в электротехнической промышленности, поскольку кадмий, присутствующий в этом сплаве, незначительно снижает теплопроводность и электропроводность меди, при этом значительно повышает ее прочностные характеристики [7; 3; 4]. Кроме того, эта бронза обладает способностью к искрогашению [5]. Из БрКд1 изготавливают контактные провода для электрифицированного транспорта, коллекторные пластины роторов и статоров электрических двигателей и генераторов, электроды сварочных машин, контакты высоковольтных электрических разъединителей и другие изделия электротехнического назначения [5].

Качество готовой продукции во многом определяется качеством исходных полуфабрикатов, а получение качественных слитков из кадмиевой бронзы в настоящее время сопряжено с большими технологическими трудностями. Прежде всего, это большая склонность сплава к обратной ликвации. Появление ликвата на поверхности слитков приводит к износу кристаллизатора и значительно снижает качество поверхности слитка. Учитывая тот факт, что научно-технический прогресс в отраслях промышленности, использующих медные сплавы, требует непрерывного повышения качества деформированных полуфабрикатов, весьма актуальным является исследование ликвационных процессов и определение реальных путей снижения неоднородности слитка по химическому составу.

Вопросы ликвации на протяжении многих лет являются предметом пристального внимания исследователей. М. Флеминг, рассматривая вопросы макроликвации, считает, что основной причиной ликвации в отливках и слитках является перемещение жидкой и твердой фаз в двухфазной твердожидкой зоне [9]. Таким образом, существенную роль в процессе распределения примесей играет характер кристаллизации. Объемный характер кристаллизации и снижение величины зерна будут способствовать подавлению ликвационных процессов.

В настоящее время известно несколько способов воздействия на расплав в процессе кристаллизации: введение в кристаллизующийся расплав микрохолодильников, электромагнитное перемешивание, вибрационная обработка и др. Наиболее технологичным способом воздействия при литье заготовок является вибрационная обработка. Эксперименты, проведенные нами ранее [8], показали, что при воздействии вибрации на кристаллизующуюся бронзу марки БрКд1 с частотой  $\nu = 25$  Гц и амплитудой  $A = 0,4$  мм удается значительно уменьшить среднюю площадь сечения зерна в структуре слитков кадмиевой бронзы БрКд1. При этом в работе [8] не рассматривалось изменение размера зерна по сечению слитка. Кроме того, неизученным осталось влияние вибрации на микроструктуру слитков из бронзы марки БрКд1. Поэтому на следующем этапе нашей работы было решено установить влияние вибрации не только на химическую однородность слитков из бронзы БрКд1, но и на равномерность макро- и микроструктуры по сечению слитка.

Испытания проводились при литье бронзы марки БрКд1. Плавка металла велась в печах ИЛК 1,6. Для создания вибрации в расплаве жидкой кадмиевой бронзы использовался вибростол (см. рис. 1).

Под действием механического вибратора 3 плита 2 совершает возвратно-поступательные движения в вертикальном направлении, при этом частота колебаний задается скоростью вращения электродвигателя, а амплитуда определяется эксцентриком, установленным на вал двигателя. Сверху на плиту устанавливали медную изложницу 5, предварительно подогретую до 250 °С. Жидкий металл, нагретый до температуры 1130 °С, заливали в изложницу, совершающую колебательные движения с частотой  $\nu = 25$  Гц и амплитудой  $A = 0,4$  мм. Вибрационную обработку прекращали после полного затвердевания слитка. В результате были

получены слитки диаметром 40 мм и высотой 55 мм. Для оценки эффективности вибрационного воздействия был залит контрольный слиток без наложения колебаний.

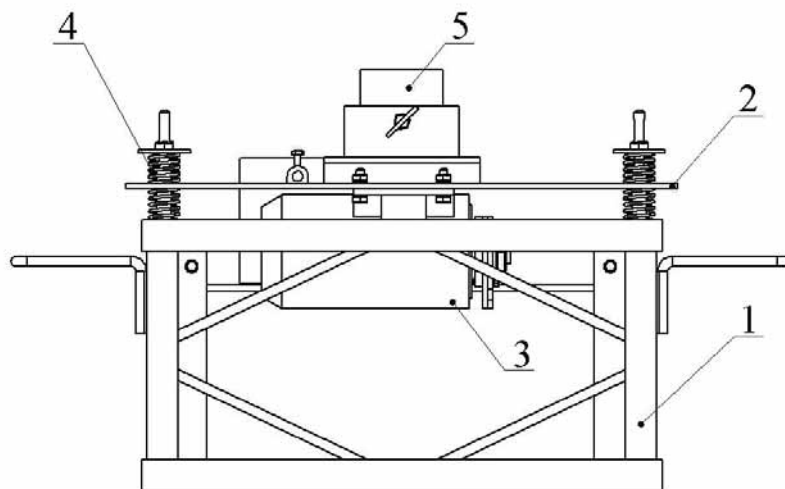
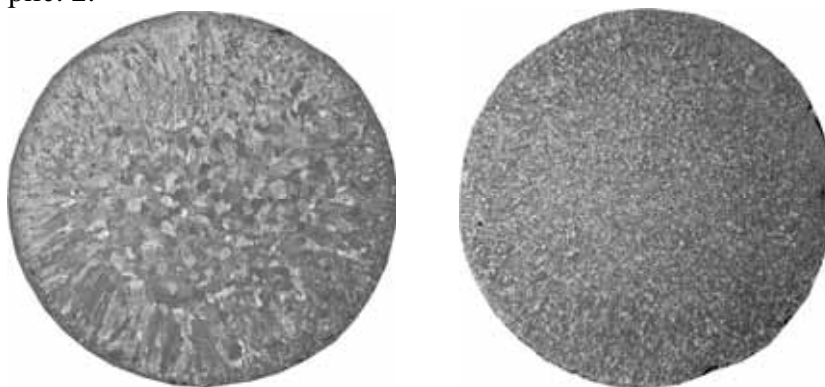


Рис. 1. Схема вибростола: 1 – основание; 2 – плита;  
3 – вибратор; 4 – пружина; 5 – изложница

Слитки разрезали для выполнения металлографического исследования. Площадь зерна рассчитывали на каждом шлифе в семи различных точках, после чего все данные для каждой исследуемой области слитка усредняли. Расчет производили методом подсчета зерен для областей с мелкими равноосными кристаллами, а для областей с ярко выраженной столбчатой структурой – методом подсчета пересечений. Макроструктура полученных слитков представлена на рис. 2.

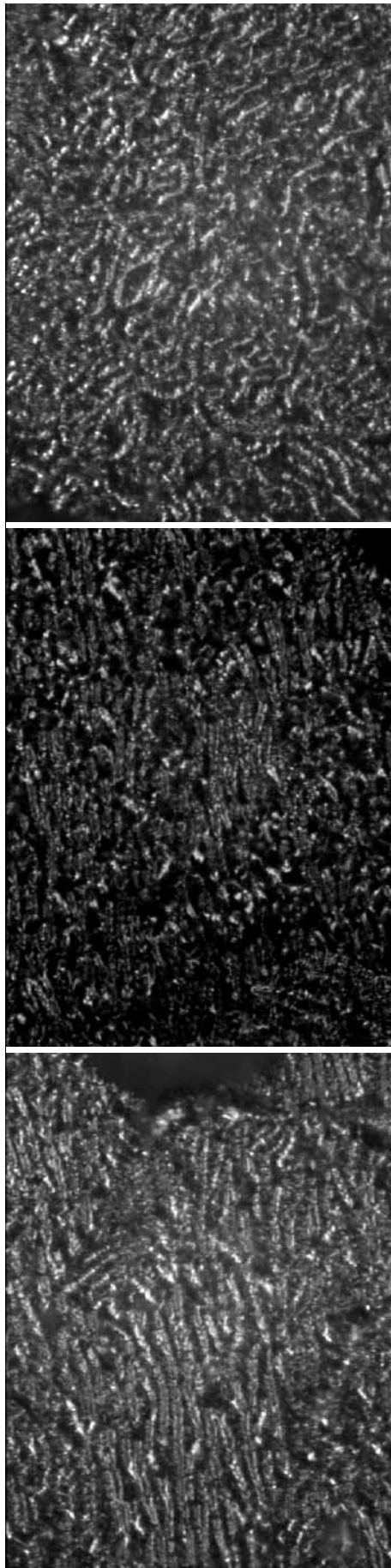


Без вибрации  
 $Z = 75,7 \%$   
 $S = 5,97 \text{ мм}^2$

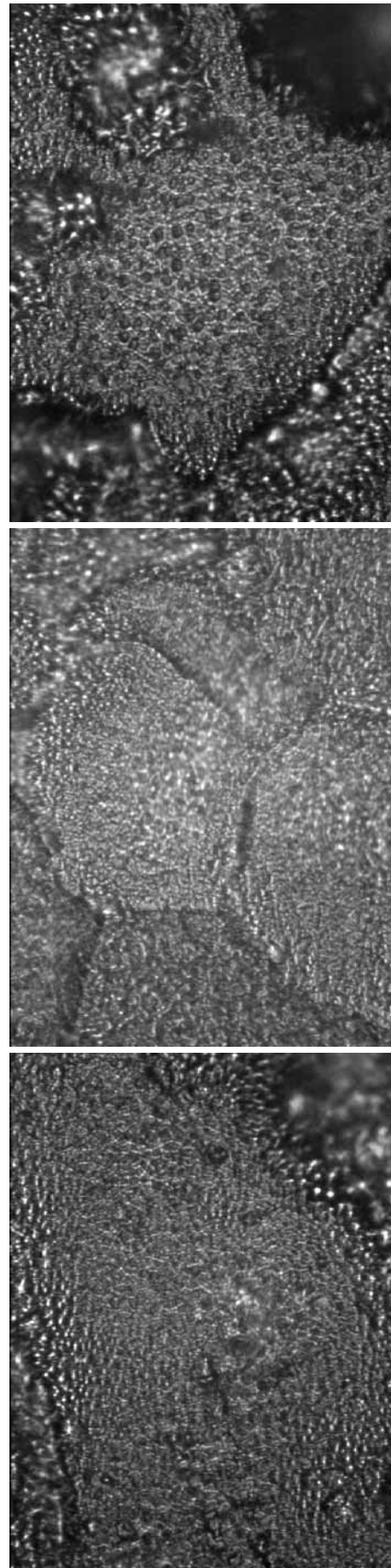
С применением вибрации  
 $\nu = 25 \text{ Гц}$ ,  $A = 0,4 \text{ мм}$   
 $Z = 0 \%$   
 $S = 0,6 \text{ мм}^2$

Рис. 2. Макроструктура слитков кадмиевой бронзы

Для изучения дендритного строения литых образцов использовали оптический микроскоп LECO-SA 2000 со встроенной цифровой камерой SONY DVC-R500. Размер дендритной ячейки рассчитывали на каждом шлифе в девяти различных точках, после чего все данные для каждой исследуемой области слитка усредняли. Измерение размера дендритной ячейки осуществляли с помощью программного продукта SIAMS Photolab 700. Микроструктура слитков представлена на рис. 3 – 4.



край  
1/2 R  
центр  
Рис. 3. Микроструктура слитка, оглитого без вибрационной обработки ( $\times 1000$ )



край  
1/2 R  
центр  
Рис. 4. Микроструктура слитка, оглитого под воздействием вибрации с частотой  $\nu = 25$  Гц и амплитудой  $A = 0,4$  мм ( $\times 1000$ )

Химическую однородность слитков исследовали по содержанию кадмия в пробах, отобранных послойной обточкой с усреднением навески для данного радиуса, атомно-абсорбционным методом с помощью спектрофотометра «Perkin-Elmer». Относительная погрешность анализа составляла  $\pm 5\%$ . Для оценки степени ликвации кадмия был использован приведенный коэффициент ликвации  $k$ , равный отношению содержания кадмия в данном слое к среднему для данного слитка. Результаты исследований представлены на рис. 5 – 7.

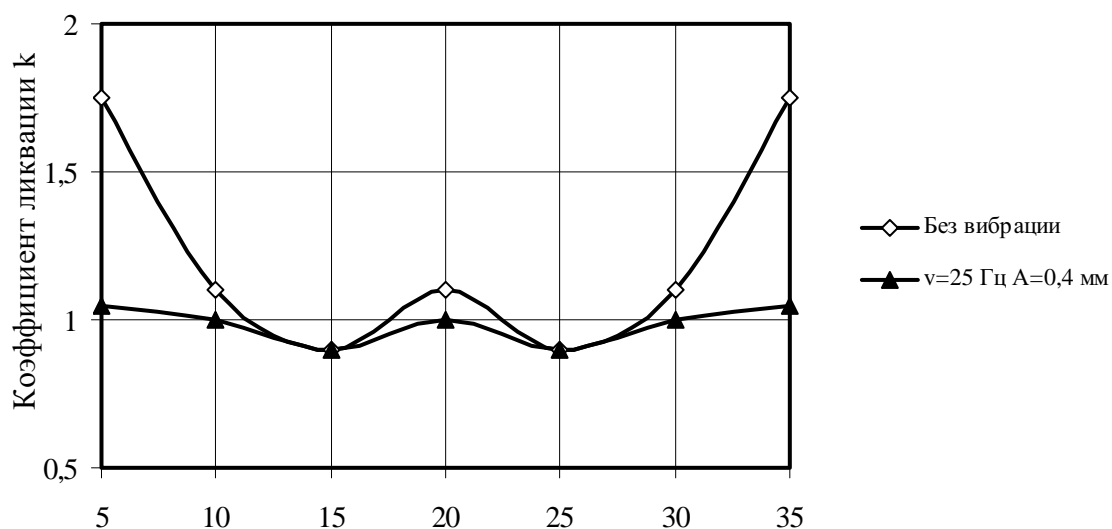


Рис. 5. Распределение кадмия по сечению опытных слитков бронзы БрКд1

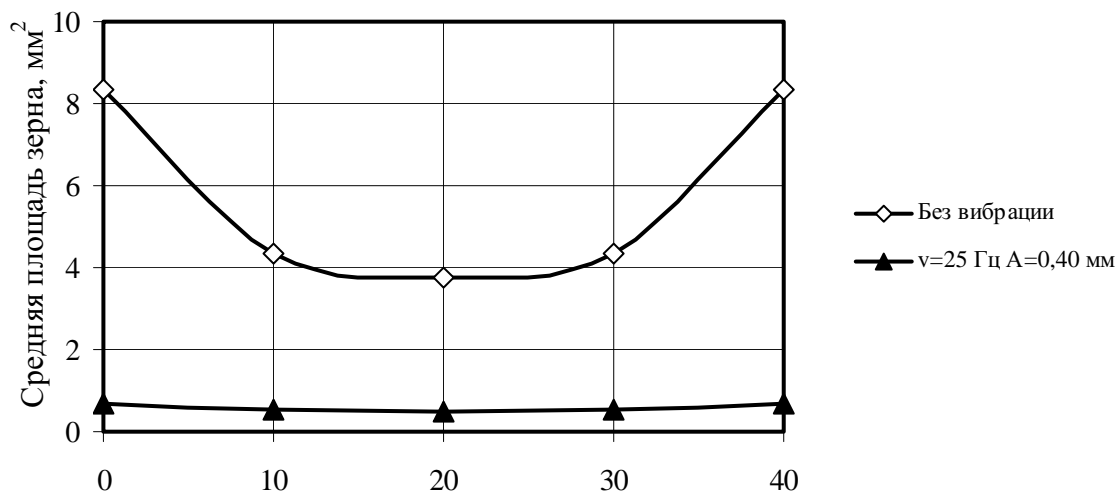


Рис. 6. Изменение средней площади макрозерна по сечению слитков бронзы БрКд1

Как видно из рис. 3 – 5, применение вибрации в процессе кристаллизации позволяет не только существенно измельчить макрозерно и дендритную ячейку, но и обеспечить химическую и структурную однородность слитка. Так, средняя площадь макрозерна по сечению контрольного слитка изменяется от 3,75 до 8,34  $\text{мм}^2$ , а по сечению слитка, отлитого под воздействием вибрации с оптимальными параметрами, – от 0,84 до 1,31  $\text{мм}^2$ . Средний размер дендритной ячейки по сечению контрольного слитка изменяется от 4,65 до 10  $\mu\text{м}$ , а по сечению слитка, отлитого под воздействием вибрации с оптимальными параметрами, – от 1,65 до 1,81  $\mu\text{м}$ . Коэффициент ликвации кадмия, характеризующий степень неоднородности хи-

мического состава, по сечению контрольного слитка изменяется от 0,9 до 1,75, а по сечению слитка, отлитого под воздействием вибрации с оптимальными параметрами, – от 0,9 до 1,05.

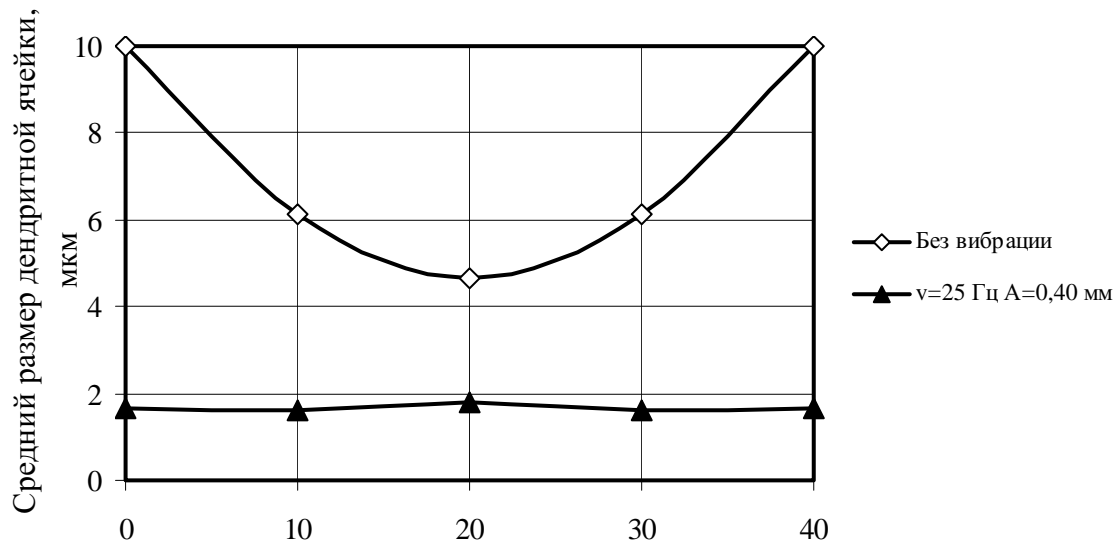


Рис. 7. Изменение среднего размера дендритной ячейки по сечению слитков бронзы БрКд1

Для изучения внутريدендритной ликвации кадмия использовали микрорентгеноспектральный анализ с помощью микроанализатора «САМЕВАХ». Микрорентгенограмма характеризует неравномерное распределение кадмия в сплаве БрКд1 с развитым дендритным строением, равноосной формой первичных кристаллов (см. рис. 8).

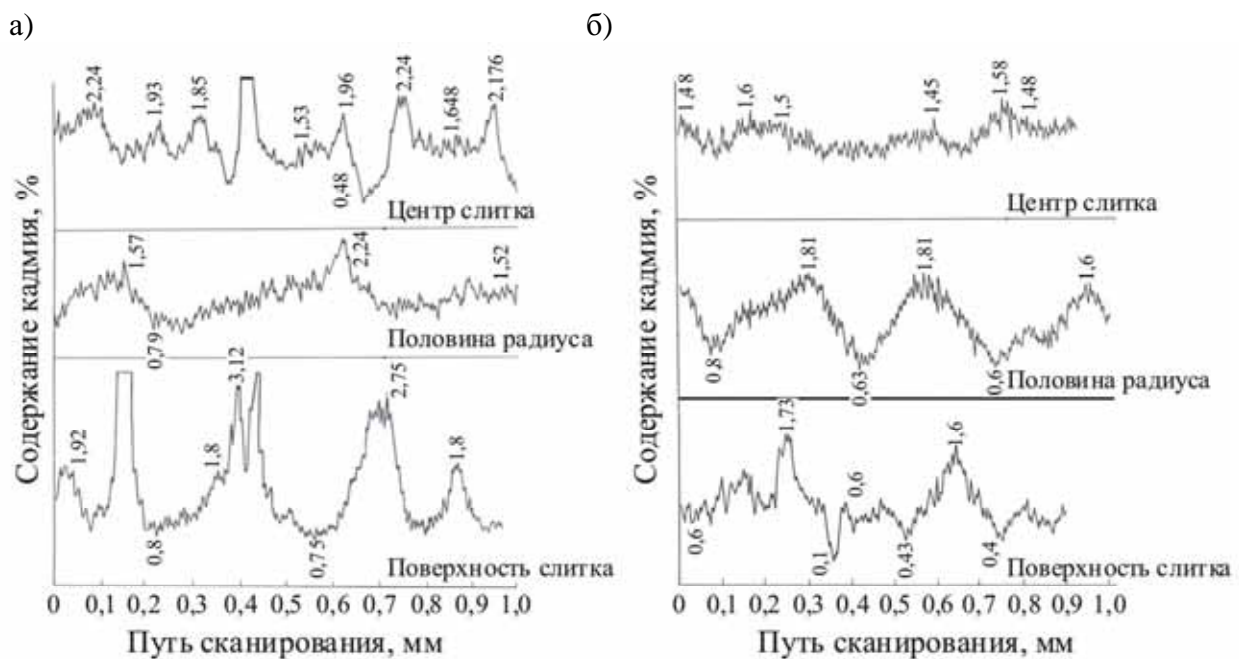


Рис. 8. Распределение кадмия по кристаллическому зерну: а – без вибрации; б – с применением вибрационного воздействия с частотой  $v = 25$  Гц и амплитудой  $A = 0,4$  мм

Поскольку большинство исследователей [2; 1; 6] считают, что основной причиной ликвации является движение жидкости через твердожидкую зону вследствие теплового сжатия, при усадке в процессе затвердевания и разности плотностей междендритной жидкости, положительное влияние вибрации на химическую однородность слитков из кадмиевой бронзы БрКд1 можно объяснить существенным изменением структуры слитков. Кроме того, вибрация, создаваемая в кристаллизующемся расплаве, способствует дополнительному перемешиванию расплава в лунке и усреднению химического состава во всем объеме жидкого металла.

Из рис. 8 видно, что междусные пространства в процессе затвердевания обогащены кадмием. Наблюдения показали, что при обычных условиях разливки микронеоднородность возрастает по мере приближения к поверхности слитка. При разливке сплава с применением вибрационного воздействия распределение кадмия более равномерное по сечению слитка. Подобный результат можно объяснить существенным измельчением микроструктуры слитков кадмиевой бронзы, что, безусловно, препятствует перемещению кадмия в твердожидкой зоне.

Работа выполнялась при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых Российских ученых.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Баландин, Г. Ф. Основы теории формирования отливок / Г. Ф. Баландин. – М.: Машиностроение, 1979. – 336 с.
2. Гуляев, Б. Б. Затвердевание и неоднородность стали / Б. Б. Гуляев. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 228 с.
3. Машиностроение. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. ТП-3 / под общ. ред. И. Н. Фридляндера. – М.: Машиностроение, 2001. – 880 с.
4. Николаев, А. К. Низколегированные медные сплавы. Особенности составов и технологии производства / А. К. Николаев // Цветные металлы. – 2001. – № 5. – С. 84-88.
5. Осинцев, О. Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справ. / О. Е. Осинцев, В. Н. Федоров. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с.
6. Рыжиков, А. А. Теоретические основы литейного производства / А. А. Рыжиков. – Свердловск: Машгиз, 1953. – 287 с.
7. Смирягин, А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы / А. П. Смирягин, Н. А. Смирягина, А. В. Белов. – М.: Metallurgiya, 1970. – 364 с.
8. Определение оптимальных параметров вибрационного воздействия на бронзу марки БрКд1 в процессе кристаллизации / А. В. Сулицин, А. И. Голоднов, Р. К. Мысик, С. В. Брусницын // Литейщик России. – 2009. – № 10. – С. 43-47.
9. Флемингс, М. Процессы затвердевания / М. Флемингс. – М.: Мир, 1977. – 423 с.

**Ким В.А., Каримов Ш.А.**  
**Kim V.A., Karimov Sh.A.**

### **РОЛЬ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ В КОНТАКТНЫХ ПРОЦЕССАХ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ**

### **THE ROLE OF WEAR-RESISTANT COATINGS IN CONTACT PROCESSES OF FRICTION AND WEAR**



**Ким Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

**Mr. Vladimiv A. Kim** – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: kmtnm@knastu.ru



**Mr. Shoir A. Karimov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Construction Materials Engineering, Tashkent State Technical University, Uzbekistan

**Аннотация.** Износостойкие покрытия повышают триботехнические характеристики поверхности не только за счет прочностных и фрикционных свойств, они также активно участвуют в формировании вторичных структур, создавая оптимальные условия для структурной приспособляемости. Сделана попытка раскрытия роли «островковости» в процессах контактного взаимодействия, трения и износа.

**Summary:** Wear-resistant coatings not only improve the tribotechnical characteristics of a surface due to their durable and frictional properties, they also actively participate in the development of secondary structures, creating optimum conditions for structural adaptation. An attempt is made to reveal the role of “islands” in contact interaction, friction and wear.

**Ключевые слова:** трение, износ, покрытия, износостойкость, напряжения, тепло, диффузия, вторичные структуры.

**Keywords:** friction, wear, surface, wear resistance, tension, heat, diffusion, secondary structures

УДК 621.81.4017+621.896

#### **Введение**

Износостойкие покрытия широко используются в машиностроении как средство повышения эксплуатационной надежности пар трения и работоспособности металлорежущего инструмента. Роль износостойких покрытий в триботехнических процессах объясняется экранирующей способностью, блокирующей прямой фрикционный контакт материалов; высокой степенью стехиометрии, обеспечивающей слабое адгезионное взаимодействие и низкий коэффициент трения; высокой твердостью и прочностью самого материала покрытия [1; 2]. Положительная роль износостойкого покрытия проявляется не только в период его существования как физического самостоятельного объекта, но и после его разрушения. Известно,

что при эксплуатации режущего инструмента износостойкие покрытия на рабочих поверхностях исчезают после 5...10 мин резания, а стойкость инструмента при этом повышается более чем в два раза и по времени составляет 1,5...3,0 ч [3; 4; 5].

В статье рассматривается роль износостойких покрытий, обеспечивающих благоприятные условия для протекания структурной приспособляемости в триботехнических процессах и развития вторичных контактных структур с повышенной износостойкостью.

### **Технологии нанесения износостойких покрытий и «островковость»**

Большинство технологий нанесения износостойких покрытий создает на поверхности композиционную структуру с высокими антифрикционными или прочностными свойствами [5]. Развитие покрытия начинается с активных зон осаждения материала, в которых образуются «островки», а затем по мере их роста формируется сплошной слой. Многие процессы нанесения покрытий предусматривают только развитие «островков» и образование покрытия с разной степенью нарушения сплошности. При нанесении покрытий электроискровым легированием и электроимпульсным припеканием порошковых материалов нарушение сплошности возникает за счет дискретности самих физических процессов массопереноса и импульсного воздействия, лежащих в основе этих технологий [6]. При нанесении карбидных и нитридных покрытий методом КИБ на стальную поверхность первичными центрами осаждения являются цементитная сетка и карбиды, расположенные в мартенситной матрице [7; 8]. Первичными центрами осаждения гальванических покрытий являются микролокальные зоны с повышенным катодным потенциалом и вершины микронеровностей [9].

Кинетика осаждения и роста покрытия определяет прочность связи с основой. Сцепляемость «островков» с подложкой выше, чем в остальных зонах. Характер роста «островковости» наследственно отражается на структуре и архитектонике покрытия в виде разнотолщинности, структурной неоднородности и пористости. На рис. 1 представлена поверхность покрытия из ВК6М, нанесенного электроискровым легированием на закаленную сталь У10. Следы несплошности проявляются в виде темных зон, а участки сплошных покрытий имеют выраженное ячеистое строение.

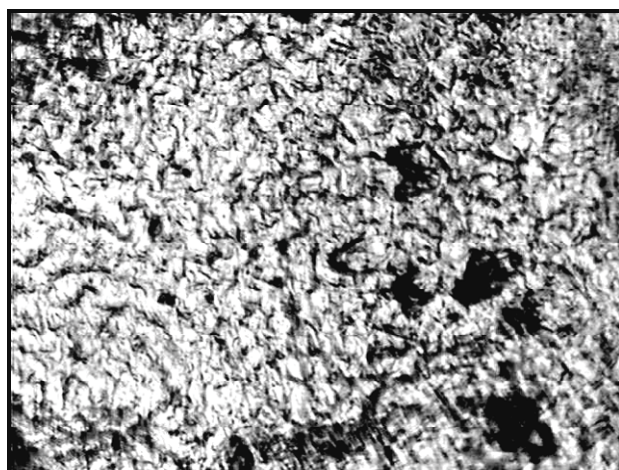


Рис. 1. Покрытие, полученное электроискровым легированием закаленной стали У10 легирующим электродом из ВК6М (x400)

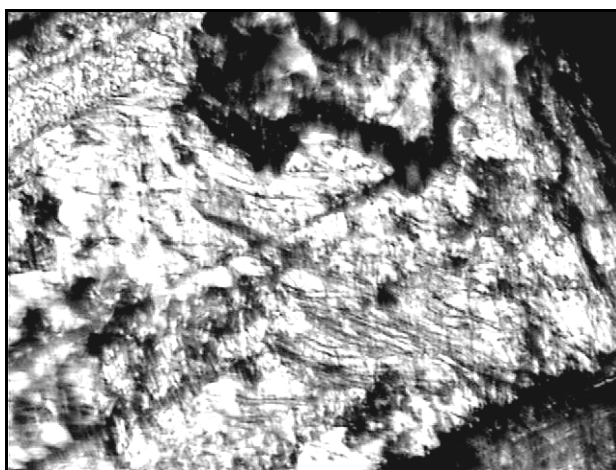


Рис. 2. Электроискровое покрытие из ВК6М на поверхности закаленной стали У10 после трения (x400)

В триботехнических процессах даже в первоначальном сплошном и структурно-однородном покрытии за счет динамических процессов контактного взаимодействия в начальном периоде эксплуатации происходят растрескивание и отслаивание наиболее слабых мест покрытия, и на поверхности трения образуется вторичная «островковость». На рис. 2

изображена поверхность покрытия из ВК6М после трения по серому чугуноу СЧ 21 в течение 0,5 ч. Видны границы вторичных островковых образований и участки, лишенные покрытия, при этом сами островковые образования покрыты сеткой трещин мезомасштабного уровня.

Образование «островковых» покрытий меняет условия контактного взаимодействия, приводя к изменению эпюры контактных напряжений. Рассмотрим этот вопрос более подробно. Островки покрытий отличаются более высокой прочностью сцепления с основой и выполняют роль мезомасштабных платформ, через которые осуществляются контактное взаимодействие и передача силовых нагрузок подложке. Площадь отдельного островкового участка покрытия значительно превышает площадь элементарного фактического контакта (см. рис. 3, а, б). Это позволяет пиковые трибоконтактные напряжения, действующие на наружную поверхность мезомасштабных платформ, преобразовывать в более низкие и равномерно распределенные контактные напряжения между островковыми фрагментами и подложкой (см. рис. 3, в, г), в результате происходит ощутимое снижение общих контактных напряжений, действующих на подложку, а их эпюра принимает более равномерно распределенный характер. Выравнивание пиковых напряжений между островками покрытий и подложкой зависит от толщины покрытия и его упругих свойств, с повышением которых эпюра распределения напряжений принимает более равномерно распределенный характер.

Наличие на поверхности трения островковых зон покрытий меняет характер пластической деформации подповерхностного слоя. Во-первых, само покрытие снижает коэффициент трения и температуру контакта. Во-вторых, пластическая деформация поверхностных слоев теряет микролокальный характер и выходит на мезомасштабный уровень, так как для осуществления пластического сдвига необходимо смещение всего островкового элемента и примыкающего к нему слоя. Такой характер деформации тормозит развитие в поверхностных слоях фрагментации, блокирует образование ротационных мезоструктур и не позволяет развиваться активным концентраторам напряжений на самой поверхности покрытия. В результате повышается износостойкость поверхностного слоя в целом.

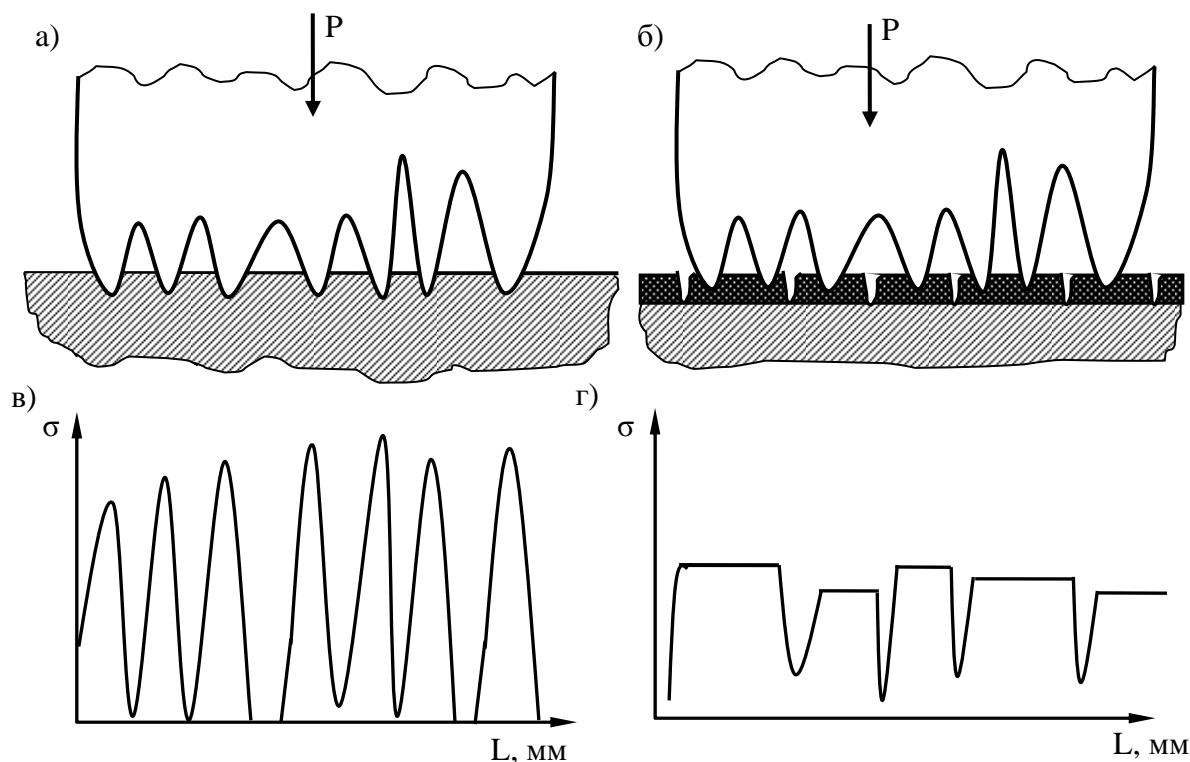


Рис. 3. Влияние «островковости» покрытия на характер распределения нормальных контактных напряжений

Большинство технологий нанесения покрытий связаны с осаждением частиц, находящихся в расплавленном состоянии, или в момент бомбардировки происходит тепловой импульс, приводящий к оплавлению частицы. При кристаллизации в осаждаемой частице возникают внутренние напряжения растяжения, а в подложке – сжатия. В сплошном материале невозможен разрыв напряжений, поэтому между покрытием и подложкой возникает переходная зона с высоким градиентом внутренних напряжений. Возникающая в области контакта эпюра упругих напряжений представлена на рис. 4.

В процессе эксплуатации покрытие подвергается различным силовым и тепловым нагрузкам. Растягивающие напряжения, параллельные плоскости контакта, вызывают развитие трещин. Вершина трещины, проходя через покрытие, выходит в подложку и останавливается в своем развитии, так как оказывается в полях сжимающих напряжений. Чем больше градиент напряжений в переходном слое толщиной  $\delta$ , тем выше устойчивость трещины.

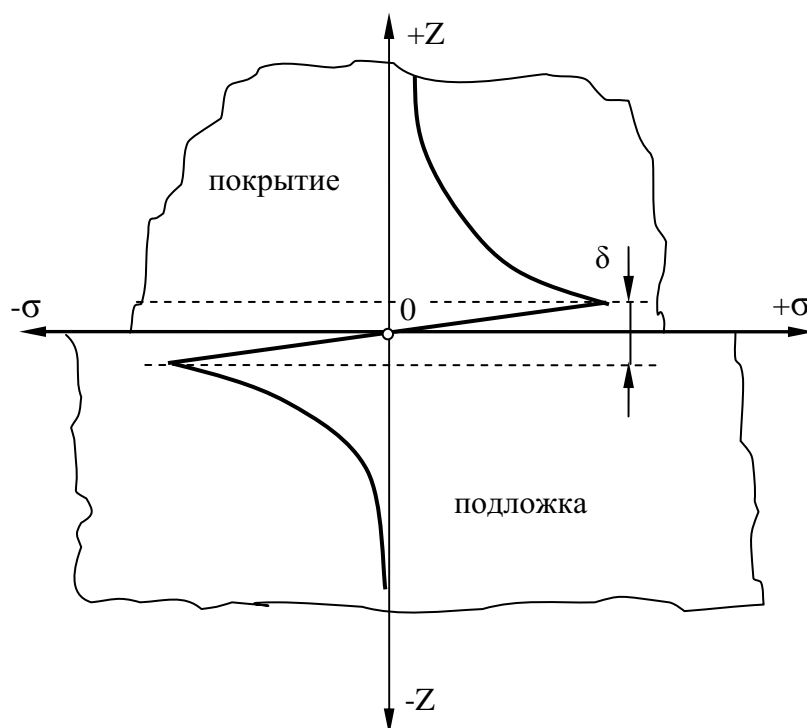


Рис. 4. Эпюра упругих напряжений в области контакта покрытия с подложкой

Развитие вторичной островковости имеет место при работе модифицированных поверхностных структур градиентного типа. Градиентную структуру можно представить как совокупность послойно распределенных бесконечно тонких пластин, каждая из которых имеет свое значение химического потенциала, при этом сами пластинки располагаются в порядке снижения химического потенциала от верхнего слоя к нижнему. Прочность связи между пластинками носит также градиентный характер от максимального значения на поверхности до минимального в глубине.

При механическом воздействии на такую поверхностную структуру слой верхнего уровня воспринимает внешнюю нагрузку, которая наводит в нем поля напряжений и деформаций. Характер неоднородности распределения напряжений и деформаций определяется эпюрой внешнего нагружения. Далее деформация передается нижележащему слою, наводя в нем более однородные поля напряжений и деформаций. Степень повышения однородности

полей будет пропорциональна разности химических потенциалов между слоями и прочности связей между ними. И этот процесс повторяется от слоя к слою, снижая и выравнивая контактные напряжения.

На рис. 5, а приведена архитектура поверхностного слоя после развития вторичной островковости, а на рис. 5, б – характер распределения химического потенциала по глубине. Роль мезоплатформ в этом случае выполняют слои верхнего уровня с повышенной величиной химического потенциала и высокой сцепляемостью между собой. В качестве количественной характеристики островковости можно принять плотность трещин, тогда их величина по глубине будет носить падающий вид. Устойчивость трещин самого нижнего уровня должен обеспечивать коэффициент интенсивности напряжений, величина которого должна быть ниже вязкости разрушения основного материала.

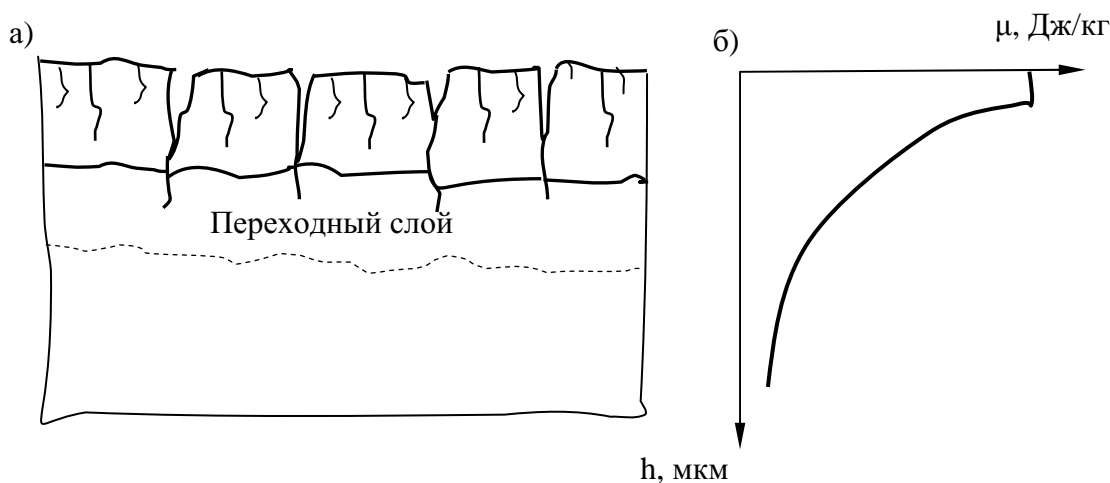


Рис. 5 Архитектура поверхностного слоя с защитным покрытием градиентной природы

В случае упругого контакта интенсивность износа может быть определена [1]

$$I = C \left( \frac{q_a \vartheta}{K_v} \right)^{1+\beta t} \left( \frac{K_f}{\sigma_0} \right)^t \left( \frac{R_{max}}{R} \right)^{\frac{t(1+\beta)}{2}} \left( \frac{1}{\eta_c b} \right)^{\beta t}.$$

Само условие упругого контакта подчеркивает, что пластическая деформация проявлялась только в период приработки, при этом основной механической характеристикой поверхностной структуры является постоянная упругости, обратно пропорциональная модулю упругости.

Наличие упрочненного покрытия приводит к изменению упругих и микрогеометрических характеристик контактируемой поверхности. Если учитывать только изменение упругих свойств, то повышение износостойкости можно оценить

$$K_{упр} = \frac{I}{I_{упр}} \approx \left( \frac{E_{упр}}{E_0} \right)^{1+\frac{t}{2\nu+1}},$$

где  $E_{упр}$  – модуль упругости упрочненного слоя;  $E_0$  – модуль упругости подложки;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $t$  – показатель усталостной прочности материала.

На рис. 6 приведено влияние нормального давления на удельный износ инструментальной стали У10, упрочненного электроискровым легированием, при трении о серый чугун

Сч 21. Под удельным износом понимают изменение ширины площадки износа, отнесенной к нормальному давлению при трении призматического образца о плоскую поверхность. В качестве легирующего электрода применялся твердый сплав ВК6М. Видно, что нанесение износостойкого покрытия в 2...3 раза повышает износостойкость упрочненной поверхности.

В трибологических процессах большая часть энергии контактного взаимодействия выделяется в виде тепла и незначительная доля затрачивается на повышение химического потенциала поверхностных структур. Основной отвод тепла из зоны контактного взаимодействия происходит за счет теплопроводности в области, примыкающей к контактной поверхности, в результате чего формируется градиент температуры, направленный к поверхности. Градиенты температур и напряжений в конечном итоге проявляются на градиенте химического потенциала.

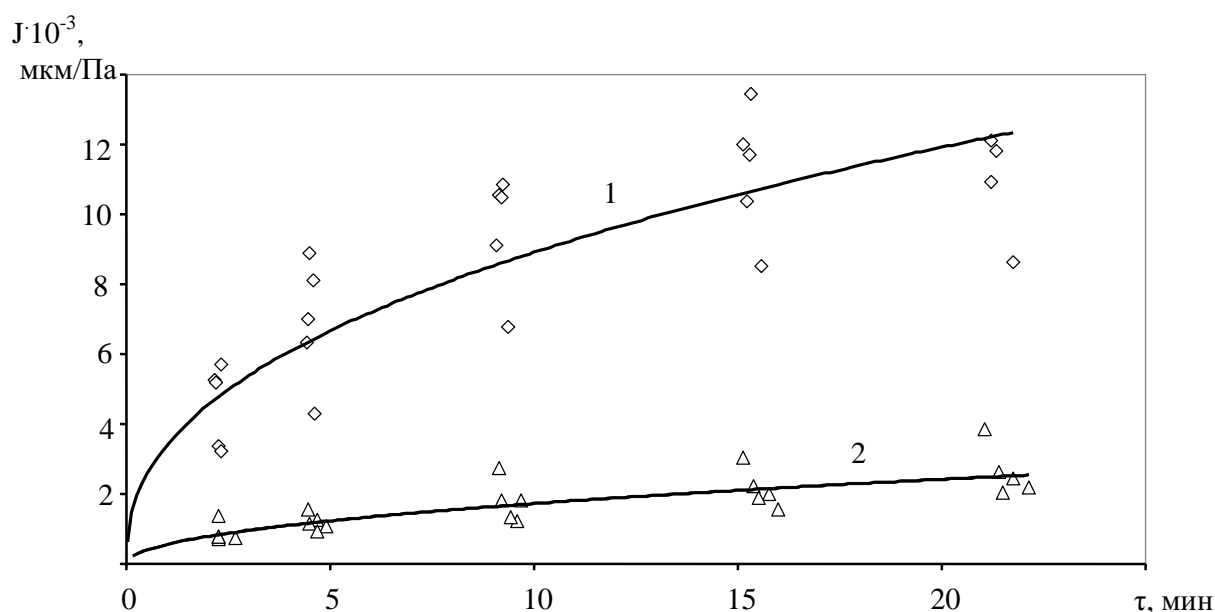


Рис. 6. Зависимость удельного износа стали У10 от продолжительности трения о серый чугун СЧ 21: 1 – без упрочнения; 2 – электроискровое легирование электродом из ВК6М

Градиент химического потенциала и высокая степень пластической деформации формируют массовые потоки диффузионного характера, направленные от поверхности в глубь объема. Для организации диффузионного потока необходимо разложение компонентов покрытия на активные частицы атомарного или ионного типа. Развитие таких потоков из элементов покрытий, создаваемых ионной имплантацией, лазерным локальным легированием, электроискровым упрочнением и гальваническим осаждением, с энергетической точки зрения является возможным и подтверждается экспериментально [4]. Вопрос о диссоциации нитридов и карбидов тугоплавких металлов, входящих в состав покрытий, наносимых методом КИБ, остается открытым. Но на возможность этого процесса указывают экспериментальные результаты, фиксирующие проникновение элементов покрытия в глубь на величину, значительно превосходящую толщину фрагментации с ротационными элементами [11].



### Заключение

Износостойкие покрытия являются активным звеном триботехнической системы, определяющей условия контактного взаимодействия.

Островковость покрытия приводит к снижению пиковых контактных напряжений, формирует поля сжимающих напряжений в переходном слое, что приводит к повышению вязкости разрушения и, как следствие этого, трещиностойкости.

Градиенты температур и напряжений при трении активизируют диффузионные процессы между покрытием и основой, приводя к структурной приспособляемости упрочненных поверхностей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по трибонике. Т. 1. Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
2. Износ в парах трения как задача физической мезомеханики / В. Е. Панин, А. В. Колубаев, А. И. Слосман, С. Ю. Тарасов, С. В. Панин, Ю. П. Шаркеев // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3. – № 1. – С. 67-74.
3. Мур, Д. Основы и применение трибоники / Д. Мур. – М.: Мир, 1978. – 488 с.
4. Ким, В. А. Самоорганизация в процессах упрочнения, трения и изнашивания режущего инструмента / В. А. Ким. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 203 с.
5. Григорьев, С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента / С. Н. Григорьев. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.
6. Верхотуров, А. Д. Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1992. – 180 с.
7. Барвинок, В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В. А. Барвинок. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
8. Брюхов, В. В. Повышение стойкости инструмента методом ионной имплантации / В. В. Брюхов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 120 с.
9. Гамбург, Ю. Д. Гальванические покрытия. Справочник по применению / Ю. Д. Гамбург. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с.
10. Макушок, Е. М. Массоперенос в процессах трения / Е. М. Макушок, Т. В. Калиновская, А. В. Белый. – Минск: Наука и техника, 1978. – 272 с.
11. Болохонов, Р. Р. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Болохонов, А. В. Болеста; под ред. В. Е. Панина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.

**Хохлов С.А., Лиманкин В.В., Марьин Б.Н., Ким В.А., Марьин С.Б.**  
ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОРУЧЬЕВОЙ ПРОКАТКИ

**Хохлов С.А., Лиманкин В.В., Марьин Б.Н., Ким В.А., Марьин С.Б.**  
**Khokhlov S.A., Limankin V.V., Maryin B.N., Kim V.A., Maryin S.B.**

## **ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОРУЧЬЕВОЙ ПРОКАТКИ** **MULTISTRAND ROLLING TECHNOLOGY**

**Хохлов Сергей Алексеевич** – председатель законодательной думы Хабаровского края.  
**Mr.Sergey A. Khokhlov** – Head of the Legislative Assembly of the Khabarovsk Region, Russian Federation

**Лиманкин Владимир Васильевич** – управляющий директор ОАО «Амурметалл».  
**Mr.Vladimir V. Limankin** – CEO of JSC “AmurMetal”

**Марьин Борис Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [kmtlp@knastu.ru](mailto:kmtlp@knastu.ru)  
**Mr.Boris N. Maryin** – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: [kmtlp@knastu.ru](mailto:kmtlp@knastu.ru)

**Ким Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [kmtnm@knastu.ru](mailto:kmtnm@knastu.ru)  
**Vladimir A. Kim** – Doctor in Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: [kmtnm@knastu.ru](mailto:kmtnm@knastu.ru)

**Марьин Сергей Борисович** – кандидат технических наук, доцент, кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: [MaryinSB@mail.ru](mailto:MaryinSB@mail.ru).  
**Mr.Sergey B. Maryin** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Foundry Industrial Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: [MaryinSB@mail.ru](mailto:MaryinSB@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрено влияние интенсификации многоручьевого прокатки на структуру и свойства металла.

**Summary:** The paper is concerned with the impact of multistrand rolling intensification upon metal structure and properties.

**Ключевые слова:** многоручьева прокатка; скорость и температура прокатки; механические свойства и микроструктура изделия.

**Keywords:** multistrand rolling, rolling speed and temperature, mechanical properties and microstructure of product.

УДК621.77

Под интенсификацией процессов обработки металлов давлением обычно понимают совокупность некоторых дополнительных по сравнению с традиционными способами мер или действий, позволяющих улучшить качество металлопродукции, снизить трудоемкость изготовления и сократить количество или усовершенствовать используемое оборудование и технологическую оснастку.

Технологические возможности одноручьевого прокатки весьма ограничены, поэтому для повышения производительности процесса при обеспечении высокого качества продукции применяют различные способы интенсификации.

### **Силовая интенсификация**

Сущность способа силовой интенсификации заключается в обеспечении увеличения степени деформации за одну операцию посредством изменения напряженного состояния за-

готовки в благоприятную сторону для формоизменения. Напряженное состояние при этом достигается путем дополнительного силового воздействия, прикладываемого к заготовке рабочими органами оборудования, специальными конструктивными элементами оснастки или благодаря применению некоторых технологических средств.

Как показала практика, наиболее эффективно использование силовой интенсификации в сочетании с термической. Конкретное конструктивно-технологическое решение, основанное на принципе силовой интенсификации, будет рассмотрено ниже.

### Термическая интенсификация

Способ термической интенсификации основан на совместном использовании нагрева и охлаждения, обеспечивающих наиболее благоприятный для получения детали заданной формы и размеров перепад температур в заготовке, а следовательно, и оптимальный перепад сопротивления деформирования  $\sigma_T$  и пластических свойств по очагу деформации. Для металлов с низкой теплопроводностью производится нагрев зоны деформации без охлаждения зоны передачи усилия, что объясняется тем, что в процессе формоизменения зона передачи усилия не успевает прогреться и не снижает своих прочностных свойств.

Нагрев заготовки может осуществляться двумя методами: прямым, когда тепло образуется непосредственно в нагреваемой зоне заготовки, и косвенным, при котором тепло, создаваемое внешним источником, тем или иным способом передается в заготовку.

Прямой метод нагрева предусматривает два самостоятельных способа создания тепла в заготовке: индукционный нагрев токами высокой частоты и нагрев электросопротивлением путем пропускания через заготовку больших токов.

При косвенном нагреве тепло передается в зону контактным, конвективным или радиационным путями. В случае контактного нагрева заготовка разогревается в результате прямой теплопередачи от горячей оснастки.

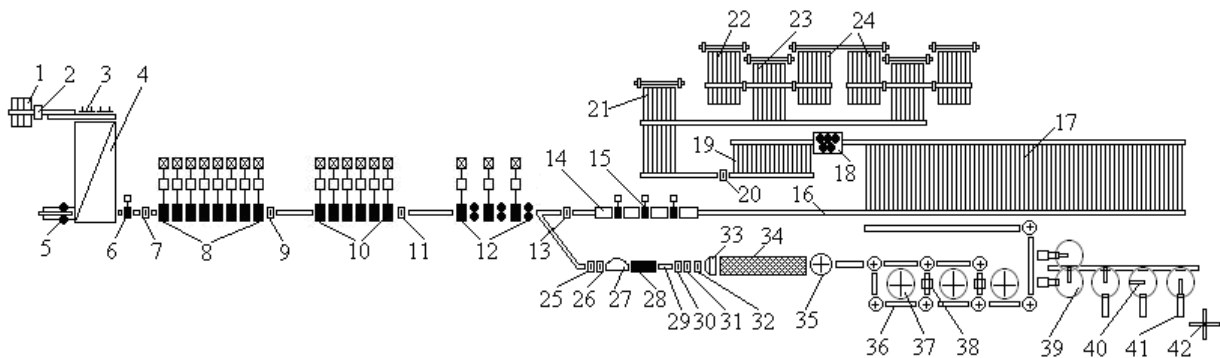


Рис. 1. Схема расположения технологического оборудования мелкосоротно-проволочного стана 320/150:

- 1 - загрузочная решетка; 2 - кантователь; 3 - вталкиватель; 4 - нагревательная печь; 5 - отводящий рольганг; 6, 15-трайб-аппараты; 7 - разрывные ножницы; 8 - черновая группа клетей 500/400; 9 - кривошипные ножницы № 51; 10 - промежуточная группа клетей 360; 11- эксцентриковые ножницы № 52; 12 - чистовая группа клетей 320; 13 - кривошипно-эксцентриковые ножницы № 53; 14 - участок ускоренного охлаждения; 16 - рольганг; 17 - холодильник; 18 - роликотправильная машина; 19 - транспортер; 20 - ножницы холодной резки; 21 - пакетирующее устройство; 25, 26 - кривошипно-эксцентриковые ножницы; 27 - петлерегулятор; 28 - десятиклетевой проволочный блок 215/170; 29 - установка водяного охлаждения; 32 - трайб-аппарат; 33 - виткоукладчик; 34-участок воздушного охлаждения; 35-виткосборник; 36-конвейер; 37-опрокидыватели; 38-уплотнение и увязка бунтов; 39-устройство для передачи бунтов; 40 - съемник бунтов; 41 - транспортер; 42 - бунтопакетировочная машина

Охлаждение заготовок, являющееся составной частью теоретической интенсификации, осуществляется только контактным и конвективным путями. При контактном способе тепло отводится от заготовки вследствие прямой теплопередачи в металлический охладитель в зоне их контакта. В случае конвективного охлаждения тепло отнимается от заготовки путем непосредственного омывания различными хладагентами (сжатым воздухом, водой, охлажденными или сжиженными газами).

### Влияние скорости деформации

При проектировании технологических процессов ОМД необходимо также учитывать влияние скорости деформации на пластические свойства материала. В первом приближении

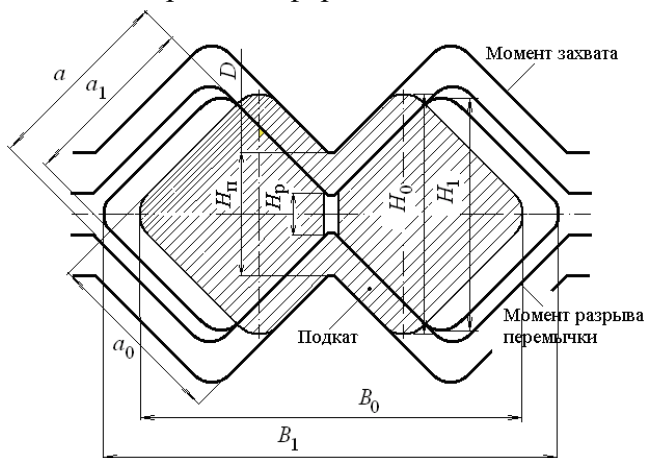


Рис. 2. Схема разделения двухниточного раската

можно сказать, что при увеличении скорости деформации напряжение текучести возрастает, а пластичность падает. Особенно ярко это выражается для магниевых и медных сплавов, высоколегированных сталей, значительно менее чувствительны к скорости деформации алюминиевые сплавы и низколегированные стали.

Рассмотрим влияние скорости деформации, силовой и термической интенсификации на примере двухручьевого прокатки арматуры № 12-16 на мелкосортном стане 320/150, который изображен на рис. 1.

Схема силовой интенсификации двухручьевого прокатки показана на рис. 2.

Химический состав плавов № 24276, № 24196, № 24198 (слиттинг-процесс) приведен в табл. 1.

Таблица 1

Номер плавки	Массовая доля, %														
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Mo	V	Nb	Ca	Sn
24276	0,29	1,20	0,66	0,015	0,016	0,05	0,17	0,34	0,007	0,004	0,014	0,001	0,008	0,0008	0,017
24196	0,28	1,20	0,63	0,023	0,014	0,04	0,15	0,25	0,006	0,004	0,012	0,001	0,008	0,0006	0,009
24198	0,29	1,20	0,66	0,018	0,014	0,05	0,14	0,25	0,006	0,004	0,012	0,001	0,008	0,0007	0,009

Режимы прокатки (слиттинг-процесс) и результаты механических испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Номер плавки, номер партии, профиль	Режимы прокатки	Механические свойства		
		$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %
24276, 2203, № 12	V – 14 м/с	450	710	23,5
	T <sub>2</sub> – 1170 °С	450	690	24,5
	T <sub>20</sub> – 1100 °С			
24196, 2193, № 14	V – 13,5 м/с	435	670	21,5
	T <sub>2</sub> – 1160 °С	440	680	22,5
	T <sub>20</sub> – 1150 °С	445	670	25,0
24198, 2184, № 16	V – 12 м/с	435	650	22,0
	T <sub>2</sub> – 1160 °С	430	660	20,5
	T <sub>20</sub> – 1150 °С	435	660	22,5

Результаты микроструктурного анализа арматурной стали, полученной слиттинг-процессом, представлены в табл. 3.



Таблица 3

Номер партии / номер пробы	Режим прокатки	Твердость HV	Показатели структуры, балл			Структурные составляющие, (соотношение), %	Наименование дефектов и их глубина залегания
			Зерно	Видманштетт	Дисперсность перлита		
2203/1	V – 14 м/с	253 240 228	10-6	1,5	1,5	Феррит(35 %) +перлит(60 %) +бейнит(5 %)	Пузырь – 0,08 мм. По месту разделения трещина глубиной залегания- 0,15 мм. Химическая неоднородность в виде прямой ликвации
2203/2		248 243 212	10-7	1,5	1,5	Феррит(40 %) +перлит(55 %) +бейнит(5 %)	Химическая неоднородность в виде прямой ликвации
2193/1	V – 13,5 м/с	212 214 240	9-5	2	2	Феррит(35 %) +перлит(60 %) +бейнит(5 %)	Пузыри – 0,12; 0,04 мм. Химическая неоднородность в виде прямой ликвации
2193/2		218 202 225	9-5	2	1,5	Феррит(35 %) +перлит(60 %) +бейнит(5 %)	Пузырь – 0,08 мм. Химическая неоднородность в виде прямой ликвации
2193/3		243 238 230	10-7	1,5	1,5	Феррит(45 %) +перлит(50 %) +бейнит(5 %)	Химическая неоднородность в виде прямой ликвации
2184/1	V – 12 м/с	204 215 219	9-6	1,5	1,5	Феррит(40 %) +перлит(55 %) +бейнит(5 %)	Химическая неоднородность в виде прямой ликвации
2184/2		209 207 205	9-7	1,5	1,5	Феррит(40 %) +перлит(55 %) +бейнит(5 %)	Пузыри – 0,06; 0,06; 0,08; 0,10; 0,12 мм. Химическая неоднородность в виде прямой ликвации
2184/3		214 215 228	10-6	1,5	2	Феррит(40 %) +перлит(55 %) +бейнит(5 %)	Пузыри – 0,04; 0,05; 0,08; 0,10; 0,12; 0,18 мм. Химическая неоднородность в виде прямой ликвации

При анализе микроструктуры различных проб, прокатанных слиттинг-процессом в объеме одной партии, наблюдается изменение размера зерна и соотношения структурных составляющих. Данные различия являются свидетельством изменения температуры металла между второй и двадцатой клетями и соответственно различной скоростью охлаждения.

**Прокатка арматуры в одну нитку для сравнительной оценки со структурой, полученной слиттинг-процессом.**

Проведено исследование арматуры класса А 400 из стали марки 25Г2С на соответствие требованиям ГОСТ 5781 «Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций».

Химический состав (прокатка в одну нитку) приведен в табл. 4.

Таблица 4

Но- мер- плав- ки	Массовая доля, %														
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Mo	V	Nb	Ca	Sn
21542	0,26	1,28	0,68	0,008	0,015	0,03	0,14	0,29	0,009	0,006	0,013	0,001	0,009	0,0009	0,013
23694	0,20	1,07	0,44	0,013	0,019	0,05	0,16	0,32	0,008	0,005	0,014	0,001	0,007	0,0012	0,013
23697	0,20	1,02	0,38	0,009	0,029	0,05	0,14	0,29	0,006	0,004	0,015	0,001	0,008	0,0006	0,011
23699	0,21	1,06	0,42	0,005	0,032	0,14	0,10	0,30	0,007	0,005	0,015	0,001	0,007	0,0008	0,012

В табл. 5 представлены результаты механических и технологических испытаний (прокатка в одну нитку).

Таблица 5

Номер плавки/ номер партии/ профиль	Режим прокатки	Механические свойства		
		$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %
21542 п. 319 № 16	V – 17,5 м/с T <sub>2</sub> – 1180 °С T <sub>20</sub> – 1120 °С	395	660	16
		400	650	17
21542 п. 320 № 16	V – 15,5 м/с T <sub>2</sub> – 1170 °С T <sub>20</sub> – 1130 °С	400	650	18,5
		400	650	18,5
21542 п. 321 № 16	V – 14,5 м/с T <sub>2</sub> – 1160 °С T <sub>20</sub> – 1140 °С	410	660	17
		410	660	18,5
21542 п. 328 № 14	V – 16 м/с T <sub>2</sub> – 1180 °С T <sub>20</sub> – 1130 °С	390	650	17
		405	650	17
21542 п. 329 № 14	V – 15 м/с T <sub>2</sub> – 1180 °С T <sub>20</sub> – 1130 °С	395	650	20
		400	650	19
21542 п. 330 № 14	V – 14 м/с T <sub>2</sub> – 1180 °С T <sub>20</sub> – 1130 °С	400	650	21,5
		400	650	18,5
23694 п. 54 № 12	V – 16 м/с T <sub>2</sub> – 1160 °С T <sub>20</sub> – 1130 °С	455	610	26,0
		460	610	27,0
		455	610	26,0
23697 п. 55 № 12	V – 16 м/с T <sub>2</sub> – 1140 °С T <sub>20</sub> – 1130 °С	450	600	27,0
		440	610	30,0
		445	600	28,0
23699 п. 56 № 12	V – 16 м/с T <sub>2</sub> – 1140 °С T <sub>20</sub> – 1130 °С	450	620	26,0
		445	620	25,0
		445	620	26,0

В табл. 6 представлены результаты микроструктуры (прокатка в одну нитку).



Таблица 6

Номер партии	Режим прокатки	Твердость HV	Микроструктура				
			Размер зерна	Видманштетт	Структурные составляющие	Соотношение структурных составляющих	Неметаллические включения / дефекты поверхности
<b>Арматура № 16</b>							
319	V – 17,5 м/с	211,6 208,4 225,0	5-9	2,5	феррит+ перлит+ бейнит	40-50-10 %	Хрупкие силикаты + оксисульфиды / пузырь – 0,09; 0,08; 0,05 мм
320	V – 15,5 м/с	265,5 287,4 289,4	5-9	2	феррит+ перлит+ бейнит	45-50-5 %	хрупкие силикаты + оксисульфиды / грубая осевая рыхлость
321	V – 14,5 м/с	282,4 280,4 270,0	5-9	2	феррит+ перлит+ бейнит	45-50-5 %	Хрупкие силикаты + оксисульфиды / осевая рыхлость
<b>Арматура № 14</b>							
328	V – 16 м/с	209,0 209,0 212,9	6-9	2	феррит+ перлит+ бейнит	40-50-10 %	Хрупкие силикаты + оксисульфиды / пузырь – 0,1 мм
329	V – 15 м/с	268,2 284,4 258,4	6-9	1,5	феррит+ перлит+ бейнит	50-40-10 %	Хрупкие силикаты + оксисульфиды / осевая рыхлость, пузырь – 0,08; 0,05 мм
330	V – 14 м/с	293,6 287,4 290,4	6-9	1,5	феррит+ перлит	50-50 %	Грубые хрупкие силикаты + оксисульфиды / грубая осевая рыхлость, пузырь – 0,06 мм
<b>Арматура № 12</b>							
54	V – 17,5 м/с	182,4 178,4 180,9	9-8	1,5	феррит+ перлит+ бейнит	50-45-5 %	Хрупкие силикаты + оксисульфиды
55	V – 16,5 м/с	178,9 178,9 178,9	10-8	1	феррит+ перлит+ бейнит	50-45-5 %	Хрупкие силикаты + оксисульфиды
56	V – 15 м/с	192,5 212,2 174,0	10-8	1	феррит+ перлит+ бейнит	60-35-5 %	Хрупкие силикаты + оксисульфиды

Примечание: арматура № 12 партий 54-56 каталась с секцией термоупрочнения на соответствие требованиям NS 3576-3: 2009, поэтому имеет мелкое зерно. Размер действительного зерна при прокатке арматуры в одну нитку на арматуре № 12 обычно составляет 7-9 баллов.

**Выводы.**

Из анализа механических свойств и микроструктуры следует:

1. При прокатке слиттинг-процессом уменьшается температурный перепад между 2-й и 20-й клетью (что позволяет обеспечить более стабильную прокатку).
2. Существует возможность снижения температуры во второй и третьей зонах нагревательной печи и температуры заготовки перед прокаткой (возможно имеется экономический эффект, связанный с расходом газа и количеством образующейся окалины).
3. При сопоставимых скоростях прокатки на пробах, прокатанных слиттинг-процессом, наблюдается увеличение пределов текучести и прочности и увеличение относительного удлинения.
4. При прокатке слиттинг-процессом значение предела текучести значительно превышает нижний допустимый уровень, установленный для арматуры класса А400 ГОСТ 5781 «Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций».
5. При прокатке слиттинг-процессом повышается устойчивость аустенита в области перлитного превращения.
6. При прокатке слиттинг-процессом область разделения находится по месту расположения осевой зоны непрерывнолитой заготовки, которая испытывает более значительные обжатия, увеличивается плотность этой зоны в сравнении с прокаткой в одну нитку.
7. Ухудшения показателей микроструктуры при прокатке слиттинг-процессом, таких как увеличение размеров зерна, видманштетта и дисперсности перлита, не установлено. Исключение составляет арматура № 14 пробы № 1 и 2, где средний размер действительного зерна составляет 6 баллов, а ферритная фаза расположена в виде сетки, что возможно объясняется более высокой температурой металла в области деформации.
8. Показано, что реализация этого способа прокатки позволяет увеличить производительность стана при производстве профилей № 10 и № 12 соответственно на 18,0 и 25,9 т/ч (55,4 %) по сравнению с производительностью стана при традиционной прокатке этих профилей; снизить затраты энергии на деформацию по сравнению с одноручьевогой прокаткой: для профиля № 10 на 27,1 %, для профиля № 12 на 30,4 %.
9. Установлено, что оптимальные по расходу топливно-энергетических ресурсов температурно-скоростные режимы прокатки реализуются при конечной скорости прокатки 15 м/с и снижении температуры нагрева исходной заготовки до 1120 °С, что позволяет получить экономию удельных затрат на топливо и электроэнергию не менее, чем 0,6 – 1,5 %.



Муравьев В. И., Бахматов П. В., Дебеляк А. А.  
Muravyev V.I., Bakhmatov P.V., Debelyak A.A.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПО ТЕПЛОВЫМ ПОЛЯМ ПРИ СВАРКЕ ТОНКИХ ПЛАСТИН ВСТЫК

## DEFINITION OF AN OPPORTUNITY TO CALCULATE RESIDUAL DEFORMATIONS ON THERMAL FIELDS AT WELDING THIN PLATES END-TO-END

**Муравьев Василий Илларионович** – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru)

**Mr. Vassily I. Muravyev** – Doctor in Engineering, Professor, Chief Researcher for Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru)

**Бахматов Павел Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru)

**Mr. Pavel V. Bakhmatov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru)

**Дебеляк Алексей Александрович** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru)

**Alexei A. Debelyak** – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: [ktsp@knastu.ru](mailto:ktsp@knastu.ru)

**Аннотация.** Представлен анализ известных ранее графорасчетных методов определения сварочных (остаточных) деформаций, неизбежно возникающих при термическом воздействии высококонцентрированных источников тепла, в частности от воздействия сварочной дуги при изготовлении сварных металлоконструкций. Отображены недостатки (допущения) каждого из методов, решение которых в настоящее время вызывает реальный интерес. Основываясь на достоверных данных, полученных Н. Н. Рыкалиным и изложенных им в труде «Расчет тепловых процессов при сварке», рассчитана и представлена трехмерная модель термического цикла сварки (распределение температур в каждой из трех систем координат) по схеме линейный быстро движущийся источник в пластине с теплоотдачей при сварке тонких пластин встык из малоуглеродистой стали марки Ст3 полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа при устойчивых режимах процесса.

**Summary:** The paper present an analysis of already known graphical methods for definition of the welding (residual) deformations inevitably arising due to the thermal influence of highly concentrated sources of heat, in particular by a welding arch at producing welded metal structures. Explained are the deficiencies (assumptions) of each of the methods, whose improvement generates interest. Based on the authentic data received by N. N. Rykalin and presented in his work: «Calculation of thermal processes at welding», a three-dimensional model of a thermal cycle of welding is proposed (distribution of temperatures in each of three systems of coordinates) as a linear fast-moving source in a hit-emitting mild-steel St3 plate while semi-automatically welding thin plates end-to-end in the environment of carbonic gas at steady modes of process.

**Ключевые слова:** листовые конструкции, коробление, сварочные деформации, тепловые поля, сектора, линии действия внутренних напряжений.

**Keywords:** sheet structures, change of geometry, welding deformations, thermal fields, sectors, lines of action of internal tension.

УДК 621.791.1

Сварка, резка, наплавка, лазерная обработка металлов сопровождается действием высоких температур, влияющих на физико-механические свойства, химический состав и геометрию обрабатываемых поверхностей и изделий. При неравномерном нагреве тела связи между нагретыми и ненагретыми участками препятствуют его свободному расширению, что влечет за собой возникновение собственных температурных напряжений, действующих при отсутствии внешних сил. Наряду с температурными деформациями и напряжениями, в теле также могут возникать деформации и напряжения, обусловленные фазовыми или структурными превращениями, происходящими с увеличением или уменьшением объема. Неравномерный нагрев и изменение объема тела вследствие температурного расширения, а также фазовых или структурных превращений приводят к возникновению упругих и пластических деформаций. Пластические деформации в теле после его полного охлаждения являются причиной действия собственных напряжений, называемых остаточными. Если температура нагрева в процессе обработки незначительна, то предел текучести металла остается без изменений и возникающие напряжения не достигают предела текучести. Практически деформирование осуществляется в упругой области. Это соответствует случаям нагрева в процессе обработки до максимальных температур  $T_{\max} < 573$  К. Реальные технологические процессы сварки и лазерной обработки проводятся при существенно более высоких температурах, и, следовательно, возникновение деформаций и напряжений происходит в условиях упругопластического деформирования. Сварочные напряжения и деформации причиняют много хлопот и трудностей при изготовлении и эксплуатации сварных конструкций, так как они могут вызвать: изменение запроектированных размеров свариваемых деталей и узлов; искривление и изменение формы (коробление) отдельных сварных узлов и целых конструкций; появление трещин и разрывов в процессе изготовления сварных конструкций; разрушение сварных конструкций в процессе эксплуатации при пониженных температурах.

Изучение сварочных напряжений и деформаций крайне необходимо для выбора рациональных конструктивных форм проектируемых сварных соединений и правильного выбора технологических вариантов изготовления сварных конструкций. Для верной оценки проектируемых конструктивных форм и для разработки оптимальных технологий изготовления сварных конструкций необходимо производить предварительные расчеты остаточных внутренних усилий, ожидаемых остаточных деформаций и остаточных напряжений.

Цель данной работы заключается в определении распределения температуры в образцах  $4 \times 50 \times 120$  мм, изготовленных из углеродистой стали обыкновенного качества марки Ст3, при сварке их встык на устойчивых режимах процесса; проектировании трехмерной модели распределения температур в системе координат OXYZ, а также процесса распространения тепла по толщине пластин вдоль и поперек оси шва, что в дальнейшем позволит визуализировать изменение геометрии сваренных заготовок, как результат действия напряжений и деформаций, возникающих вследствие теплового воздействия сварочной дуги.

**Параметры проектируемой модели:**

Листы толщиной 4 мм варят встык без скоса кромок при зазоре 1 мм. Сварку производят в среде углекислого газа на следующих режимах:

$$d_{\text{э}} = 1,2 \text{ мм (диаметр электродной проволоки);}$$

$$\delta = 0,4 \text{ см (толщина пластин);}$$

$\eta = 0,7$  (эффективный КПД дуги при сварке на постоянном токе обратной полярности);

$$I_{\text{CB}} = 125 \text{ А (сила сварочного тока);}$$

$$U_{\text{Д}} = 20 \text{ В (напряжение дуги);}$$

$$V_{\text{CB}} = 0,25 \text{ см/с (скорость перемещения источника тепла);}$$

$$Q = 453,6 \text{ кал/с (эффективная тепловая мощность дуги);}$$

$\lambda = 0,10$  кал/(см · с · °С) (коэффициент теплопроводности);

$c = 0,16$  кал/(г · °С) (теплоемкость);

$\gamma = 7,8$  г/см<sup>3</sup> (удельный вес);

$a = 0,08$  кал/см<sup>2</sup> (коэффициент температуропроводности);

$b = 3,2 \cdot 10^{-3}$  1/с (коэффициент теплоотдачи).

Для построения температурного поля предельного состояния, соответствующего выбранным режимам сварки, используем схему мощного быстродвижущегося линейного источника тепла в пластине с теплоотдачей. Процесс распространения тепла описывается следующим уравнением:

$$T(y_0, t) = \frac{q}{V \cdot \delta \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \gamma \cdot t}} \cdot \exp\left(\frac{-y_0^2}{4 \cdot a \cdot t} - b \cdot t\right), \quad (1)$$

по которому рассчитывали распределение температуры (табл. 1).

Таблица 1

Результаты расчета температур по схеме мощного линейного быстродвижущегося источника тепла в пластине с теплоотдачей при сварке пластин встык

$y_0, \text{см}$ $t, \text{с}$	0	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5	2,0	3,0	4,0	<b>5,0</b>
1	3332	2941	2515	1526	720	265	146	76	17	-	-	-	-	-
2	2349	2207	2041	1589	1092	663	492	355	168	70	4	-	-	-
3	1912	1834	1741	1473	1147	822	675	542	329	184	30	-	-	-
4	1650	1600	1538	1357	1125	876	756	641	441	285	73	5	-	-
6	1339	1311	1278	1175	1037	878	795	713	555	415	167	15	-	-
9	1083	1068	1049	993	913	817	765	711	602	496	270	48	5	-
16	794	788	780	756	722	678	653	627	570	512	364	137	35	<b>6</b>
25	617	614	610	598	581	558	545	531	500	466	374	200	84	<b>27</b>
<b>36</b>	<b>497</b>	<b>495</b>	<b>493</b>	<b>486</b>	<b>476</b>	<b>463</b>	<b>455</b>	<b>447</b>	<b>429</b>	<b>408</b>	<b>351</b>	<b>227</b>	<b>124</b>	<b>57</b>

На рис. 1, а представлены кривые распределения температур поперек оси шва по ширине пластины  $y$  от 0 до 5 см в моменты времени  $t$  от 1 до 36 с; на рис. 1, б представлены кривые распределения температур вдоль оси шва в направлении перемещения источника тепла; на рис. 2 представлены тепловые поля на поверхности свариваемых пластин; на рис. 3 представлена трехмерная модель распределения температур в пространстве.

При построении температурных полей в процессе сварки тонких пластин, распределение температуры по их толщине в большинстве случаев не учитывается и принимается неизменным. Для получения характера распределения температур по всему объему произведены расчеты и графические построения.

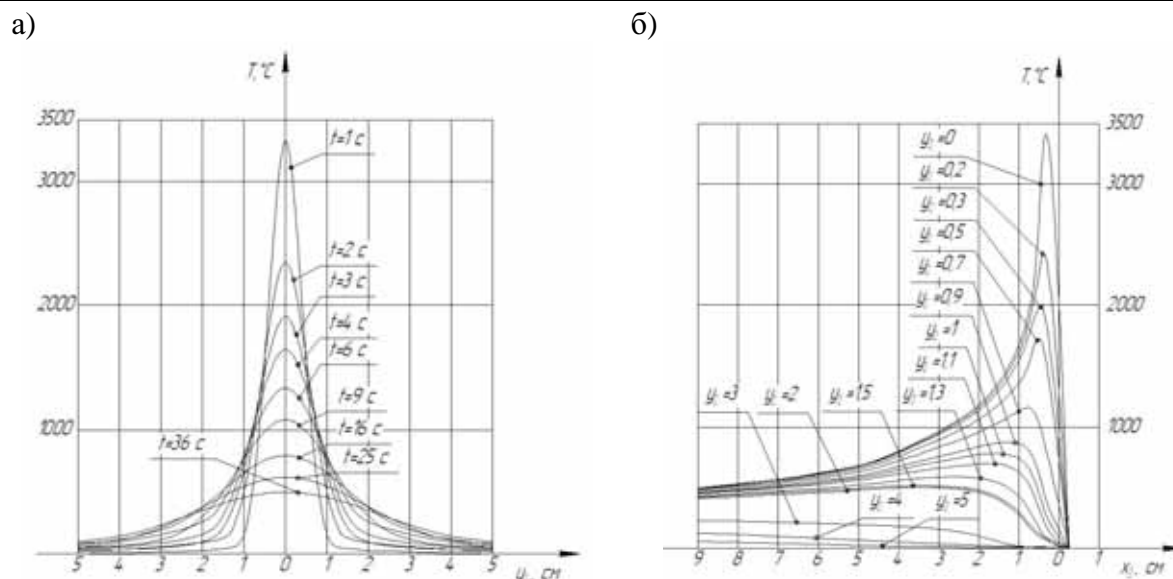


Рис. 1. Кривые распределения температур:  
 а – поперек оси шва по ширине пластин; б – вдоль оси шва  
 в направлении движения источника тепла

При построении температурных полей в процессе сварки тонких пластин распределение температуры по их толщине в большинстве случаев не учитывается и принимается неизменным. Для определения характера распределения температур по всему объему произведены расчеты и графические построения.

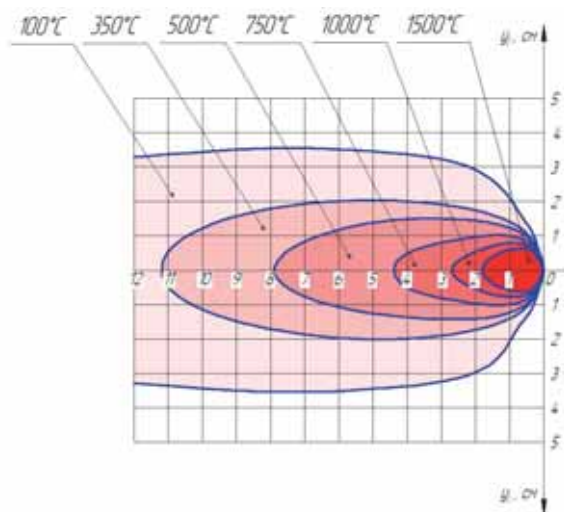


Рис. 2. Тепловые поля на поверхности свариваемых пластин

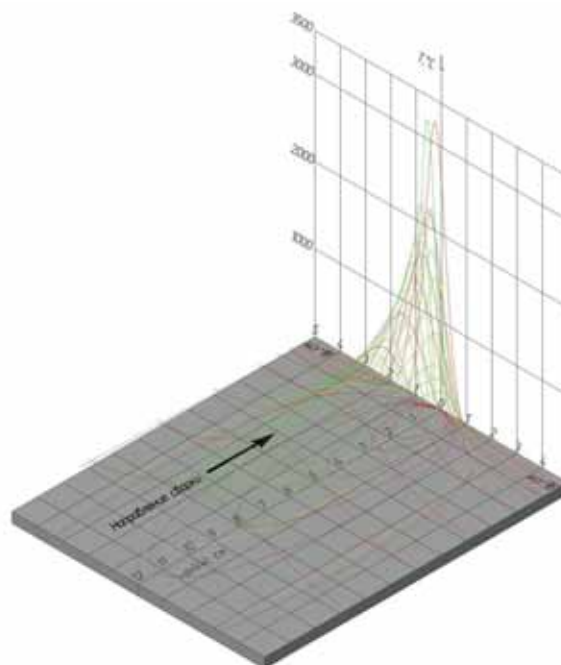


Рис. 3. Пространственная модель распределения температур

На рис. 4 представлены пластины с нанесенными на них ограничивающими верхней и нижней плоскостями, не пропускающими тепла, и точками для которых будут определены температуры по толщине свариваемых пластин в направлении движения источника тепла.

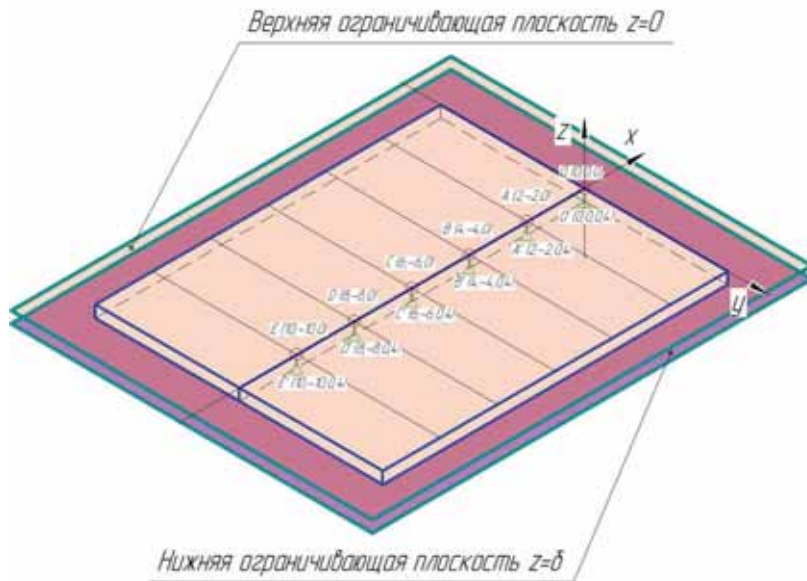


Рис. 4. Свариваемые пластины с нанесенными на них верхней и нижней ограничивающими плоскостями

В зависимости от толщины металла расчет ведут по одной из схем: если лист весьма толст – температурное поле практически затухает в массе металла, тогда влиянием нижней ограничивающей плоскости можно пренебречь и вести расчет по схеме точечного источника на поверхности полубесконечного тела. Если лист весьма тонок – температура вблизи источника практически выравнивается по толщине листа, тогда расчет ведут по схеме линейного источника в пластине. Если толщина листа мала так, что нельзя пренебречь ограничивающим влиянием нижней плоскости листа, но не настолько чтобы считать температуру равномерно распределенной по толщине, выбирают для расчета схему точечного источника на поверхности плоского слоя толщиной  $\delta$ . Ограничивающие плоскости тела считают не пропускающими тепла.

Процесс распространения тепла точечного источника мощностью  $q$ , перемещающегося со скоростью  $V$  по поверхности плоского слоя толщиной  $\delta$ , описывается уравнением:

$$T(r, x, z) = m(r, z) \cdot \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \delta} \cdot \exp\left(\frac{-V \cdot x}{2 \cdot a}\right) \cdot K_0\left(\frac{V \cdot r}{2 \cdot a}\right), \quad (2)$$

где  $r^2 = x^2 + y^2$  – радиус-вектор;

$m(r, z)$  – коэффициент, выражающий отношение температуры верхней  $z = 0$  и нижней  $z = \delta$  поверхностей плоского слоя, нагреваемого точечным источником, перемещающимся по верхней плоскости, к температуре пластины, нагреваемой линейным источником; данная зависимость представлена на рис. 5;

$K_0\left(\frac{V \cdot r}{2 \cdot a}\right)$  – функция Бесселя от мнимого аргумента второго рода, нулевого порядка (табличные значения взяты из книги Р. О. Кузьмина, Бесселевы функции, ОНТИ, 1935).

В табл. 2 представлены расчетные данные температур для каждой из точек верхней и нижней ограничивающих плоскостей в направлении движения источника тепла (рис. 6).

Рис. 5. Коэффициент  $m$ , выражающий отношение температуры верхней  $z = 0$  и нижней  $z = \delta$  поверхностей плоского слоя, нагреваемого точечным источником, перемещающимся по верхней плоскости, к температуре пластины, нагреваемой линейным источником

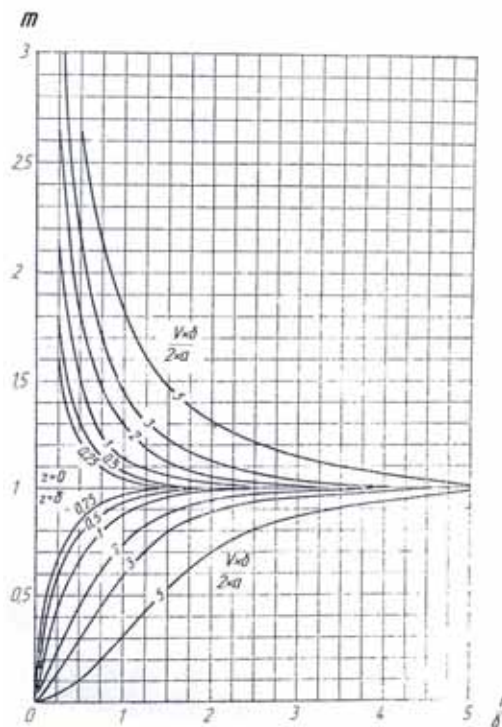


Таблица 2

Значения температур для каждой из точек верхней и нижней ограничивающих плоскостей в направлении движения источника тепла

Т, °С		Координаты точек (r, x, z)								
		(0,4; -0,4;0)	(0,8; -0,8;0)	(1,2;- 1,2;0)	(1,6; -1,6;0)	(2; -2;0)	(4; -4;0)	(6;-6;0)	(8;-8;0)	(10; -10;0)
		$\frac{V \cdot \delta}{2 \cdot a} = 0,625$								
		$U = \frac{V \cdot r}{2 \cdot a}$								
		0,625	1,25	1,875	2,5	3,125	6,25	9,375	12,5	15,625
		$K_0(U)$								
		0,72504	0,30196	0,13208	0,062348	0,03025	0,00096	0,0000341	0,0000003	0,00000001
		$\frac{r}{\delta}$								
		1	2	3	4	5	10	15	20	25
		$m(r, z)$								
		1,13/0,91	1,01/0,99	1/1	1/1	1/1	-	-	-	
Верхней плоскости		2558	1779	1439	1269	1151	831	681	134	102
Нижней плоскости		2006	1744	1439	1269	1151	831	681	134	102

а)



б)

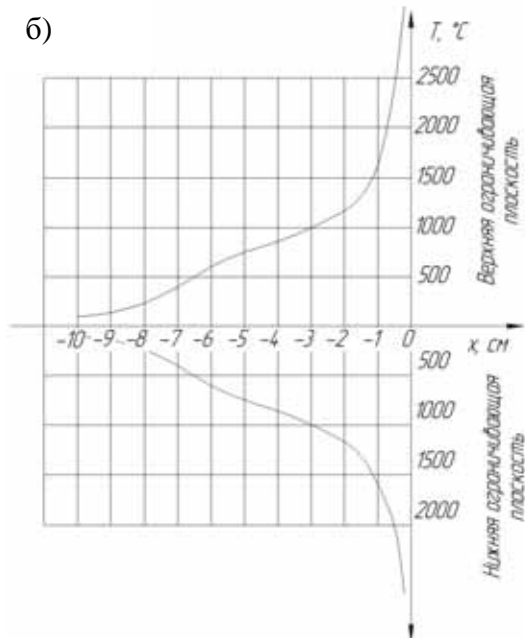


Рис. 6. Распределение температур:  
а – по толщине свариваемых пластин в направлении движения источника тепла;  
б – на верхней и нижней ограничивающих свариваемые пластины плоскостях

На рис. 7 представлены свариваемые пластины с расположенными на них точками, для которых будут определены температуры по толщине для верхней и нижней ограничивающих, не пропускающих тепла плоскостей  $z = 0$  и  $z = \delta$  в направлении, перпендикулярном движению источника тепла.

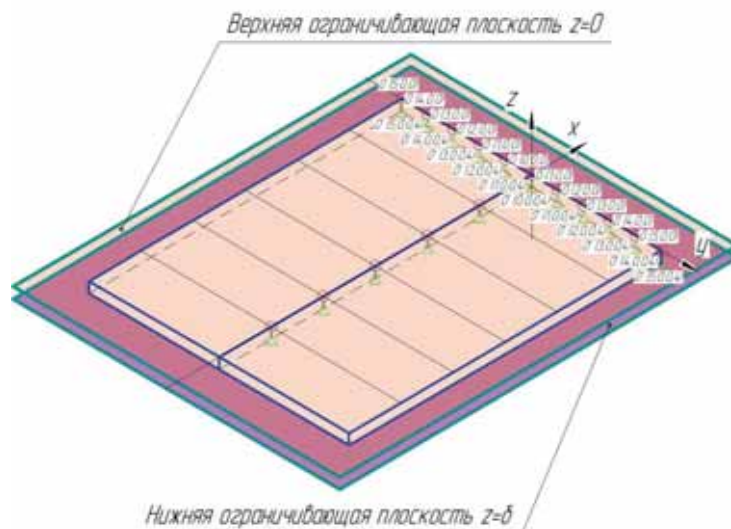


Рис. 7. Свариваемые пластины с расположенными на них точками, для которых будут определены температуры по толщине для верхней и нижней ограничивающих, не пропускающих тепла плоскостей  $z = 0$  и  $z = \delta$  в направлении, перпендикулярном движению источника тепла

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПО ТЕПЛОВЫМ ПОЛЯМ ПРИ СВАРКЕ ТОНКИХ ПЛАСТИН ВСТЫК

В табл. 3 представлены расчетные значения температур точек, расположенных на верхней и нижней ограничивающих плоскостях свариваемых пластин, в направлении, перпендикулярном движению источника тепла. В данном случае  $x$  принимаем равным 0, тогда  $r^2 = y^2$ . Графически расчетные данные табл. 3 представлены на рис. 8.

Таблица 3

Расчетные значения температур точек, расположенных на верхней и нижней ограничивающих плоскостях свариваемых пластин в направлении, перпендикулярном движению источника тепла

		Координаты точек (r, x, z)								
		(0,5; 0;0)	(1;0;0)	(1,5; 0;0)	(2; 0;0)	(2,5; 0;0)	(3;0;0)	(3,5; 0;0)	(4;0;0)	(4,5;0;0)
Т, °С		$\frac{V \cdot \delta}{2 \cdot a} = 0,625$								
		$U = \frac{V \cdot r}{2 \cdot a}$								
		0,781	1,563	2,344	3,125	3,906	4,688	5,469	6,25	7,031
		$K_0(U)$								
		0,583	0,198	0,0754	0,0303	0,0125	0,00525	0,002223	0,00096	0,00042
		$\frac{r}{\delta}$								
		1,25	2,5	3,75	5	6,25	7,5	8,75	10	11,25
		$m(r, z)$								
		1,07/0,95	1,01/0,98	1/1	1/1	-	-	-	-	-
	Верхней плоскости		1042	335	126	50	21	-	-	-
Нижней плоскости		926	324	126	50	21	-	-	-	-

При сварке протяженных стыков малых толщин стальных габаритных конструкций существует проблема коробления как результат остаточных деформаций. Известные графо-расчетные методы [1, 52] не дают достоверной информации о самих сварочных перемещениях (изменении геометрии тел) отдельных, нагретых до разных температур и с разной скоростью объемов материала свариваемых заготовок. В данном случае представляется лишь приближенная картина распределения сварочных напряжений на стадии нагрева и полного охлаждения деталей путем построения эпюр сварочных напряжений с рядом существенных допущений: коэффициент теплопроводности материала принят неизменным; не учитывается напряженность в отдельных объемах, нагретых до различных температур и имеющих при ней различные физико-механические свойства. Метод упругих деформаций также не дает полного понимания картины возникновения сварочных «короблений» конструкций. Поэтому

актуальным является разработка методики, позволяющей прогнозировать и визуализировать коробление конструкций.

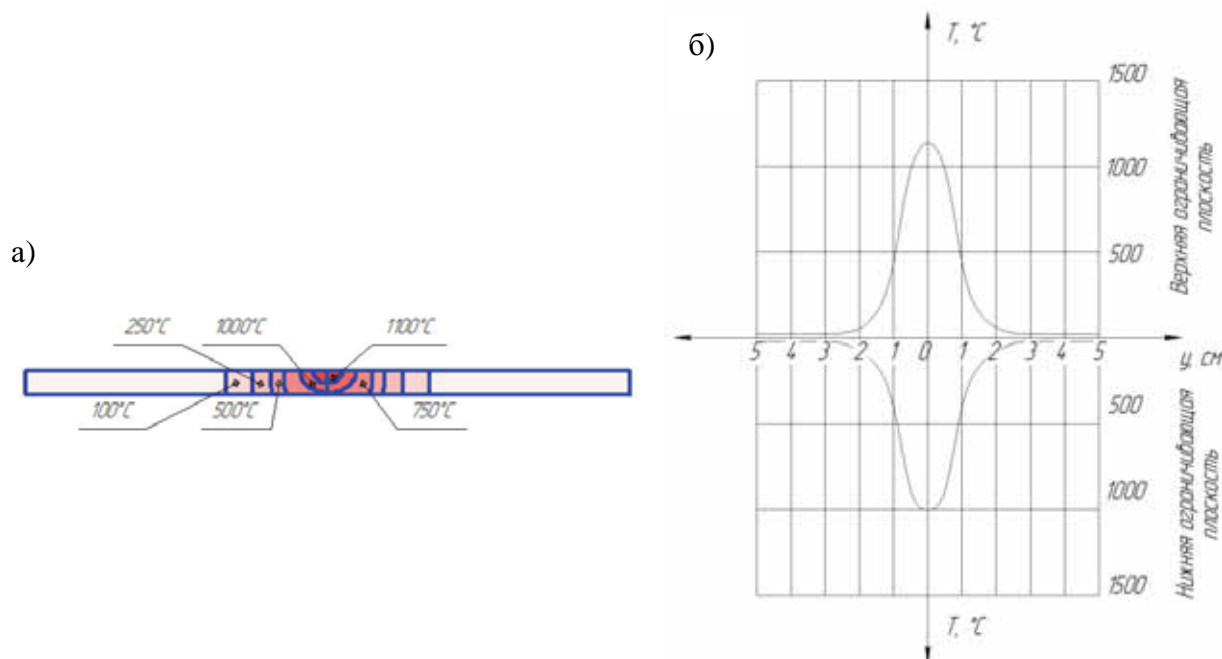


Рис. 8. Распределение температур:

а – по толщине свариваемых пластин в направлении, перпендикулярном движению источника тепла; б – на верхней и нижней ограничивающих свариваемые пластины плоскостях

В разработанной методике приняты следующие допущения и предположения.

1. Если в начальном состоянии температура пластин одинакова по всему объему и равна комнатной (25 °С), то все усилия, существующие внутри каждого элементарного объема, принятого при рассмотрении характера распределения внутренних напряжений, всегда уравновешены как в самом объеме, так и между сопряженными секторами, и направление действия этих усилий направлено по кратчайшему расстоянию от точки сосредоточения (равновесия каждого из объемов – центра масс) напряжений к точкам равновесия сопряженных участков.

Так как коробление связано с неравномерным распределением тепла в объеме свариваемых образцов [3], то отражение картины распределения температурных полей является первым этапом в разрабатываемой методике. На рис. 9 представлены изотермы температур пластин из углеродистой стали марки Ст3 размером 50×120 мм толщиной 4 мм, сваренные встык без разделки кромок при следующих режимах процесса:  $I_{CB} = 125 \text{ A}$ ;  $U_D = 20 \text{ В}$ ;  $V_{CB} = 0,25 \text{ см/с}$ . Расчет производился по схеме линейного быстродвижущегося источника тепла в пластине с учетом того, что тепловое воздействие дуги с лицевой стороны сварного соединения больше чем с обратной.

2. Учитывая, что коробление свариваемых заготовок происходит в результате неуровновешенности напряжений, вызванных изменением объема в результате неравномерного нагрева, то геометрия коробления конструкции будет совпадать с направлением действия внутренних напряжений от центра масс каждого из секторов (фантомные линии).

На рис. 9, б показаны свариваемые пластины, разбитые на сектора равного объема  $V = 64 \text{ мм}^3$ , каждому из которых соответствует одно или несколько состояний температурного нагрева.

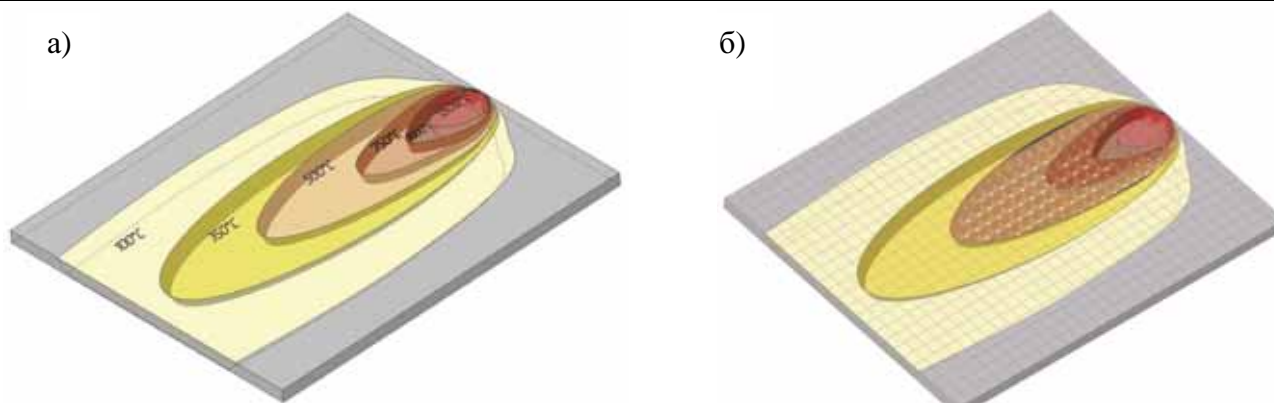


Рис. 9. Изотермы распределения температур при сварке пластин встык  
без разделки кромок:  
а – общего объема; б – с разбивкой на сектора равного объема  $V = 64 \text{ мм}^3$

Чтобы упростить построение фантомных линий действия внутренних напряжений (рис. 10) внутри всего объема свариваемых образцов, достаточно рассмотреть элементарные сектора большего объема, например полос размером  $4 \times 24 \times 100 \text{ мм}$ . Линии построены для пяти полос (рис. 11), ограниченных плоскостями, находящихся друг от друга на расстоянии 24 мм, и имеющих один или несколько температурных интервалов (например для полосы № 1:  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  (комнатная),  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ ; для полосы № 2:  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  (комнатная),  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  и т. д.).

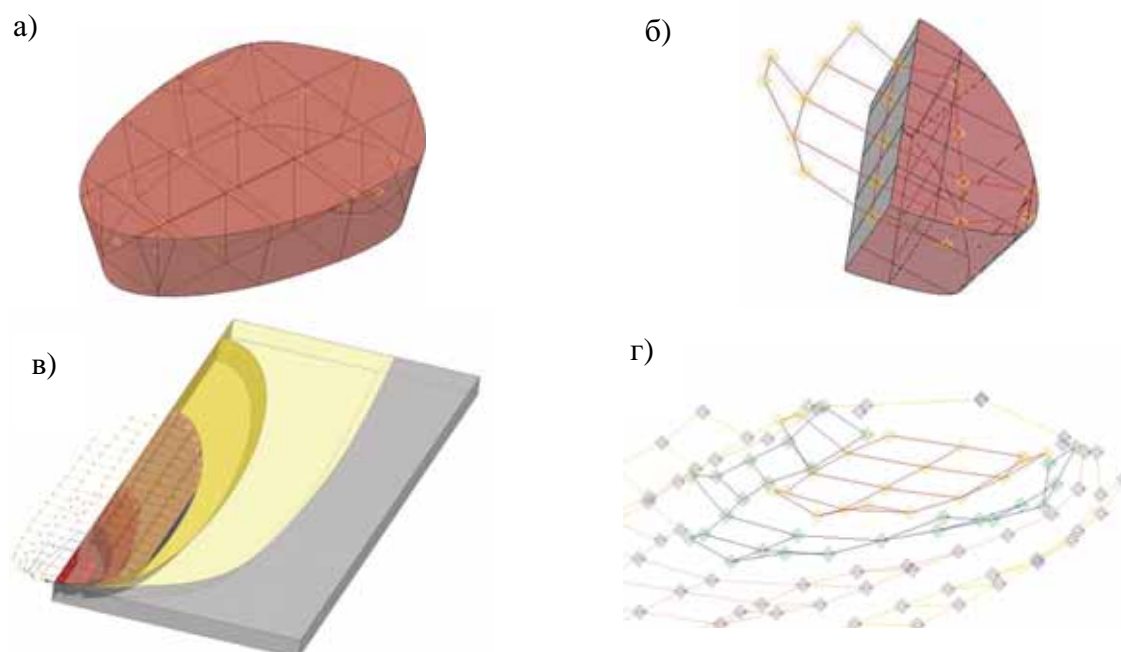


Рис. 10. Фантомы действия внутренних напряжений от центра масс  
каждого из выделенных секторов:  
а, б – на участке, нагретого до  $T = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
в, г – в объеме пластин

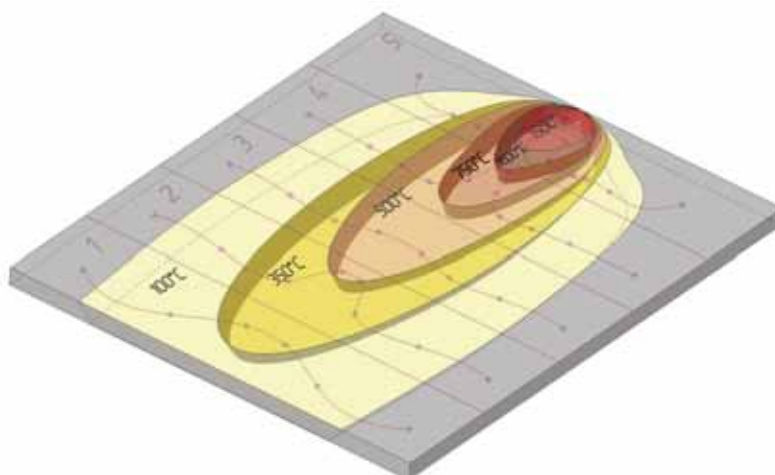


Рис. 11. Линии действия внутренних напряжений объемов тела, нагретых до различных температур

Линии действия внутренних напряжений представляют собой пространственные кривые, которые изменяют свое направление в трех плоскостях:  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ . Изменение геометрии линий действия внутренних напряжений в плоскости  $OZ$  (по толщине пластины) отражает характер изменения геометрии данного участка тела в данной плоскости – коробление конструкции; в плоскостях  $OX$  и  $OY$  отражен характер действия внутренних напряжений в направлении оси шва ( $OX$ ) и перпендикулярном ему ( $OY$ ) соответственно между смежными секторами полос, нагретых до различных температур.

Если задаться условием, что пластины после сварки сохраняют свои габаритные размеры ( $50 \times 120 \times 4$  мм), а коробление сварной конструкции будет происходить в плоскости  $OZ$  (по толщине пластины), то для определения местоположения сечений, характеризующихся изменением геометрии линий действия внутренних напряжений в плоскости  $OZ$  и отражающих характер коробления сварной конструкции достаточно провести среднюю линию для каждой из кривых, спроецированных на плоскость пластин (например, для полосы № 1 местоположение сечения, отражающего характер изменения геометрии тела, изображено на рис. 12).

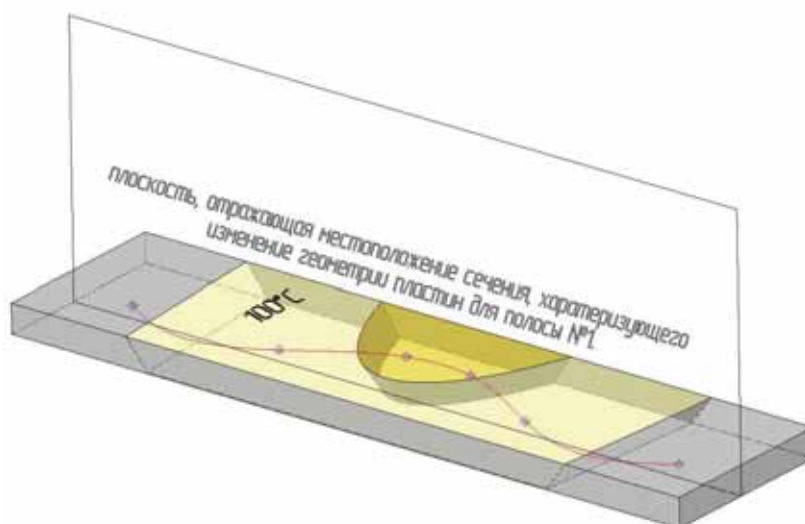


Рис. 12. Местоположение сечения, характеризующего изменение геометрии тела для полосы № 1

На рис. 13 изображены сечения для каждой из пяти полос свариваемых пластин, отражающих характер коробления сварной конструкции.

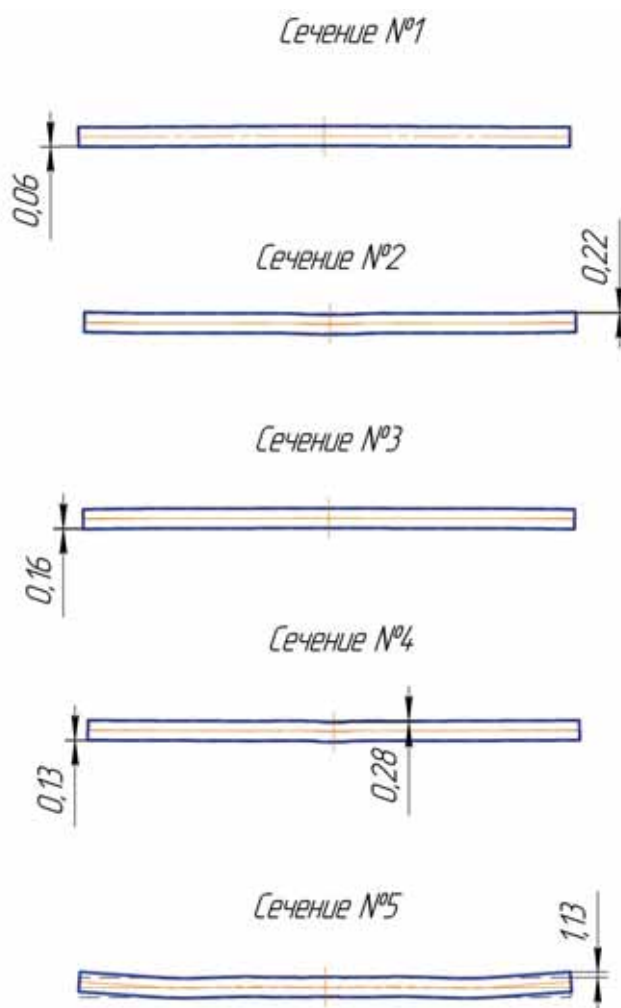


Рис. 13. Сечения для каждой из пяти полос свариваемых пластин, отражающих характер коробления сварной конструкции

Рис. 14 отражает картину деформирования пластин, вызванного термомеханическим циклом сварки.

Таким образом, методика расчета остаточных деформаций состоит из следующих этапов:

- 1) расчета распределения температурных полей для заданных режимов процесса;
- 2) разбиения на сектора (элементарные объемы);
- 3) определения положения центра масс (точка равновесия всех внутренних усилий) для каждого из секторов;
- 4) построения фантомных линий действия напряжений и сечений в плоскости OZ (по толщине пластин в направлении, перпендикулярном оси шва).

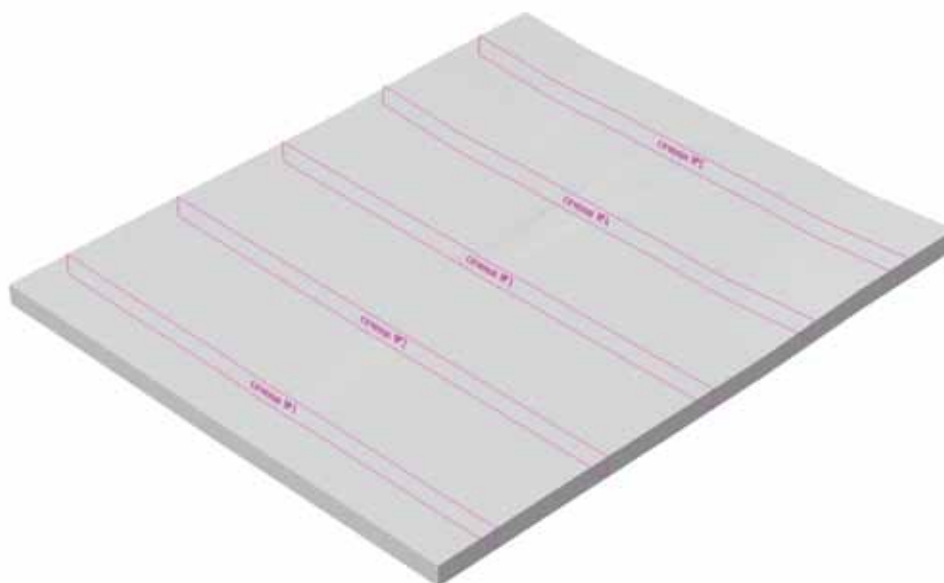


Рис. 14. Деформирование пластин, вызванное термодформационным циклом сварки

Вывод: Анализ сварочных деформаций по расчетной модели температурных полей при сварке тонких пластин встык из стали марки Ст3 позволяет выявить направление действия внутренних напряжений и оценить изменение геометрии деталей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Винокуров, В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В. А. Винокуров, А. Г. Григорьянц. – М. : Машиностроение, 1984. – 280с.
2. Муравьев, В. И. Эффективность снятия остаточных напряжений в сварных титановых конструкциях / В. И. Муравьев, П. В. Череповский // Проблемы механики сплошных сред и смежные вопросы технологии машиностроения : сб. докл. третьей конференции (Владивосток – Комсомольск-на-Амуре, сентябрь 2004). – Комсомольск-на-Амуре : ИМиМ ДВО РАН, 2005. – С. 219-228.
3. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.

ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ  
FLEET AND SHIPBUILDING

**Тарануха Н.А., Журбин О.В., Журбина И.Н.**  
**Taranukha N.A., Zhurbin O.V., Zhurbina I.N.**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЕВЫХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЁТОМ  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ**

**MATHEMATICAL AND EXPERIMENTAL MODELING OF FLUCTUATIONS IN BEAM-  
STRUCTURE SEA VESSELS, WITH REGARD TO THE RESISTANCE OF EXTERNAL  
LIQUID OF VARIOUS DENSITY**



**Тарануха Николай Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: taranukha@knastu.ru.

**Mr. Nikolay A. Taranukha** – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Shipbuilding, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur, Russia). Komsomolsk-on-Amur, e-mail: taranukha@knastu.ru.



**Журбин Олег Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, докторант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: zhurbin@pochta.ru.

**Mr. Oleg V. Zhurbin** – PhD in Engineering, Associate Professor, Doctoral Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur, Russia). Komsomolsk-on-Amur, e-mail: zhurbin@pochta.ru.



**Журбина Ирина Николаевна** – аспирантка Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), г. Комсомольск-на-Амуре.

**Ms. Irina N. Zhurbina** – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur, Russia), Komsomolsk-on-Amur, Russia.

**Аннотация.** Данная работа посвящена вопросам, связанным с решением задач динамики колеблющихся судовых конструкций. Рассмотрены присоединенные массы жидкости. Значительное внимание уделено учету сопротивления внешней и внутренней среды. Рассмотрено математическое моделирование колебаний на основе метода модуль-элементов (ММЭ). Важное место в работе уделено экспериментально-численному моделированию задач по определению сопротивления внешней и внутренней среды. В частности, здесь рассмотрено определение коэффициентов сопротивления для судовых систем, колеблющихся в воздухе, в воде, в дизельном топливе и в машинном масле.

**Summary:** The paper deals with issues related to solving the problems of the dynamics of fluctuating ship structures. The added mass of a liquid is considered. Significant attention is given to calculating the resistance of external and internal environment. Mathematical modeling of fluctuations is considered on the basis of the module-element method. The important place in the paper is given to experimental and numerical modeling of the tasks of defining the resistance of external and internal environment. In particular, the calculation of a resistance coefficient for a ship structure fluctuating in air, water, diesel fuel and in lubricating oil is considered.



**Ключевые слова:** кораблестроение, колебания, внутреннее и внешнее сопротивление, присоединённые массы, численное моделирование, метод модуль-элементов.

**Keywords:** shipbuilding, fluctuations, internal and external resistance, added masses, numerical modeling, method of module-elements

УДК 539.3/4

### Введение

В составе корабля имеются конструкции, которые колеблются в жидкой среде различной плотности. Это и забортная вода, и дизельное топливо, и техническое масло. При этом среда оказывает на конструкции сопротивление неупругого характера. По природе своего возникновения и механизму воздействия [11; 12; 15] следует различать два вида неупругого сопротивления среды: неупругое сопротивление внутренней среды (внутри материала) и неупругое сопротивление внешней среды (например, сопротивления неупругого основания или окружающей вязкой жидкости).

### О внутреннем и внешнем сопротивлении конструкционных материалов и жидкой среды

Одной из важнейших причин затухания свободных колебаний реальных конструкций является рассеяние энергии внутри материала (внутреннее трение в материале). Это внутреннее трение имеет в основном [16] термическую природу. Температурные изменения, вызванные деформацией поликристаллического металлического образца, меняются от зерна к зерну в зависимости от их кристаллографической ориентации, и происходит некоторое рассеяние энергии вследствие теплового потока между отдельными кристаллами. Если вызвать последовательные циклы нагрузки и разгрузки, то соответствующие диаграммы испытаний обнаружат петли гистерезиса, площади которых измеряют энергию, рассеянную за цикл.

Проблема колебаний значительно упрощается, если силы демпфирования пропорциональны скорости [16]. По этой причине силы сопротивления сложной природы для целей анализа очень часто заменяются эквивалентным вязким сопротивлением. Это эквивалентное сопротивление определяется из требования, чтобы оно вызывало то же рассеяние энергии за один цикл, что и действительная сила сопротивления. Этим способом, например, может быть исследовано затухание, вызываемое внутренним трением.

Достоверные оценки влияния внутреннего трения [2] важны при решении множества разнообразных задач, особенно для систем, при эксплуатации которых возможны резонансные режимы.

Сначала экспериментально, а затем и теоретически было установлено, что внутреннее трение в материале может послужить причиной возникновения опасных колебаний, непосредственно угрожающих прочности конструкции [2].

Благодаря внутреннему трению происходит быстрое затухание свободных колебаний конструкций [8], резкое ограничение роста амплитуд вынужденных колебаний при резонансах, сильное снижение напряжений от импульсов и ударов в конструкциях с большим числом степеней свободы и выравнивание динамических напряжений в местах их концентрации. Вследствие этого внутреннее трение является одной из важнейших динамических характеристик материала и конструкции. Чем больше внутреннее трение в конструкции, тем при прочих равных условиях она выгоднее для восприятия динамических воздействий [8].

Общепринятая мера внутреннего трения определяется из энергетических соображений и представляет отношение

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (1)$$

где  $\Delta W$  – необратимо поглощенная телом за один цикл часть энергии циклических деформаций;  $W$  – потенциальная энергия тела, отвечающая амплитуде деформаций за тот же цикл (см. рис. 1, а).

При этом предполагается, что потери на внешние сопротивления отсутствуют. Величину  $\psi$  называют коэффициентом поглощения.

В динамические расчеты коэффициент  $\psi$  входит вместе с множителем  $\frac{1}{2\pi}$ , характеризующим цикличность процесса. Поэтому в теории удобнее оперировать с величиной

$$\gamma = \frac{\psi}{2\pi}, \quad (2)$$

называемой коэффициентом внутреннего трения. Ее можно называть также коэффициентом неупругого сопротивления.

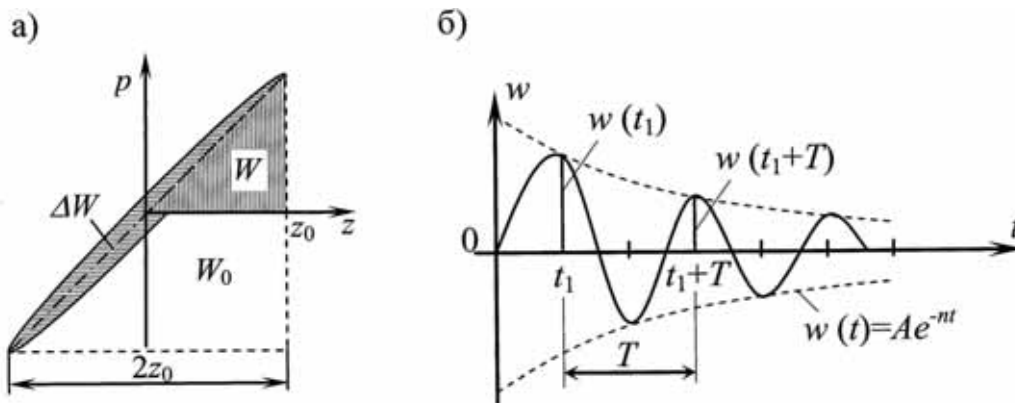


Рис. 1. Диаграмма работ (петля гистерезиса) (а) и график затухающего колебательного процесса (б)

Очень часто коэффициент поглощения  $\psi$  определяют по развертке свободных затухающих колебаний образца (см. рис. 1, б) изучаемого материала через логарифмический декремент затухания:

$$\ln D = \ln \frac{w(t_1)}{w(t_1 + T)}. \quad (3)$$

Между  $\psi$ ,  $\ln D$  и  $\gamma$  существуют отношения:

$$\psi = 2 \ln D = 2\pi\gamma. \quad (4)$$

Для интереса и более глубокого понимания доли внутреннего поглощения энергии в материале укажем в табл. 1 численные значения коэффициента поглощения  $\psi_\sigma$ , приведенные в работе [7], а также численные значения коэффициента  $\gamma_\sigma$  для некоторых материалов и конструкций с учетом [1; 3] и выражения (2).

Наряду с внутренним сопротивлением, в процессе колебания, на конструкцию часто действует внешнее сопротивление среды, например, для судна это сопротивление забортной воды или жидких нефтепродуктов в отсеках танкеров и топливных цистернах судов других типов.

В этом случае со стороны внешней среды на колеблющуюся систему начинают действовать силы сопротивления  $S_{соп}$ , величина которых, как принято считать, пропорциональна скорости  $v$  движения тела в неупругой среде:

$$S_{соп} = \beta \cdot v, \quad (5)$$



где  $\beta$  – коэффициент пропорциональности, есть коэффициент неупругого сопротивления внешней среды.

Таблица 1

Значения коэффициентов поглощения энергии  $\psi$  и внутреннего сопротивления  $\gamma$  для некоторых материалов и конструкций

	Материал, конструкция	$\psi_{\sigma}$ , [7]	$\gamma_{\sigma}$ , [1; 3]
Материалы	Алюминий	0.02-0.04	0.003-0.006
	Бетон	0.26	0.041
	Дуб	0.11	0.017
	Железобетон	0.25	0.040
	Латунь	0.01	0.002
	Медь	0.33	0.053
	Никель	0.03	0.005
	Резина	0.20-1.20	0.032-0.190
	Сосна	0.07	0.011
	Сталь	0.01-0.03	0.002-0.005
	Стеклопластик	0.20-0.40	0.032-0.064
	Чугун серый	0.23	0.036
Конструкции	Кирпичная кладка	0.25	0.040
	Конструкция деревянная	0.30-0.35	0.048-0.056
	Конструкция железобетонная	0.50	0.060-0.090
	Конструкция стальная	0.16-0.18	0.025-0,028
	Конструкция из стеклопластика	0.60-0.80	0.095-0.127
	Стальные мосты	0.04-0.31	0.006-0.050
	Судовые стальные днищевые перекрытия	0.40-0.60	0.064-0.095
Судовые стальные мачты	0.20-0.45	0.032-0.072	

Считается, что этот коэффициент зависит от свойств внешней среды и может быть определен только экспериментально.

Решать задачу по учёту внутреннего и внешнего сопротивления в динамике простых и сложных колеблющихся систем будем на основе ММЭ.

### Понятие о ММЭ

ММЭ [4; 5; 10; 12; 13] является одним из конечно-элементных методов и предназначен для исследования сложных тонкостенных конструкций и оболочек произвольной формы. Примерами таких оболочек могут служить судовой корпус или фюзеляж самолета. Расчет таких оболочек в настоящее время возможен только на основе численных методов, одним из которых является ММЭ.

Применительно к случаю рассмотрения сложной тонкостенной оболочки типа судового корпуса вполне можно ограничиться расчленением ее на сложные пространственные блоки, исходя, главным образом, из конструктивных соображений. Такой подход позволяет резко (на один-два порядка) сократить количество основных неизвестных задач.

ММЭ, прошедший практическую проверку в целой серии расчетов прочности корпусов реальных судов и сопоставленный с расчетами по другим методам, показал высокую эффективность как по трудоемкости расчетов, так и по подробности и точности получаемых результатов [4; 5; 10; 12; 13; 14].

В качестве расчетной модели судового корпуса принимается произвольно нагруженная с произвольными граничными условиями непрямоугольная тонкостенная складчатая

оболочка, подкреплённая продольно-поперечным набором и имеющая произвольные очертания в поперечных сечениях. Указанная оболочка рядом поперечных сечений может быть рассечена на пространственные модуль-элементы (МЭ) (см. рис. 2), взаимодействующие друг с другом в узловых точках.

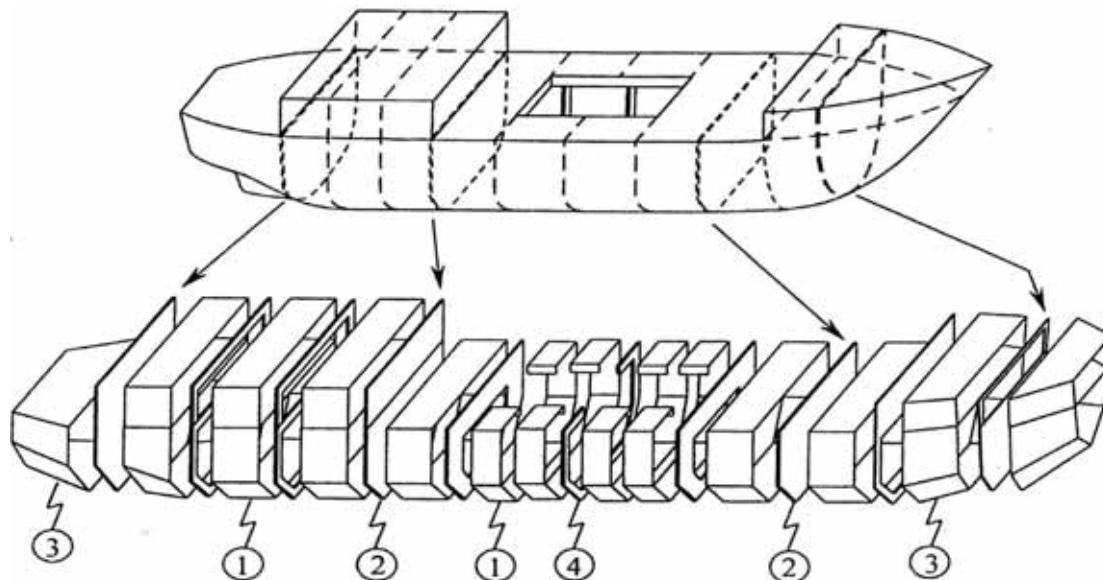


Рис. 2. Схема разбиения корпуса судна на МЭ.  
Типы МЭ: 1 – призматический; 2 – плоскостной;  
3 – непризматический; 4 – рамный

При этом образуются МЭ четырех типов: призматический МЭ, непризматический МЭ, плоскостной МЭ и рамный МЭ. Призматические и непризматические МЭ применяются при моделировании соответственно цилиндрической вставки и оконечностей судна. Плоскостные МЭ моделируют собой поперечные переборки, а рамные МЭ предназначены для моделирования шпангоутных рам.

С помощью МЭ успешно решаются задачи статической прочности, устойчивости и колебаний сложных конструкций, в том числе и с учётом сопротивления внутренней и внешней среды.

#### Учёт внутреннего и внешнего сопротивления в постановке МЭ

Наличие неупругих сил сопротивления приводит к тому, что происходит рассеивание (диссипация, потеря) в окружающее пространство части общей механической энергии колеблющейся системы.

Эта рассеивающаяся часть энергии системы может быть описана с помощью так называемой диссипативной функции (функции рассеивания)  $R$ . Понятие о диссипативной функции было введено Рэлеем в его классическом труде "Теория звука" (1878 г.).

Функция рассеивания  $R$  по структуре похожа на кинетическую энергию  $T = \frac{1}{2}mv^2$ , однако отличается от нее другими положительными коэффициентами – коэффициентами рассеивания  $\beta_i$  (вместо коэффициентов инерции  $m_i$ ).

Для системы с одной степенью свободы, обладающей коэффициентом рассеяния  $\beta$  и движущейся со скоростью  $v$ , функция рассеивания определяется непосредственно через выражение скорости зависимостью:

$$R = \frac{1}{2} \beta v^2, \quad (6)$$

где  $\beta$  – коэффициент рассеивания, это то же самое, что упомянутый ранее коэффициент сопротивления среды, который определяется экспериментально (см. формулу (5)).

Однако с учетом того, что сопротивляющаяся неупругая среда может быть внешней и внутренней, т.е. с учетом гипотез Фохта и Сорокина формула (6) должна быть записана следующим образом:

$$R = R^{\text{внеш}} + R^{\text{внут}} = \frac{1}{2} \beta v^2 + \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\omega} E v^2. \quad (7)$$

Если для колеблющейся системы область взаимодействия с внешней средой полностью совпадает с областью внутренней среды, то тогда функцию рассеивания (7) можно представить так:

$$R = \frac{1}{2} \left( \beta + \frac{\gamma}{\omega} E \right) v^2. \quad (8)$$

Однако такое совпадение внутренней и внешней областей у колеблющейся системы наблюдается не всегда. Например, такое несовпадение имеет место при колебаниях упругого тела, частично погруженного в вязкую жидкость (или частично взаимодействующего с неупругим твердым основанием).

Для системы с " $n$ " степенями свободы функция рассеивания должна быть записана следующим образом:

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \beta_i v_i^2, \quad (9)$$

где  $v_i$  – обобщенная скорость движения колеблющейся системы в направлении " $i$ "-го обобщенного перемещения (разрешенного " $i$ "-й степенью свободы);  $\beta_i$  – обобщенный коэффициент рассеивания (коэффициент сопротивления) колеблющейся системы, соответствующий " $i$ "-му обобщенному перемещению.

Коэффициенты  $\beta_i$  определяются экспериментально.

С учетом наличия внешнего и внутреннего неупругого сопротивления функция рассеивания будет иметь вид:

$$R = R^{\text{внеш}} + R^{\text{внут}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \beta_i v_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \frac{\gamma_j}{\omega_j} E v_j^2, \quad (10)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  – номера обобщенных перемещений, при осуществлении которых возникает внешнее сопротивление;  $j = 1, 2, 3, \dots, m$  – номера обобщенных перемещений, при осуществлении которых возникает внутреннее сопротивление.

Если область внешнего сопротивления полностью совпадает с областью внутреннего сопротивления, то функцию рассеивания можно записать следующим образом:

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left( \beta_i + \frac{\gamma_i}{\omega_i} E \right) v_i^2. \quad (11)$$

Запись  $R$  через обобщенные координаты приводит к тому, что функция рассеивания  $R$  является однородной положительной квадратичной функцией скоростей обобщенных координат  $\dot{q}_i$ , т.е. [17]:

$$R = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j, \quad (12)$$

где  $b_{ij}$  – некоторые постоянные коэффициенты, имеющие смысл обобщенных коэффициентов сопротивления, записанных в обобщенных координатах.

## Тарануха Н.А., Журбин О.В., Журбина И.Н. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЕВЫХ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЁТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ

Для определенности укажем здесь, что некоторые конкретные коэффициенты сопротивления можно, например, определить по формулам:

$$b_{ij}^{внеш} = b_{ij} = \int_s \beta(s) \chi_i(s) \chi_j(s) ds, \quad \text{при } i, j = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (13)$$

$$b_{ij}^{внут} = \int_s \frac{E}{\omega_{ij}} \gamma(s) \chi_i(s) \chi_j(s) ds, \quad \text{при } i, j = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (14)$$

где  $\chi_i(s)$  и  $\chi_j(s)$  – заданные координатные функции, принятые в ММЭ.

Более подробные рекомендации для выбора и построения различных координатных функций (которые могут быть достаточно сложными) приведены в работе [4].

Для случая установившегося гармонического движения, применительно к ММЭ, уравнение равновесия имеет вид [12]:

$$[M + M_{np}] \cdot (-\omega^2 \{Q\} e^{i\omega t}) + [B^{внеш} + B^{внут}] \cdot i\omega \{Q\} e^{i\omega t} + [K] \{Q\} e^{i\omega t} = \{P\} e^{i\omega t}. \quad (15)$$

После несложных преобразований получаем окончательный вид:

$$([K] - \omega^2 [M + M_{np}] + i\omega [B^{внеш} + B^{внут}]) \{Q\} = \{P\}, \quad (16)$$

где  $[K]$  – матрица жесткости всей конструкции (оболочки);  $[M]$  – матрица масс всей конструкции;  $[M_{np}]$  – матрица присоединённых масс окружающей среды;  $[B^{внеш}]$  – матрица сопротивления всей внешней среды;  $[B^{внут}]$  – матрица сопротивления всей внутренней среды;  $\{Q\}$  – матрица-вектор неизвестных обобщенных перемещений всей конструкции;  $\{P\}$  – матрица-вектор внешних нагрузок;  $\omega$  – частота вынужденных колебаний.

Решение этого уравнения (этой системы алгебраических уравнений) при заданных внешних нагрузках  $\{P\}$  и их частотах вынужденных колебаний  $\omega_i$  позволяет в принципе определить перемещения колеблющейся системы  $\{Q\}$ .

### Экспериментальное моделирование задачи по определению коэффициентов сопротивления внутренней и внешней среды

В качестве внешних сред, которые являются основными для судовых конструкций в процессе эксплуатации и которые оказывают наибольшее сопротивление, были выбраны: воздух, вода, дизельное топливо, машинное масло [11; 15].

Воздух – среда, выбранная для сравнения. Если предположить, что воздушная среда не оказывает существенного сопротивления колеблющейся системе, в этом случае параметры сопротивления можно считать соответствующими сопротивлению внутренней среды колеблющейся системы.

Вода – основная внешняя среда для всех объектов морской и речной техники.

Дизельное топливо – среда, с которой взаимодействуют конструкции топливных танков большинства судов и танкеров, перевозящих легкие нефтепродукты.

Машинное масло – среда, с которой взаимодействуют конструкции масляных танков обычных судов и танкеров, перевозящих тяжелые нефтепродукты.

В таких же условиях часто работают тонкостенные резервуары, предназначенные для хранения жидких продуктов.

Ниже рассмотрим колебания консольной балки (см. рис. 3).

Параметры балки и материала следующие:  $L = 0.335$  м,  $b = 0.012$  м,  $h = 0.0023$  м,  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $M_{гр} = 0.421$  кг,  $E = 2.0 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>.

Левый торец балки жёстко закреплён, правый – свободен и имеет сосредоточенную массу в виде груза.

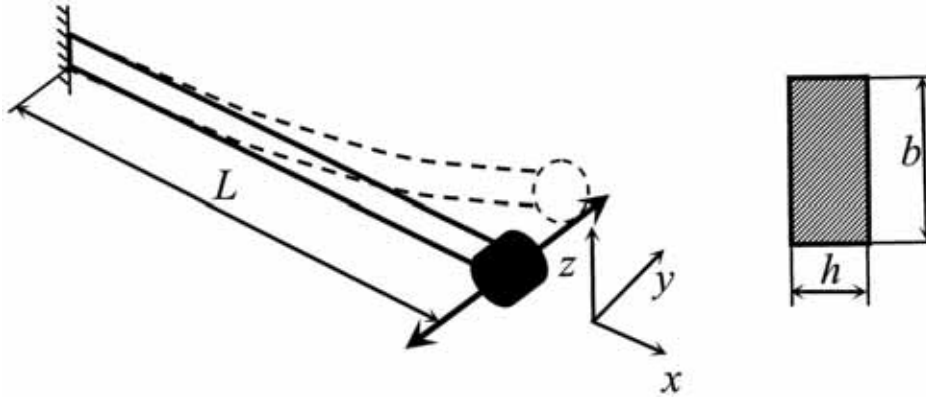


Рис. 3. Расчётная схема балки-консоли

Для определения коэффициента  $\beta$  поступим следующим образом:

а) экспериментально определим амплитуды двух соседних колебаний  $w_{эксн}(t_1)$  и  $w_{эксн}(t_1 + T)$ . При этом одновременно можно определить и экспериментальный период колебаний  $T_{эксн}$ ;

б) далее определяем экспериментальный декремент затухания  $D_{эксн}$ ;

в) определяем экспериментальный коэффициент сопротивления  $\beta_{эксн}$  по формуле

$$\beta_{эксн} = 2m_{эксн} \frac{\ln D_{эксн}}{T_{эксн}} = 2m_{эксн} \cdot n_{эксн} \quad (17)$$

При этом масса  $m_{эксн}$  с учетом массы упругой связи  $m_{упр.св.}$  для рассматриваемого случая определяется по формуле

$$m_{эксн} = m + m_{упр.св.}, \quad (18)$$

где  $m$  – конечная (основная) масса колеблющейся системы.

В рассматриваемом случае  $m_{упр.св.} = 0,072 \frac{H}{M} \cdot c^2$ ,  $m = 0,421 \frac{H}{M} \cdot c^2$ .

На рис. 4 изображён экспериментально полученный график затухающих колебаний.

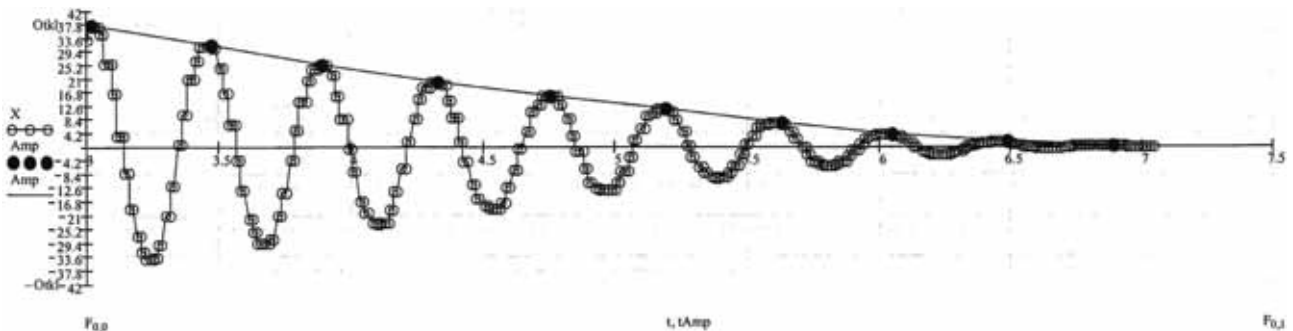


Рис. 4. График затухающих колебаний системы в воздухе

В результате экспериментов в воздухе, воде, дизельном топливе и машинном масле были получены коэффициенты затухания и сопротивления ( $n_{эксн}$ ,  $\beta_{эксн}$ ,  $\gamma_{\sigma}$ ), приведенные в табл. 2.

Численное значение коэффициента сопротивления  $\gamma_{\sigma}$ , полученного из эксперимента, совпадает с табличным (см. табл. 1). Это, в свою очередь, подтверждает правильность экспериментальных данных и корректность проведённого эксперимента. Однако в ходе экспериментальных исследований, кроме коэффициентов внутреннего сопротивления, были получены коэффициенты внешнего сопротивления, то есть коэффициенты сопротивления окружающей внешней среды (воды, дизельного топлива и машинного масла).

Значения экспериментальных коэффициентов затухания ( $n_{\text{экс}}$ ) и сопротивления ( $\beta_{\text{экс}}, \gamma_{\sigma}$ ), полученных при колебаниях стальной консольной балки в четырех внешних средах

Среда	Тип	Коэффициенты затухания $n_{\text{экс}}, \frac{1}{\text{сек}}$	Коэффициенты сопротивления в ММЭ $\beta_{\text{экс}}, \frac{H}{M} \cdot \text{сек}$	Коэффициенты сопротивления $\gamma_{\sigma}$
Воздух	Суммарные	0,042	0,041	0,004
	Внутренние	0,042	0,041	0,004
	Внешние	$\approx 0$	$\approx 0$	$\approx 0$
Вода	Суммарные	0,239	0,236	0,031
	Внутренние	0,042	0,041	0,004
	Внешние	0,197	0,194	0,027
Дизельное топливо	Суммарные	0,347	0,342	0,046
	Внутренние	0,042	0,041	0,004
	Внешние	0,305	0,301	0,042
Машинное масло	Суммарные	0,660	0,651	0,089
	Внутренние	0,042	0,041	0,004
	Внешние	0,618	0,609	0,085

Графически полученные результаты представлены на рис. 5.

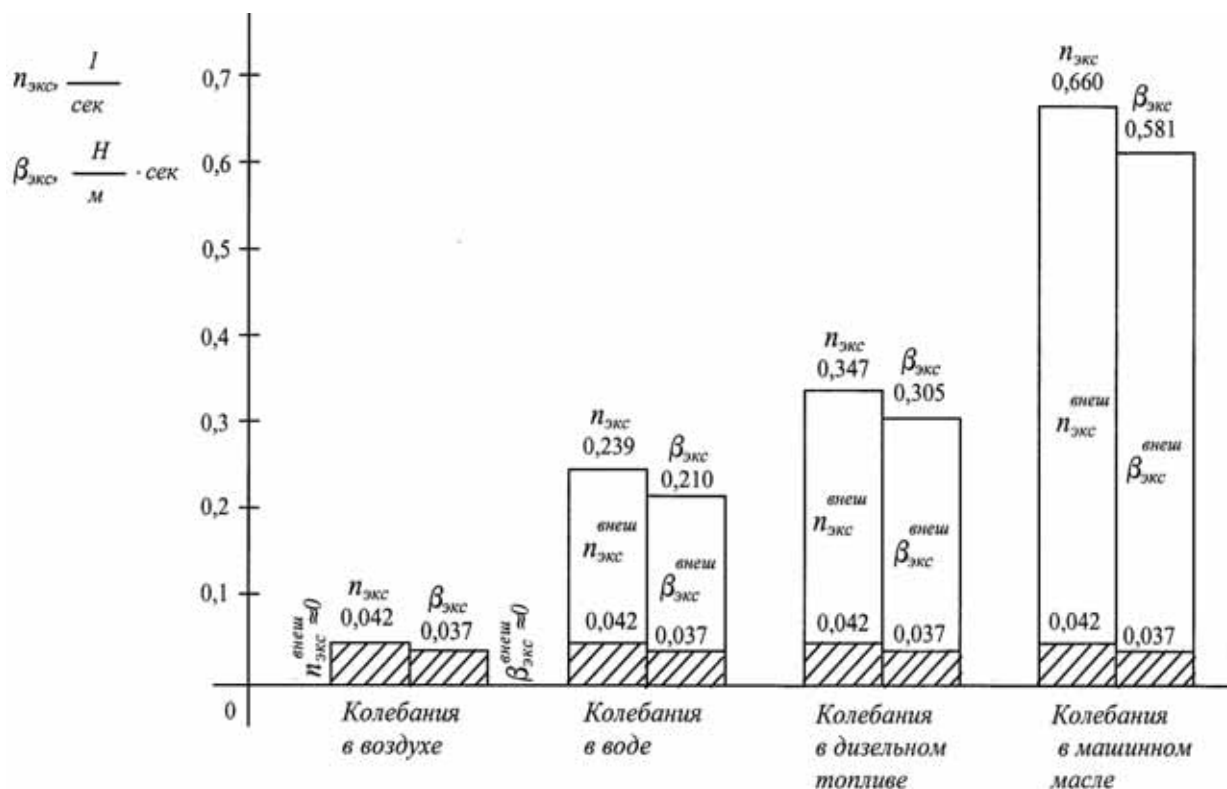


Рис. 5. Диаграмма экспериментальных коэффициентов затухания ( $n_{\text{экс}}^{\text{внут}}, n_{\text{экс}}^{\text{внеш}}$ ) и сопротивления ( $\beta_{\text{экс}}^{\text{внут}}, \beta_{\text{экс}}^{\text{внеш}}$ ), полученных при колебаниях стальной консольной балки в четырех внешних средах

### Сравнительные эксперименты и расчёты стальной балки консольного типа

Авторами настоящей статьи были выполнены экспериментальные исследования стальной балки, находящейся в различных условиях сопротивления от внешней среды. Результаты экспериментов сравнивались с результатами расчётов по различным методикам.

Сравнительные расчёты проводились по справочнику И.А. Биргера [6, 302], Е.С. Сорокина [8], а также с помощью численных методов: методом конечных элементов (МКЭ) и ММЭ. Для учёта внутреннего сопротивления материала конструкции в [6; 8] использовалась зависимость

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4}}}, \quad (19)$$

где  $\lambda_0$  – собственная частота колебаний без сопротивления;  $\gamma = 0.004$  – коэффициент внутреннего сопротивления для стальных конструкций [9].

Результаты сведены в табл. 3. Необходимо отметить, что формула (19) справедлива только для учёта внутреннего сопротивления и не позволяет учитывать сопротивление внешних сред, таких как вода либо другая жидкость.

При решении задачи МКЭ балка разбивалась на 6 элементов. Каждый узел имел 2 степени свободы, поперечное смещение и угол поворота, т.е. всего 12 степеней свободы. В ММЭ использовались 6 модуль-элементов. Координатные функции [4] учитывали поперечные смещения узлов и моменты.

Таблица 3

Сравнительная таблица частот свободных колебаний консольной балки без учёта сопротивления и с учётом сопротивления

	Без учёта сопротивления	С учётом сопротивления внутренней среды	С учётом сопротивления внутренней среды и воды	С учётом сопротивления внутренней среды и дизельного топлива	С учётом сопротивления внутренней среды и машинного масла
Метод определения частоты	Частота $\lambda_1$ , Гц				
Эксперимент	-	3.32	2.54	2.39	2.36
Расчёт по методике Е.С. Сорокина [8]	2.80	2.80 ↓=3.2·10 <sup>-4</sup>	-	-	-
Расчёт по методике И.А. Биргера [6]	3.17	3.17 ↓=6.3·10 <sup>-6</sup>	-	-	-
МКЭ [18]	3.35	3.35 ↓=5.84·10 <sup>-5</sup>	-	-	-
ММЭ [авторы]	3.44	3.44 ↓=8.21·10 <sup>-5</sup>	2.64 ↓=0.80	2.46 ↓=0.98	2.43 ↓=1.01

В табл. 3 стрелочками ↓ указана величина уменьшения частоты колебаний с сопротивлением в сравнении с частотой колебаний без сопротивления. Внутреннее сопротивление для стальной балки оказывает незначительное влияние на изменение частоты колебания, эта поправка порядка 10<sup>-5</sup> Гц. Однако даже такое незначительное влияние приводит к затуханию колебаний. При учёте сопротивления внешней среды эта поправка уже существенна.

### **Выводы**

1. Подтверждена правильность экспериментальных данных и корректность проведенных экспериментов.
2. В ходе экспериментальных исследований, кроме коэффициентов внутреннего сопротивления, были получены коэффициенты внешнего сопротивления, то есть коэффициенты сопротивления окружающей внешней среды (воды, дизельного топлива и машинного масла).
3. Сравнительные расчёты показали достоверность расчётов по ММЭ и подтвердили возможность решать такие задачи с помощью ММЭ.
4. Сопротивление внутренней среды оказывает незначительное влияние на изменение частоты колебания. Однако даже такое незначительное влияние приводит к затухающему процессу колебания, а в резонансной зоне может привести к существенным последствиям.
5. Сопротивление внешней среды вносит существенную поправку в частоту колебания и для полноты понимания колебательного процесса её необходимо учитывать.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Антоненко, С. В. Вибрация судов: учеб. пособие / С. В. Антоненко. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 148 с.
2. Пановко, Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем / Я. Г. Пановко. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 196 с.
3. Постнов, В. А. Вибрация корабля / В. А. Постнов, В. С. Калинин, Д. М. Ростовцев. – Л.: Судостроение, 1983. – 248 с.
4. Постнов, В. А. Метод модуль-элементов в расчетах судовых конструкций / В. А. Постнов, Н. А. Тарануха. – Л.: Судостроение, 1990. – 320 с.
5. Постнов, В. А. Оценка напряженно-деформированного состояния корпуса судна методом модуль-элементов / В. А. Постнов, Н. А. Тарануха // Судостроение. – 1983. – № 5. – С. 5-8.
6. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник. Т. 3 / под ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968.
7. Сборовский, А. К. Вибрация судов с корпусами из стеклопластиков / А. К. Сборовский, Ю. А. Никольский, В.Д. Попов. – Л.: Судостроение, 1967. – 191 с.
8. Сорокин, Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е. С. Сорокин. – М.: Изд-во литер. по строительству, архитектуре и строит. механике, 1960.
9. Сорокин, Е. С. Метод учета неупругого сопротивления материала при расчете конструкций на колебания / Е. С. Сорокин // Исследования по динамике сооружений: сб. – М.: Госстройиздат, 1951.
10. Тарануха, Н. А. Динамика «неправильных» оболочек / Н. А. Тарануха, Г. С. Лейзерович. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 423 с.
11. Тарануха, Н. А. Колебания динамических систем с большими деформациями из нестандартизированного материала / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2010. – № III-1(3). – С. 4-11.
12. Тарануха, Н. А. Математическое моделирование колебаний сложных оболочек. Гидроупругая постановка с учетом сопротивления / Н. А. Тарануха, О. В. Журбин. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 253 с.
13. Тарануха, Н. А. Метод модуль-элементов в расчетах прочности тонкостенных конструкций / Н. А. Тарануха // Труды ЛКИ: Механика и прочность судовых конструкций. – 1980. – С. 113-117.
14. Тарануха, Н. А. Новые решения в динамике "неправильных" оболочек / Н. А. Тарануха, Г. С. Лейзерович. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 203 с.
15. Тарануха, Н. А. Численное моделирование прочности и гидродинамики океанотехники / Н. А. Тарануха, О. В. Журбин, С. Д. Чижумов, И. Н. Журбина. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 340 с.
16. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
17. Яблонский, А. А. Курс теории колебаний / А. А. Яблонский, С. С. Норейко. – М.: Высш. шк., 1966. – 255 с.
18. <http://www.mscsoftware.com/Products/CAE-Tools/MS-CNastran.aspx>

**Степанова И.П.**  
**Stepanova I.G.**

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА К ОЦЕНКЕ ОПАСНОСТИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ**

**APPLYING SYSTEM ANALYSIS METHODS FOR THE ESTIMATION OF FOREST FIRE THREATS**

**Степанова Ирина Павловна** – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Безопасности жизнедеятельности» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Prof.Stepanova@mail.ru.

**Ms. Irina P. Stepanova** – Doctor of Engineering, Head of the Department of Health and Safety Studies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: Prof.Stepanova@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрены технологии контроля за уровнем угроз от лесных пожаров методами моделирования и системного анализа. Решение этой сложной задачи предлагается свести к набору ряда частных задач: моделирование распространения лесного пожара; моделирование уровня задымленности территорий и оценка экологических рисков; оценка рисков для здоровья населения; оценка экономических ущербов. Применение предлагаемых подходов к оценке опасности лесных пожаров позволит определять тенденцию изменения и степень опасности ситуации в режиме прогнозов и предпринимать опережающие мероприятия, адекватные уровню угроз.

**Summary:** The paper presents a review of methods for controlling forest fire threats by way of modeling and system analysis. To solve this urgent problem it is proposed to reduce it to a set of sub-problems: modeling the spread of a forest fire, modeling smoke rates and environmental risks rates, estimation of health risks for the population, estimation of economic damage. Application of the proposed approach to the estimation of forest fire threats will help forecast the dynamics of the threat and estimate it, and also to take preventive measures that are adequate to the threat level.

**Ключевые слова:** лесные пожары, моделирование, оценка, риск, загрязнение, территория, население, здоровье, ущерб, прогнозирование.

**Key-words:** forest fires, modeling, estimation, risk, pollution, territory, population, health, damage, forecast

УДК 614.84

**Краткое изложение главных идей. Почему важно развитие этих технологий.** Лесной пожар является значимым фактором риска для многих стран мира. Этот фактор должен одним из первых рассматриваться государственными и финансовыми организациями на стадии прединвестиционных и предпроектных исследований для экологического сопровождения процесса выработки и принятия решений, а также в ходе текущего управления риском на пожароопасных территориях отдельных государств или регионов. Разработка технологий контроля за уровнем угроз от лесных пожаров является важной государственной и международной задачей.

Лесные пожары влияют на глобальные и локальные изменения окружающей среды. Тепловые и дымовые выбросы обширных лесных пожаров меняют динамику атмосферы, процессы циркуляции воздушных масс и тем самым погодные условия.

На локальном уровне лесной пожар создает прямые угрозы жизни людей, функционированию объектов техносферы, сохранению древесины, сохранению биоразнообразия. Повышенная задымленность, обусловленная лесными пожарами, усложняет условия транспортных перевозок, создает угрозы для здоровья населения. Ущерб от косвенных угроз (так

**Степанова И.П.**

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА К ОЦЕНКЕ ОПАСНОСТИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

принято расценивать угрозы для здоровья населения) в некоторых случаях может оказаться больше, чем прямой ущерб от сгоревшей древесины.

Одно из перспективных направлений по предотвращению ущербов – моделирование пожарной ситуации. Такой подход позволит определять тенденцию изменения и степень опасности ситуации в режиме прогнозов и предпринимать опережающие мероприятия, адекватные уровню угроз.

Из-за сложности физического процесса горения лесов и наличия взаимосвязи с большим количеством влияющих факторов построение одной математической модели, отражающей все возможные взаимосвязи, не представляется возможным. Однако можно свести решение этой сложной задачи к набору ряда частных задач, которые в той или иной мере поддаются моделированию.

С нашей точки зрения технологию контроля за уровнем угроз можно свести к следующим этапам:

- 1) моделированию распространения лесного пожара;
- 2) моделированию уровня задымленности территорий и оценке экологических рисков;
- 3) оценке рисков для здоровья населения;
- 4) оценке экономических ущербов.

Только такой подход позволяет создать технологии оценки опасности лесного пожара, соответствующие международным требованиям: возможность учета изменения во времени параметров источника угроз, обусловленное этим процессом изменение качества окружающей среды и реакцию населения на предъявленные воздействия.

Для локальных непродолжительных пожаров оценка опасности может быть прекращена уже на первом этапе. Но для крупных и длительных пожаров, вызывающих задымленность больших территорий, необходимо проводить решение второго этапа задачи по оценке уровня загрязнения воздушной среды. В этом случае логическим продолжением второго этапа является обязательное решение серии задач по изучению ответных реакций разных групп населения на резкое изменение качества воздушной среды. В оценку ущербов в обязательном порядке следует включать реализовавшиеся и отдаленные (ожидаемые) ущербы от увеличения заболеваемости населения и сокращения продолжительности их жизни.

**Насколько уже развита эта технология.** На сегодняшний день наиболее разработаны и апробированы на практике задачи первого этапа – программные комплексы для моделирования распространения лесных пожаров: например, комплекс программ О.В. Зайченко «Forest Fire», зарегистрированный Роспатент № 2004610692 от 17.04.2004 г. или программы А. Карпова, Г. Телицина и др. Все они основаны на математической модели для расчета скорости распространения пожаров. Разработано значительное число таких моделей. Их обзор представлен в работе R.O. Weber «Modeling Fire Spread through Fuel Beds», Prog. Energy Combust. Sci/vol. 17, pp. 67-82, 1991.

В России на официальном уровне принята к использованию модель Гришина, изложенная в официальном издании Государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды «Методика определения и расчета выбросов ЗВ от ЛП» (М., 1990 г.).

Разработанные программные комплексы (ПК) интегрированы в географическую информационную систему управления лесными ресурсами. Они содержат базы данных с объемной плотностью и типами лесных горючих материалов и влажностью как функцией погодных условий. ПК визуализируют процесс на мониторе компьютера. Прогнозирование поведения лесного пожара – лучший способ по его предотвращению или успешному тушению. Модель распространения лесных пожаров позволяет за пренебрежимо малое время по сравнению со скоростью распространения ЛП моделировать большое число вариантов расположения противопожарных средств и выбрать оптимальный по минимуму затраченных ресурсов, времени тушения и возможной величине ущерба от пожара. Знание о возможном сценарии развития событий позволит выбрать правильную тактику по тушению пожара.



Решение задач второго этапа – оценка экологических рисков и обусловленных ими рисков для здоровья – наиболее сложная часть исследования.

**Количественную оценку экологического риска**, обусловленного качеством воздушной среды, в первом приближении можно получить на основе данных мониторинговых исследований уровней концентраций загрязняющих веществ, полученных на постах наблюдения методами измерения:

- по максимальным мгновенным значениям,  $\text{мг/м}^3$  и в долях ПДМ<sub>М.Р.</sub>;
- по числу превышений 1 ПДК, 3 ПДК, 5 ПДК за рассматриваемый период (сутки, месяц, период ЧС, год), в долях ПДК<sub>С.С.</sub>;
- по средним значениям за месяц, период ЧС, год (в  $\text{мг/м}^3$  и долях ПДК<sub>С.С.</sub>);
- по балльной оценке опасности по специальным критериальным таблицам;
- по обобщенным показателям, например по критерию «Р» [2].

При оценке экологического риска пожарной ситуации 1998 г., когда от задымленности пострадало более 1 млн жителей Хабаровского края, мы использовали все эти показатели.

**При балльной оценке** в качестве меры опасности нами была использована оценка *уровня средовой нагрузки*, выраженная в числах – баллах, для чего была предложена критериальная шкала, представленная в табл. 1.

Таблица 1

Критериальная шкала

Концентрация, доли ПДК	Уровень средовой нагрузки и опасности ситуации, балл	Примечание: характеристика качества среды, уровня нагрузки на организм человека, опасности ситуации
$\leq 1$	2	Благоприятная (качественная) среда, нормальный уровень нагрузки
От 1,1 до 3	3	Некачественная среда, низкий уровень нагрузки, низкий уровень опасности, т.к. ПДК по большинству веществ принято с коэффициентом запаса не менее 2,5
От 3,1 до 5	4	Некачественная среда, средний уровень нагрузки, средний уровень опасности
От 5 до 10	5	Некачественная среда, заметный уровень нагрузки, уровень опасности выше среднего. Область значений концентраций, для которых с высокой степенью достоверности получены данные об увеличении уровня заболеваемости населения
10-20	6	Область чрезвычайных ситуаций, повышенные нагрузки на организм человека, повышенный уровень опасности
20-30	7	Область чрезвычайных ситуаций, повышенные нагрузки на организм человека, повышенный уровень опасности
30-40	8	Область чрезвычайных ситуаций, повышенные нагрузки на организм человека, повышенный уровень опасности
40-50	9	Область чрезвычайных ситуаций, повышенные нагрузки на организм человека, повышенный уровень опасности
Более 50	10	Область чрезвычайных ситуаций, повышенные нагрузки на организм человека, повышенный уровень опасности

**Степанова И.П.**

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА К ОЦЕНКЕ ОПАСНОСТИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

В качестве меры для сравнения мгновенных значений использована предельно-допустимая концентрация максимальная разовая, а для средних значений – предельно-допустимая концентрация среднесуточная.

Расчет комплексной оценки за выбранный для исследования период времени (например: сутки, неделю, месяц, квартал и т.д.) может быть произведен по выражению

$$X_{\text{Компл}} = X_{\text{МАХ}} + \sum X_i / (\sum X_i + X_{\text{МАХ}}) + 0,5 (k - 1), \quad (1)$$

где  $X_{\text{Компл}}$  – комплексная оценка по всем веществам за выбранный период (например, месяц);  $\sum X_i$  – сумма баллов по всем веществам, имеющим отклонения от установленных нормативов и не включающим вещества, набравшие максимальный балл;  $k$  – число веществ, набравших максимальный балл.

Вещества, концентрации которых не превышают установленных нормативов, то есть балльные оценки которых равны 2 баллам, в определении комплексных оценок не участвуют.

Пример расчета комплексных оценок по всем веществам за месяц по данным о среднемесячной концентрации (см. табл. 2) приведен в табл. 3. Если комплексные оценки по всем веществам за каждый месяц определены, то общая оценка за весь пожарный период может быть рассчитана по выражению

$$X_{\text{ПожПериод}} = \sum X_{\text{Компл}} / N, \quad (2)$$

где  $N$  – число месяцев пожарного периода.

Таблица 2

Среднемесячные концентрации веществ на постах наблюдения  
г. Комсомольска-на-Амуре по месяцам пожарного периода 1998 г.

Вещество	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь	
	Доли ПДК	Балл	Доли ПДК	Балл	Доли ПДК	Балл	Доли ПДК	Балл	Доли ПДК	Балл	Доли ПДК	Балл
СО	2,6	3	0,6	2	2,85	3	4	4	7,56	5	7,35	5
С	4,5	4	1	2	4,8	4	6,7	5	18,79	6	15,7	6
NO <sub>2</sub>	0,62	2	0,3	2	1,4	3	0,4	2	2,65	3	2,68	3
Взвешенные	7	5	1,9	3	7,8	5	11,7	6	27,86	7	21	7
Комплексная оценка за месяц	5,86		3,33		6		6,88		8		8	

Как показали наши исследования, уровень средовой нагрузки в штатной ситуации (без учета пожара), сформированный техносферой города, в интервале времени 1990-97 гг. (до пожара) и 1999-2003 гг. (после пожара) соответствовал 3-4 баллам, а комплексная оценка за весь период пожаров 1998 г. оказалась равна 6 баллам.

**Оценка экологического риска по обобщенному показателю Р** проводится в соответствии с «Критериями обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия» [2]. Это условный показатель загрязнения воздуха для 2-20 веществ. Расчет критерия проводится по формуле

$$P = \sqrt{(\sum K_i^2)},$$

где  $\sum K_i^2$  – сумма кратностей превышения ПДК, «приведенных» к концентрациям веществ 3 класса опасности.



Таблица 3

Комплексная помесечная и средняя за период пожаров 1998 г.  
оценка средовой нагрузки и уровня опасности ситуации

Месяц	Расчет по формуле (1)	Комплексная оценка по всем веществам
Май k = 1	$X_{\text{Компл}} = 5 + (3 + 4) / ((3 + 4) + 5) + 0,5 * (1 - 1) = 5 + 0,58 + 0 = 5,58$	5,58
Июнь k = 1	$X_{\text{Компл}} = 3$	3
Июль k = 1	$X_{\text{Компл}} = 5 + (3 + 4 + 3) / ((3 + 4 + 3) + 5) + 0,5 * (1 - 1) = 5 + 0,66 + 0 = 5,66$	5,66
Август k = 1	$X_{\text{Компл}} = 6 + (4 + 5) / ((4 + 5) + 6) + 0,5 * (1 - 1) = 6 + 0,6 + 0 = 6,6$	6,6
Сентябрь k = 1	$X_{\text{Компл}} = 7 + (5 + 6 + 3) / ((5 + 6 + 3) + 7) + 0,5 * (1 - 1) = 7 + 0,66 + 0 = 7,66$	7,66
Октябрь k = 1	$X_{\text{Компл}} = 7 + (5 + 6 + 3) / ((5 + 6 + 3) + 7) + 0,5 * (1 - 1) = 7 + 0,66 + 0 = 7,66$	7,66
Комплексная оценка за весь период пожаров 1998 г.	Расчет по формуле (2): $(5,58 + 3 + 5,66 + 6,6 + 7,66 + 7,66) / 6 = 36,16 / 6 = 6,02$	6,02

Степень медико-экологического неблагополучия оценивается по табл. 4, а критерии определения экологической ситуации – по табл. 5.

Таблица 4

Степень медико-экологического неблагополучия

Оценка загрязнения воздуха	Величина индекса Р при числе веществ, загрязняющих воздух			
	2-4	5-9	10-20	> 20
Допустимая	≤ 2	≤ 3	≤ 4	≤ 5
Слабая	>2-4	>3-6	>4-8	>5-10
Умеренная	>4-8	>6-12	>8-16	>10-20
Сильная	>8-16	>12-24	>16-32	>20-40
Очень сильная	>16	>24	>32	>40

Таблица 5

Критерии экологической ситуации по качеству атмосферного воздуха

Уровень загрязнения воздуха	Величина индекса Р при числе веществ загрязнения воздуха				
	1	2-4	5-9	10-16	>16
Допустимый	1	2	3	4	5
Чрезвычайная экологическая ситуация	8-16	>16-32	>32-48	>48-64	>64-80
Экологическое бедствие	>16	>32	>48	>64	>80

**Степанова И.П.**

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА К ОЦЕНКЕ ОПАСНОСТИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

По величине показателя  $R$  ситуация 1998 г. оценена как чрезвычайная экологическая ситуация.

Знание обобщенного показателя  $R$  позволяет перейти к оценке риска увеличения заболеваемости населения, обусловленной химическими загрязнениями атмосферного воздуха [1]:

$$R = m * \lg (P/P_0),$$

где  $R$  – увеличение общей заболеваемости, выраженной в долях;  $m$  – коэффициент уравнения, равный 0,85;  $P$  – фактический индекс суммарного загрязнения;  $P_0$  – пороговый индекс суммарного загрязнения, соответствующий уровню допустимого загрязнения.

Если показатель заболеваемости при допустимом загрязнении принять за 1, то уровень общей заболеваемости можно рассчитать по формуле

$$Y = 1 + m * \lg (P/P_0).$$

Подобные расчеты позволяют определить вклад загрязнения атмосферы в общую заболеваемость населения.

Первый недостаток подобных экологических оценок, основанных на данных измерений, заключается в том, что списки веществ, включаемых в мониторинговые исследования, не отражают весь спектр реально существующих веществ и групп суммаций.

Например, в период пожаров 1998 г. проводились измерения лишь по трем веществам: взвешенные,  $CO$ ,  $NO_2$ . Полный перечень веществ из 13 наименований и групп суммаций из 14 наименований представлен в табл. 6 – 7 [6].

Таблица 6

Перечень веществ, выделяющихся при горении леса

Номер	Код	Наименование вещества (группы суммации)	Класс опасности	ПДК м.р., мг/м <sup>3</sup>	ПДК ср. сут, мг/м <sup>3</sup>
1	337	Углерода оксид ( $CO$ )	4	5	3
2	301	Азота оксиды ( $NO_x$ )	3	0,085	0,04
3	328	Сажа ( $C$ )	3	0,15	0,05
4	2909	Дым (ультра дисперсные частицы $SiO_2$ )	3	0,5	0,15
5	2902	Взвешенные вещества	3	0,5	0,15
6	410	Метан	4	50 (ОБУВ)	-
7	330	Серы диоксид ( $SO_2$ )	3	0,5	0,05
8	110	Ванадия оксид ( $V_2O_5$ )	1	-	0,002
9	333	Сероводород ( $H_2S$ )	2	0,008	-
10	1325	Формальдегид ( $HCHO$ )	2	0,035	0,003
11	602	Бензол	2	0,3	0,1
12	621	Толуол	3	0,6	3
13	616	Ксилолы	3	0,2	5
14	703	Бенз(а)пирен	1	-	$10^{-6}$

Второй недостаток таких оценок – невозможность учета изменения концентрации в пространстве и, как следствие, невозможность точного определения ингаляционной дозы вещества с учетом реальной картины распределения концентрации и плотности населения по территории города. Это, в свою очередь, не позволяет надеяться на достоверность прогнозных оценок риска для здоровья, которые могут быть сделаны с помощью известных моделей расчета риска здоровья по известной экспозиции (дозе) поступившего в организм человека вещества [4; 5].



### Группы суммации

Номер	Код	Вещества, формирующие группу
Образованы веществами дыма лесных пожаров		
1	6009	Азота оксид + серы диоксид
2	6018	Ванадия оксид + серы диоксид
3	6035	Формальдегид + сероводород
4	6043	Серы диоксид + сероводород
5	6046	Углерода оксид + Пыль неорганическая (SiO <sub>2</sub> )
Образованы веществами дыма лесных пожаров и техногенных источников города		
6	6034	Серы диоксид + свинец и его соединения
7	6010	Азота оксид + серы диоксид + углерода оксид + фенол
8	6032	Азота оксид + озон + формальдегид
9	6037	Сера диоксид + углерод оксид + фенол + взвешенные вещества
10	6038	Серы диоксид + фенол
11	6003	Аммиак + сероводород
12	6004	Аммиак + сероводород + формальдегид
13	6005	Аммиак + формальдегид

Для устранения этого недостатка необходимы модели лесных пожаров, позволяющие получить и визуализировать на картооснове местности распределение концентраций всех загрязняющих веществ и групп суммаций в пространстве за весь изучаемый интервал времени. Кроме того, необходимо знать распределение плотности населения по изучаемой территории.

Для получения распределения концентраций от выбросов лесных пожаров по территории города нами была использована расчетная модель профессора Берляндта и реализующая ее программа «Эколог».

Было сделано несколько подходов к построению расчетных моделей лесных пожаров, но наиболее точные результаты были получены в работе О.В. Зайченко [6; 7]. В качестве расчетной площадки рассматривалась территория г. Комсомольска-на-Амуре. Расчет проводился с учетом изменения места дислокации, характера и площади лесных пожаров на каждые сутки и с учетом изменения метеоусловий с частотой 3 раза за сутки. Расчет концентраций проводился отдельно для каждого фиксированного момента времени с интервалом в  $\frac{1}{3}$  часть суток. Полученная база данных расчетных значений концентраций загрязняющих веществ по списку табл. 6 – 7 позволила проследить изменение концентраций в каждый фиксированный момент времени по всей территории города и определить средние концентрации за месяц, пожарный период (5 месяцев), год в каждой точке расчетной площадки. Сопоставление расчетных и измеренных данных удалось провести только по тем веществам, которые измерялись: взвешенные, СО и NO<sub>2</sub>. Совпадение по мгновенным значениям не было достигнуто. Это объясняется невозможностью получения точных исходных данных для расчетов мгновенных значений концентраций. Однако характер изменения кривых концентраций от времени, полученный расчетным и метрологическим способами, был аналогичным.

Удовлетворительное количественное совпадение (на уровне 10-15 %) было получено только по среднегодовым концентрациям газообразных веществ СО и NO<sub>2</sub>.

Подобная модель позволяет:

- построить область вероятностей наихудших возможных ситуаций по загрязнению воздуха;
- провести ретроспективный анализ уже произошедших событий. Время запаздывания анализа будет зависеть от времени поступления исходной информации;

**Степанова И.П.**

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА К ОЦЕНКЕ ОПАСНОСТИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

- провести моделирование нежелательных вариантов развития событий и оценить их последствия;
- перейти к определению уточненной ингаляционной дозы вещества с учетом реальной картины распределения концентрации и плотности населения по территории города;
- на основе известной ингаляционной дозы рассчитать по известным моделям [4; 5] риск заболеваемости для различных категорий населения;
- выявить повышенные зоны риска на территории города в периоды лесных пожаров;
- разработать систему эвакуационных, защитных, реабилитационных и профилактических мероприятий, соответствующих уровню угроз для разных районов города и разных групп населения.

Второй тип моделей лесных пожаров, позволяющих получить и визуализировать на картооснове местности распределение концентраций всех загрязняющих веществ и групп суммаций – это модели, построенные на базе искусственных нейронных сетей (ИНС). ИНС базируется на эмпирических связях между измеренными характеристиками качества воздуха и параметрами, относящимися к погодным условиям. Методом получения этих связей служит ИНС.

Разработка информационных моделей на основе ИНС, которые благодаря своим аппроксимирующим свойствам и высокому быстродействию находят все большее применение при решении подобных задач, является перспективным направлением.

Подобная модель была реализована О.В. Зайченко (период пожаров 1998 г.) для восстановления полей концентраций на территории г. Комсомольска-на-Амуре, ограниченной стационарными постами наблюдения за загрязнением воздушной среды [6; 7]. К сожалению, не представилось практической возможности для оценки достоверности результатов, полученной на этой модели внутри рассмотренной площадки. В граничных точках было получено удовлетворительное совпадение.

Важной особенностью ИНС является то, что для их успешного применения достаточно предположения о существовании некоторой функциональной зависимости между входными воздействиями и реакцией объекта на эти воздействия. При этом обучение сети проводится по некоторым формальным правилам, не требующим тщательного физического анализа взаимосвязи параметров.

ИНС позволяет исключить трудоемкую операцию по сбору и обработке информации о параметрах пожаров, и использует в качестве входных параметров данные мониторинговых исследований концентраций ЗВ в граничных точках исследуемой территории.

Модель ИНС восстанавливает и визуализирует пространственно-временное распределение концентраций ЗВ на местности, ограниченной заданными точками, и позволяет исследовать влияние факторов, определяющих уровень и распределение концентрации ЗВ. Модель способна к текущей и прогнозной оценке экологической обстановки.

С ее помощью можно рассчитать и визуализировать поля концентраций с выделением участков (зон) с опасно высоким уровнем загрязнений. Рекомендуется к использованию наряду с метрологическими методами контроля уровня загрязнения воздуха городов в штатных и чрезвычайных ситуациях.

Модель способна определить поле концентраций по любым веществам, для которых проводятся метрологические измерения. Предложенную методику моделирования целесообразно применять для случаев: оценки изменчивости концентраций на местности и во времени, для прогнозирования.

Основные преимущества использования моделирования совместно с мониторингом следующие:

- повышение информативности в плане уточнения пространственно-временной изменчивости концентраций, без проведения дорогостоящих массовых замеров;
- возможность оценки краткосрочных и долгосрочных прогнозов концентраций;



- выполнение интерполяции между точками замеров, экстраполяции за пределами зоны охвата сети пунктов мониторинга;
- возможность оценки значимости факторов, влияющих на распределение концентраций на исследуемой территории.

К недостаткам можно отнести большой объем ретроспективных данных о замерах и метеоусловиях, требуемых для обучения сети, а также необходимость переобучения нейросетевой модели, настроенной на характеристики определенной местности, для применения к другой изучаемой территории. Внутри исследуемой площадки не должно находиться более мощных, чем снаружи площадки, источников выбросов ЗВ.

**Установление связей между изменением качества среды и ростом заболеваемости населения** проводилось в нескольких направлениях:

- по изучению динамики стандартных показателей заболеваемости за временные периоды, включающие предпожарный (3 года), пожарный (1 год) и послепожарный (5 лет) периоды;
- по методу четырех полей;
- по коэффициенту реакции населения.

Использование метода четырех полей для доказательства связи между патологией и действующим фактором [9] проводилось при допущении, что в качестве исследуемой и контрольной группы может быть рассмотрена одна и та же группа населения, но в разные временные периоды: до пожара (контрольная) и после пожара (исследуемая). Доказать связь подобным методом удалось для взрослого населения и подростков (15-17 лет) по следующим видам заболеваний: органов дыхания (у взрослых), крови и кроветворных органов (у взрослых и подростков), болезней системы кровообращения (у взрослых), по новообразованиям (для подростков), болезней эндокринной системы (у взрослых и подростков). Для детей (0-14 лет) связь не по одному из видов заболевания не доказана.

Удобным оказалось введение динамического коэффициента прироста  $K$ , равного отношению текущего значения прироста заболеваемости к среднему уровню прироста за предшествующий пожару период. По величине этого коэффициента можно судить о силе реакции населения на предъявленное воздействие. По максимальному значению этого коэффициента были проранжированы те нозологические формы заболеваемости населения города, по которым реакция населения оказалась наиболее сильной.

Как следует из полученных данных, по силе реакции на первом месте оказалось взрослое население старше 18 лет (до 44 раз – по болезням органов дыхания), на втором месте – подростки 15-17 лет (до 28 раз – по новообразованиям), на третьем – беременные женщины и новорожденные дети (до 9 раз). Слабее всего отреагировали дети до 14 лет (до 2 раз – органы дыхания). По скорости реакции на первом месте – беременные женщины и новорожденные дети, у всех остальных контингентов населения реакция отсрочена от момента воздействия на 1-2 года.

По величине коэффициента  $K$  три первых места заняли следующие виды заболеваний:  
**для взрослого населения**

- заболевания органов дыхания ( $K = 44$ );
- заболевания крови и кроветворных органов ( $K = 20$ );
- болезни системы кровообращения ( $K = 11$ );

**для подростков**

- новообразования ( $K = 28$ );
- болезни эндокринной системы ( $K = 26$ );
- заболевания крови и кроветворных органов ( $K = 13$ ).

Высокий коэффициент прироста был отмечен для болезней, связанных с нарушениями эндокринной системы, у всех возрастных групп населения.

Наибольшую тревогу у людей вызывают онкозаболевания, имеющие длительный скрытый период развития. Для прогнозов развития подобных патологий и развертывания ме-

**Степанова И.П.**

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА К ОЦЕНКЕ ОПАСНОСТИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ**

тодов профилактики, раннего выявления и лечения мы считаем очень важным развитие исследований онкопатологий у домашних животных, переживших последствия действия высокой задымленности от лесных пожаров. Животные имеют в 6-8 раз более короткий жизненный цикл, чем человек. Это создает возможности изучения процесса развития болезни в 6-8 раз более короткие сроки, чем это может происходить у людей.

### **Инструменты и оборудование, уже имеющиеся у исследовательской группы:**

- 1 Математическая модель распространения пожара. Программа «Forest Fire» и др. [6; 7].
  - 2 Математическая модель расчета выделений от лесных пожаров. Математическая модель расчета рассеивания вредных примесей. Программа «Эколог», реализующая процесс рассеивания выбросов. Программа, проводящая обработку результатов расчетов программы «Эколог».
  - 3 Информационные модели на основе ИНС для моделирования полей концентраций и их программная реализация.
  - 4 Методика определения плотности выпадения канцерогенных и неканцерогенных веществ в зоне влияния лесных пожаров и ее апробация [8].
  - 5 Опыт апробации и внедрения предлагаемых моделей в практику в России и Южной Кореи.
  - 6 Методики расчета плотности распределения населения по территории города [8].
  - 7 Методики расчета ингаляционных доз вещества с учетом распределения их концентраций в пространстве и во времени и с учетом неравномерного распределения населения по территории города [8].
  - 8 Опыт апробации различных моделей расчета риска заболеваемости населения на основе уточненных данных и зонирование на этой основе территорий городов [8].
- Все методики реализованы с помощью современных компьютерных технологий и могут быть применены другими исследователями для решения своих прикладных задач.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Киселев, А. В. Методические рекомендации по оценке риска здоровью населения от загрязнения воздуха / А. В. Киселев, Л. А. Саватеева. – СПб.: Дейта, 1995. – 53 с.
2. Критерии обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия, 30.11.92. – М., 1995.
3. Санитарно-гигиенические нормативы загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест и правила их применения. – М., 1990.
4. Медико-экологическая экспертиза здоровья населения: практикум для врачей-гигиенистов / под ред. А. П. Щербо. – СПб., 1996. – 53 с.
5. Окружающая среда и здоровье: подходы к оценке риска / под ред. А. П. Щербо. – СПб., 2002. – 376 с.
6. Зайченко, О. В. Моделирование лесного пожара для оценки его влияния на загрязнение атмосферы города / О. В. Зайченко // Города Дальнего Востока: экология и жизнь человека: матер. конф. (Дружининские чтения. Вып. 1). – Владивосток–Хабаровск: ДВО РАН, 2003. – С. 48-51.
7. Зайченко, О. В. Анализ уровня загрязнения воздушной среды города в период чрезвычайной пожарной ситуации лета 1998 года по данным, полученным на расчетных моделях / О. В. Зайченко // Нелинейная динамика и прикладная синергетика: матер. междунар. научной конф. (Комсомольск-на-Амуре, 23-27 сентября 2002 г.). Ч. 4. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2002. – С. 71-77.
8. Гореликова, Е. И. Экологическая безопасность: учеб. пособие / Е. И. Гореликова, И. П. Степанова, О. В. Зайченко. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2005. – 162 с.
9. Окружающая среда и здоровье: подходы к оценке риска / под ред. А. П. Щербо. – СПб., 2002. – 376 с.



Головков В.В., Мороз Е.В.  
Golovkov V.V., Moroz E.V.

**ТЕЧЕНИЕ И ПРОГНОЗ ГЕМОРРАГИЧЕСКОГО ИНСУЛЬТА И ИШЕМИЧЕСКОГО ИНФАРКТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

**DEVELOPMENT AND PROGNOSIS OF ANEMIC INFARCT AND HEMORRHAGIC STROKE UNDER THE MPACT OF ENVIRONMENTAL FACTORS**

**Головков В.В.** – невролог, МУЗ «Городская больница № 2» (Россия, Комсомольск-на-Амуре).  
**Mr. V.V. Golovkov**, neurologist, City Hospital No. 2, Komsomolsk-on-Amur

**Мороз Е.В.** – невролог, МУЗ «Городская поликлиника №9» (Россия, Комсомольск-на-Амуре)  
**Mr. E.V. Moroz**, neurologist, City Hospital No. 9, Komsomolsk-on-Amur

**Аннотация.** В работе проведено исследование зависимости заболеваемости и смертности от сердечно-сосудистых заболеваний у жителей г. Комсомольска-на-Амуре с 1997 по 2005 гг., от факторов окружающей среды на основе анализа статистических данных. Высказано предположение, что рост заболеваемости и смертности связан не только с загрязнением окружающей среды, но и с социально-экономическими и социально-психологическими факторами.

**Summary:** The paper presents the results of a study of how cardiovascular disease incidence and mortality are related to environmental factors in the city of Komsomolsk-on-Amur in 1997 – 2005; the study is based on statistical data. The authors believe that the observed increase of the disease incidence and mortality was due to both environmental pollution and social-economic and psychological factors.

**Ключевые слова:** окружающая среда, загрязнение воздуха, заболеваемость, смертность, население, статистический анализ, социально-экономические и экологические факторы.

**Key-words:** environment, air pollution, incidence, mortality rate, population, statistical analysis, social-economic and environmental factors

УДК 61:658,34; 616,1/4

В последние годы увеличивается частота острых нарушений мозгового кровообращения. В России ежегодно переносят инсульт более 45 тыс. человек. Инсульты занимают второе место среди причин летальных исходов в России. Геморрагический инсульт (внутричерепное кровоизлияние) является наиболее тяжёлым осложнением различных заболеваний сосудов мозга и возникает в любом возрасте. Кровоизлияние в мозг возникает вследствие разрыва мозговых сосудов при повышении перфузионного давления в мозге вследствие подъёма артериального давления. Ишемический инсульт – это быстрое локальное или диффузное поражение функций мозга сосудистого генеза, которое длится более 24 ч и может заканчиваться смертью пациента.

Целью нашего исследования было установление зависимости роста заболеваемости геморрагическим и ишемическим инсультом у пациентов, пролеченных в неврологическом отделении МУЗ Городской больницы №2 г. Комсомольска-на-Амуре с 1997 по 2005 гг., от факторов окружающей среды.

В задачи исследования входил анализ летальности в зависимости от пола и возраста больных, исходной тяжести состояния, факторов риска.

Нами была проанализирована статистическая документация (истории болезни) 2136 пациентов с геморрагическим и ишемическим инсультом в возрасте от 43 до 89 лет, прошедших лечение и обследование в неврологическом отделении МУЗ Городской больницы №2 с 1996 по 2005 гг.

**Головков В.В., Мороз Е.В.**

## ТЕЧЕНИЕ И ПРОГНОЗ ГЕМОРРАГИЧЕСКОГО ИНСУЛЬТА И ИШЕМИЧЕСКОГО ИНФАРКТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Всего в период с 1996 по 2005гг. было пролечено 2130 человек: с ишемическим инсультом (ИИ) – 1606, с геморрагическим (ГИ) – 530 человек. В 1996г. в неврологическое отделение поступило с ИИ – 94 и ГИ – 38 человек. В 1998г., когда в г. Комсомольске-на-Амуре был отмечен высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха вследствие лесных пожаров, количество ГИ – 70, ИИ – 133; и затем наблюдается постепенный рост заболеваемости (см. рис. 1).

Тяжесть у больных, проходивших лечение в отделении от инсульта с 1996г., увеличивается (см. рис. 2).

Мы видим, что летальность (смертность) от ИИ в сравнении с 1996г. возросла к 2005г. в 5 раз, а от ГИ – в 2,4 раза. Наибольшее число летальных исходов от инсультов приходится на ранние сроки от начала заболевания. Среди ИИ и ГИ преобладают 70% пациентов мужского пола. Таким образом, видно, что в 1998г. заболеваемость инсультами возросла в 1,4 раза и к 2005г. она увеличивается с ИИ в 2,4 раза, ГИ – в 1,7 раза.

Тяжесть обоих видов инсультов с каждым годом возрастает (см. рис. 2). Очевидно, это связано не только с тяжёлой экологической обстановкой, вызванной обширными и продолжительными пожарами. Возможно, здесь играют роль социально-экономические и социально-психологические факторы, которые сложились в нашей стране.

Всё это говорит о том, что среди населения следует проводить активную профилактическую работу, включающую не только лечебные, но и психотерапевтические мероприятия.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гиндулина, Н.В. Охрана лесов от пожаров в современных условиях: матер. междунар. науч.- практ. конф. – Хабаровск, 2002.
2. Пономарёва, Е.Н. Факторы риска инфаркта мозга, исход заболевания в зависимости от сроков госпитализации / Е.Н. Пономарёва, Е.А. Короткевич, Э.К. Сидорович [и др.] // Неврологический журнал. – 2003. – Т.8.
3. Трошин, В.Д. Острые нарушения мозгового кровообращения / В. Д. Трошин, А. В. Густов, О. В. Трошин. – Нижний Новгород, 2000.
4. Трошин, В.Д. Острые нарушения мозгового кровообращения / В.Д. Трошин, В.М. Трошин. – Нижний Новгород, 1993.

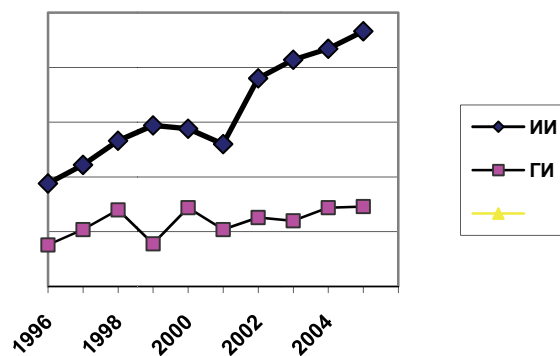


Рис. 1. Заболеваемость ИИ и ГИ в неврологическом отделении с 1996 по 2005гг.

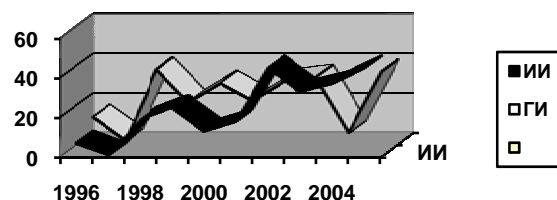


Рис. 2. Летальность от ГИ и ИИ



**Гореликова Е.И.**  
**Gorelikova E.I.**

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ДЛЯ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ АККУМУЛЯТОРНОГО ЗАВОДА (ОАО КНААЗ)**

**DEVELOPMENT OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE MODEL FOR THE RETROSPECTIVE ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL IMPACT: A CASE STUDY (KOMSOMOLSK-ON-AMUR BATTERY PLANT)**

**Гореликова Е.И.** – старший преподаватель Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail:gorelikova\_ei@mail.ru.  
**Ms.E.I.Gorelikova** – Senior Lecturer, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail:gorelikova\_ei@mail.ru

**Аннотация.** В работе описан алгоритм моделирования аккумуляторного завода как источника загрязнения атмосферы в ретроспективе за весь период его существования с 1942 г. Составлена схема материально-сырьевого баланса аккумуляторного производства. Предложен метод расчета мощности от организованных источников выбросов предприятия на основе данных об объемах производства. Рассмотрено влияние аккумуляторного завода на загрязнение свинцом атмосферы прилегающих территорий в динамике за более чем 60 лет.

**Summary:** The paper offers an algorithm for developing retrospective models of the battery plant as a source of air pollution, since the plant's opening in 1942. A flow-chart of the material balance of an accumulator battery production facility is proposed. A method for calculating the amount of emission from the factory's stationary sources is proposed based on the production data. The role of the battery plant in lead pollution of the air and neighborhood has been examined for more than 60 years in its dynamics.

**Ключевые слова:** алгоритм, моделирование, поля концентраций, свинцовое загрязнение, территория, экологическая оценка.

**Key-words:** algorithm, modeling, concentration pattern, lead pollution, territory, environmental impact assessment

УДК 331.45

ОАО «КнААЗ» был основан в 1942 г., когда страна находилась в состоянии войны. С тех пор на протяжении многих лет он является единственным специализированным предприятием по выпуску свинцовых стартерных аккумуляторов на всем российском Дальнем Востоке. Шло время. Война закончилась. Город постепенно рос, строился и развивался. В итоге завод оказался расположенным в центральной части города. Буквально в пятидесяти метрах от границы территории предприятия находится один из городских стадионов, а также дом культуры. Практически здесь же начинается жилой сектор центральной части города, в которой проживает около 200 тыс. человек. Фактически жилая и производственная зоны слились в единое целое. Подобная ситуация сложилась во многих промышленных городах России и зарубежья.

В данной публикации представлены результаты исследования ОАО «КнААЗ» за весь период его 60-летнего существования как источника загрязнения города свинцом.

Предприятие начало свою работу гораздо раньше, чем появилось законодательство в области охраны окружающей среды в России. Шла война. Тяжелая обстановка, сложившаяся из-за блокады Ленинграда, в котором находился крупнейший аккумуляторный завод страны,

## Гореликова Е.И. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ДЛЯ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ АККУМУЛЯТОРНОГО ЗАВОДА (ОАО КНААЗ)

потребовала срочного ввода в эксплуатацию завода в г. Комсомольске-на-Амуре. Первая партия танковых аккумуляторных батарей была отправлена на Сталинградский фронт. Интересы такой крупной системы, как государство вышли на первый план, продукция военно-промышленного направления имела первостепенное значение. Тогда некогда, да и некому было серьезно задумываться, какое влияние предприятие окажет на людей и окружающую среду в будущем.

В СССР именно хозяйственное законодательство включало определенные положения, направленные на предотвращение негативного воздействия на окружающую среду. Нормы и правила содержали, наряду с техническими, природоохранные и санитарные стандарты, а также определенные требования по проведению экологических расчетов и оформлению проектной документации. Например, начиная с 70-х гг., существовало требование о включении в большинство видов проектной документации раздела «Охрана окружающей природной среды», описывающего проектируемые природоохранные меры. Первым, юридически оформленным шагом к экологической экспертизе в СССР, стало Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 1 декабря 1978 г., в котором было рекомендовано внедрение в практику народно-хозяйственного планирования территориальных комплексных схем охраны природы (ТерКСОП). К сожалению, ТерКСОПы в условиях жесткой плановой системы и монополии министерств не стали эффективным инструментом экологического проектирования и экспертизы. Систематического, комплексного и открытого рассмотрения последствий планируемой хозяйственной деятельности для окружающей среды и здоровья населения не проводилось.

В 1985 г. Госстроем СССР были приняты строительные нормы и правила (СНиП), по которым впервые от проектировщиков требовалась оценка состояния окружающей среды и экосистем в регионе предполагаемого строительства, а также прогноз воздействия на них со стороны проекта. Становление и развитие экологического права РФ относится к концу 1980-х – 1990-м гг., когда был принят широкий спектр законов, регулирующих деятельность в области охраны окружающей среды, обеспечения экологической безопасности населения и рационального природопользования.

Достоверные данные о параметрах выбросов свинца от КнААЗ и их количестве известны лишь с 1986 г., когда для предприятий стало обязательным разрабатывать проект предельно-допустимых выбросов в атмосферу. Поэтому получение необходимой и в достаточной степени достоверной информации о выбросах для начальных этапов работы КнААЗ представляет собой самостоятельный этап исследования свинцового загрязнения г. Комсомольска-на-Амуре.

Первоначально этап рассмотрения предприятия как источника загрязнения атмосферы города за период, в который отсутствует информации о выбросах (1942-1984), попытались произвести на основе системы коэффициентов выбросов («emission factor») [1]. Эта система разрабатывалась в основном для упрощения проведения национальных инвентаризаций по объемам произведенной продукции. Как выяснилось, только небольшая часть этих коэффициентов получила статус нормативов в некоторых странах. Применение удельных нормативов (коэффициентов выбросов) для инвентаризации предполагает наличие соответствующей достоверной статистики по многим видам произведённой продукции и используемого сырья. Только в этом случае можно говорить о применении системы коэффициентов выбросов на основе учёта произведённой продукции для определения выбросов загрязняющих веществ [2].

Найти такую статистику для определения ориентировочных коэффициентов выделения свинца при производстве аккумуляторов по порошковой технологии оказалось весьма проблематичным. Была сделана попытка использовать единичные данные удельных выбросов на единицу произведенной продукции подобных КнААЗ предприятий для определения валовых выбросов в период, когда достоверно известны только объемы производства. С целью проверки сопоставили полученные таким способом объемы выбросов для годов с достоверными данными о валовых выбросах. Расхождение оказалось значительным. Для решения поставленной задачи полученные таким способом данные в недостаточной степени досто-

верны. Делать выводы и тем более принимать решения на основе результатов, в основу которых заложены такие данные, нецелесообразно.

С 1942 по 2005 гг. (за исключением некоторых годов) в архивах сохранилась информация о количестве и марках произведенных аккумуляторов. Для периода включительно с 1985 г. есть документальные данные о количестве израсходованного в течение каждого года сырья, времени работы оборудования, валовых выбросах свинца в атмосферу, сбросов со сточными водами, образовавшихся свинцовых отходах, изменениях технологии и систем очистки. Для периода 1985-2005 гг. есть достоверные данные о валовых выбросах. Перечисленных данных достаточно для определения количества загрязняющих веществ в отходящих газовых потоках теоретическим (балансовым) и расчетно-аналитическим (инструментальным) методами.

В ходе работы над схемой материально-сырьевого баланса была исследована система вытяжной вентиляции в цехах завода. Инвентаризация источников выбросов для периода с 1985 г. по 2005 г. проводилась методами инструментальных замеров параллельно с балансово-сырьевыми расчетами. Все метрологические исследования в ходе инвентаризации проводились силами аттестованной центральной заводской лаборатории при методической и кадровой помощи работников лабораторий ФГУЗ г. Комсомольска-на-Амуре. Метрологическими методами определялись количественные характеристики газовой смеси и концентрации выбросов свинца от технологических источников основного производства до и после очистных устройств. Отбор проб воздуха проводился из вытяжных шахт на крыше после выхода ГВС из вентиляционных систем. Для определения эффективности работы пылеочистного оборудования измерения проводились одновременно до и после очистных устройств. Время отбора проб выбиралось с учетом цикличности работы технологического оборудования. Длительность отбора проб составляла 5, 10, 30 мин в зависимости от диапазона концентрации. Центральная заводская лаборатория производит регулярные замеры свинца в промышленных стоках предприятия.

На основании теоретических и экспериментальных исследований технологии производства был составлен материальный баланс, в котором определено количество исходных, промежуточных и получающихся в процессе производства конечных продуктов, имеющих в своем составе свинец. Одновременно определен количественный и качественный состав свинца и его соединений как в исходном сырье, так и в конечном продукте. Составлено уравнение материально-сырьевого баланса. На основе подробного анализа имеющихся за период с 1985 по 2005 гг. достоверных данных для каждого года была составлена балансовая схема и выведены средние коэффициенты. Общая схема материального баланса представлена на рис. 1.



Рис. 1

**Гореликова Е.И. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ДЛЯ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ АККУМУЛЯТОРНОГО ЗАВОДА (ОАО КНААЗ)**

С помощью полученных балансовых коэффициентов для периода 1942-1984 гг. определены валовые выбросы свинца в атмосферу с учетом применения газоочистного оборудования, исходя из известного количества произведенных аккумуляторов, израсходованного сырья, времени работы оборудования. В итоге получена общая картина объемов производства КнаАЗ, валовых выбросов свинца в атмосферу, его сбросов в водные объекты со сточными водами и т.д. за более чем 60-летний период работы предприятия. На рис. 2 – 4 представлена динамика количества ежегодно использованного сырья, времени работы технологического оборудования (и связанных с технологическим оборудованием систем очистки и вентиляции), а также количества ежегодно производимых аккумуляторов.

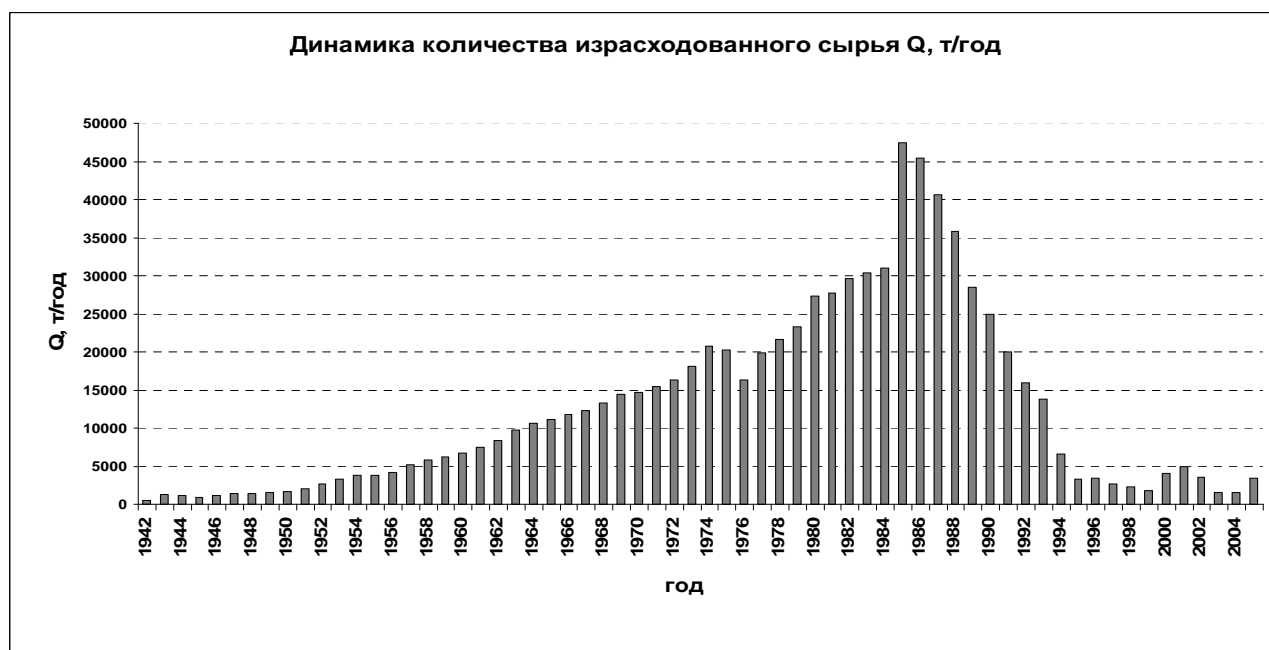


Рис. 2



Рис. 3



Рис. 4

Как видно из графиков, пик объема производства приходится на середину 80-х гг. В это время страна находилась в состоянии «холодной войны», шла война в Афганистане, поэтому велась политика активного вооружения. Финансирование заказов Министерства обороны было приоритетным для государства. Более половины продукции Комсомольского аккумуляторного завода поставлялось по государственным контрактам. Постоянными заказчиками стали помимо Министерства обороны Федеральная пограничная служба, Министерство внутренних дел, МЧС, Газпром, "КамАЗ", "УАЗ", "УралАЗ" и др. Предприятие работало на полную мощность. В этот же период началась перестройка в стране и, как следствие, экономическая нестабильность. С 1985 г. по 1990 г. на заводе постепенно была демонтирована часть технологического оборудования. Объемы производства стали сокращаться. В 2005 г. КнААЗ выпустил порядка 250 тыс. аккумуляторов разных марок, что в 12 раз меньше по сравнению с 1985 г. Соответственно, уменьшались и выбросы свинца в атмосферу города. На рис. 5 представлена динамика изменения валовых выбросов за весь период существования предприятия.



Рис. 5

Объем производства, как мы уже сказали, с 1985 к 2005 гг. снизился в 12 раз. Объемы же валовых выбросов сократились в 30 раз: с 26, 2 т/год в 1985 г. до 0,88 т/год в 2005 г.

## Гореликова Е.И. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ДЛЯ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ АККУМУЛЯТОРНОГО ЗАВОДА (ОАО КНААЗ)

Дальнейшее исследование показало, что снижение выбросов помимо снижения объемов производства обусловлено модернизацией технологического оборудования и систем очистки.

График показывает, что в 1985 г. валовые выбросы в атмосферу стали стабильно снижаться. Именно в этом году высокотемпературные карусельные автоматы на заводе были заменены автоматами отливки токоотводов «УСОТ». Отливка токоотводов стала производиться при более низких температурах, что позволило значительно снизить выброс свинцовых аэрозолей в атмосферу. В 1990 г. система, обслуживающая котлы разогрева мастики УСД ЛИОТ, была заменена на гидрофильтр, внедрены четыре экспериментальных автомата отливки токоотводов «Агат», что позволило снизить расход свинца и, соответственно, его выброс. В 1991 г. на семи вентиляционных установках УСД ЛИОТ была установлена система «Ротоклон». В 1992 г. такую замену произвели еще на пяти вентиляционных установках. В феврале 1993 г. на заводе введены в действие три мельницы «Хлорайд-8» и установлены фильтры «Пэктекон-4» с коэффициентом очистки  $K = 0,99$ . В 1993-1994 гг. на четырех вентиляционных установках были установлены двойные ступени очистки: ДП-10 + «Ротоклон», а в 1995 г. подобную замену произвели еще на трех установках.

В 1995 г. был введен в эксплуатацию цех по производству пластмассовых изделий - моноблоков для аккумуляторов, что также позволило снизить расход свинца за счет применения точечной пайки на этапе сборки аккумуляторных батарей. В 1998 г. были установлены два новых газовых сушила отформованных пластин, которые по 2001 г. обслуживались одной вентиляционной установкой, а с 2002 г. для их обслуживания установили двухступенчатую очистку ДП-10 + «Ротоклон». В 2003 г. был произведен полный монтаж вытяжной вентиляции от процесса формовки прутков.

Сама по себе динамика валовых выбросов в какой-то мере характеризует изменение экологической ситуации на прилегающей к предприятию территории, но явно недостаточна для суждения об опасности. Задачей следующего этапа было проведение расчета концентраций в атмосферном воздухе свинца, выбрасываемого КнаАЗ в соответствии с ОНД-86.

На этапе нахождения всех необходимых параметров и характеристик при моделировании предприятия для каждого года столкнулись с проблемой отсутствия данных о максимально разовых выбросах каждого отдельного источника за период 1942-1984 гг. Для того же периода, в который отсутствовали данные о валовых выбросах. Разумеется, измерений концентраций свинца в исходящих газах в этот период не проводилось.

На рассматриваемом предприятии более двадцати источников выбросов свинца в атмосферу. Все являются организованными и с 1985 г. оборудованы пылеулавливающими системами. Согласно архивным данным, начиная с 1953 и до 1985 гг., значительных изменений технологического процесса, оборудования и вентиляционных систем не производилось. Поэтому нами сделано допущение, что технические параметры и характеристики источников выброса для периода 1942-1984 гг. оставались такими же, как и в 1985 г., кроме мощности (г/с) отдельных источников выбросов. Не менялось также местоположение источников выбросов на территории промышленной площадки предприятия.

Так как объемы производства, а следовательно, и интенсивность работы технологического оборудования менялись, соответственно ежегодно изменялась и средняя мощность каждого источника выбросов. Чтобы определить мощность выброса каждого источника при отсутствии документальной информации о выбросах был разработан расчётный метод. Этот метод позволяет определить среднегодовую мощность выбросов каждого источника, при известном времени работы оборудования и валовых выбросах предприятия. Это возможно, если есть документальные данные о мощности выбросов отдельных источников хотя бы за один год. Этот метод применим для исследования в ретроспективе других предприятий. Рассмотрим суть этого метода.

На предыдущем этапе методом материально-сырьевого баланса были определены валовые выбросы  $M_i$  (т/г) и время работы оборудования  $T_i$  (ч/г) за все годы работы предприятия. Между временем работы оборудования и валовым выбросом загрязняющих веществ

существует прямая зависимость. За каждый час работы оборудования может выделиться определенное количество вещества в зависимости от технологии производства, применяемых материалов, сырья и других факторов. Если известно время работы оборудования за год, то валовый выброс загрязняющего вещества составит:

$$M_i = X * T_i,$$

где  $M_i$  – валовый выброс предприятия в  $i$ -м году, т/год;  $X$  – количество выброшенного вещества, т/ч;  $T_i$  – время работы оборудования в  $i$ -м году, ч/год.

Очевидно, что можно найти среднегодовую суммарную мощность выбросов вещества от всего предприятия по следующей формуле:

$$G_{\text{сум}i} = \frac{M_i * 10^6}{T_i * 3600},$$

где  $G_{\text{сум}i}$  – среднегодовая суммарная мощность предприятия в  $i$ -м году, т/год;  $M_i$  – валовый выброс предприятия в  $i$ -м году, т/год;  $T_i$  – время работы оборудования в  $i$ -м году, ч/год;  $10^6$  – коэффициент перевода тонн в граммы; 3600 – коэффициент перевода часов в секунды.

Таким способом были найдены значения среднегодовой суммарной мощности условного источника выбросов для каждого года за период 1942-1984 гг., а также скорости и диаметры этого условного источника. Динамика среднегодовой суммарной мощности за весь период существования предприятия показана на рис. 6.



Рис. 6

На рис. 7 изображена схема зоны предприятия, имеющего несколько организованных источников выбросов в атмосферу. Всю зону предприятия можно условно представить как суммарный источник выброса. Каждый источник имеет отличные от других параметры выбросов: мощность, скорость ГВС, диаметр. Тогда найденная нами ранее среднегодовая суммарная мощность  $G_{\text{сум}i}$  предприятия представляет собой мощность условного источника, через который происходит валовый выброс предприятия  $G_{\text{сум}i}$ . Эта мощность равна сумме мощностей отдельных источников выбросов предприятия:

$$G_{\text{сум}i} = G_{i1} + G_{i2} + G_{i3} + \dots + G_{in},$$

где  $G_{\text{сум}i}$  – среднегодовая суммарная мощность предприятия в  $i$ -м году, т/год;  $G_{in}$  – мощность  $n$ -го источника в  $i$ -м году, г/с.

Суммарный источник будет характеризоваться параметрами, которые представляют собой сумму параметров всех источников выбросов предприятия.

Диаметр суммарного источника выбросов будет равен:

$$D_{\text{сум}} = D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n,$$

$$D_{\text{сум}} = \sum_{n=1}^m D_n,$$

где  $D_{\text{сум}}$  – суммарный диаметр условного источника выбросов, м;  $D_1, D_2, D_3, D_n$  – соответственно диаметры источников выбросов, м;  $n$  – номер источника выбросов;  $m$  – число источников выбросов.

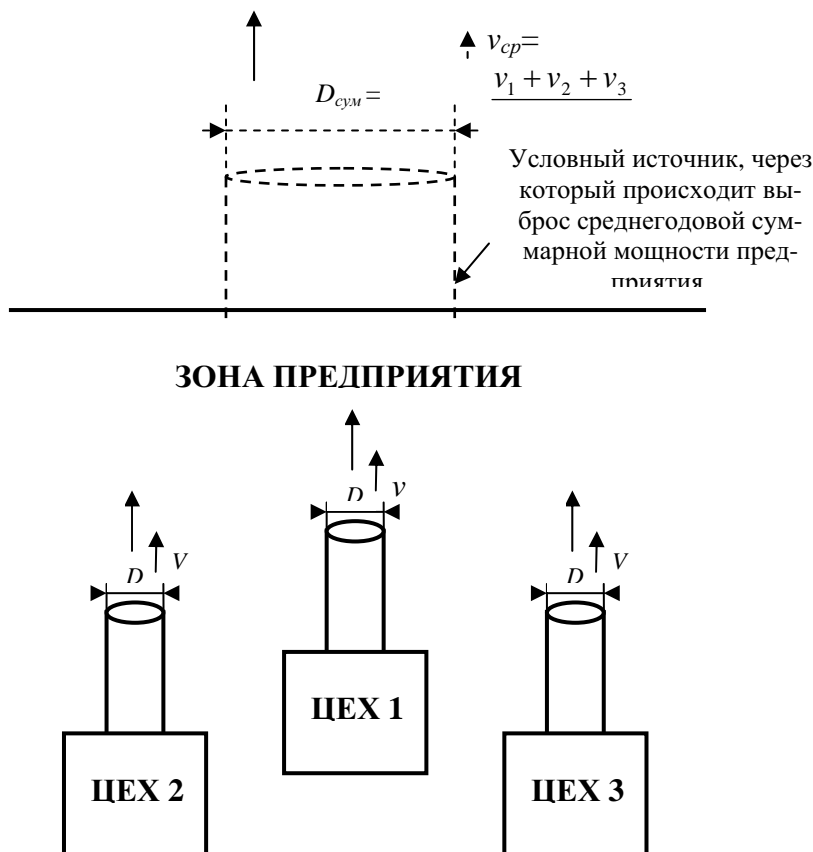


Рис. 7

Тогда скорость выброса ГВС, выходящей из условного суммарного источника выбросов всего предприятия, будет представлять собой среднюю скорость от всех источников:

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_1 + v_2 + v_3}{3},$$

$$v_{\text{ср}} = \frac{\sum_{n=1}^m v_n}{m},$$

где  $v_{\text{ср}}$  – средняя скорость ГВС условного суммарного источника выбросов, м/с;  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$  – скорость ГВС источников выбросов, м/с;  $n$  – номер источника выбросов;  $m$  – число источников выбросов.

С помощью программы «Эколог-3.0» было произведено 42 варианта расчета рассеивания свинца в атмосферном воздухе от КнаАЗ для периода 1942-1984 гг. При этом предприятие моделировалось в виде рассмотренного выше условного источника выбросов с соответствующими расчетными параметрами:  $G_{\text{сум } i}$ ,  $D_{\text{сум}}$ ,  $V_{\text{ср}}$ . Остальные параметры были взяты аналогично 1985 г. (правомерность этого была рассмотрена выше).

С целью проверки расчет рассеивания для каждого года периода 1985-2005 гг. производился дважды (42 варианта расчета). В первом случае предприятие моделировалось в виде условного источника выбросов с параметрами:  $G_{\text{сум } i}$ ,  $D_{\text{сум}}$ ,  $V_{\text{ср}}$ . Во втором случае расчет рас-

сеивания производился на основе реальных параметров и характеристик каждого источника выбросов.

Сравнение полученных полей концентраций двух вариантов расчета для периода 1985-2005 гг. показало значительное расхождение в размерах зон рассеивания. На рис. 8 для примера показаны поля концентраций для двух годов: а) при моделировании предприятия как расчетного условного источника, б) при моделировании по реальным данным о каждом источнике выбросов.

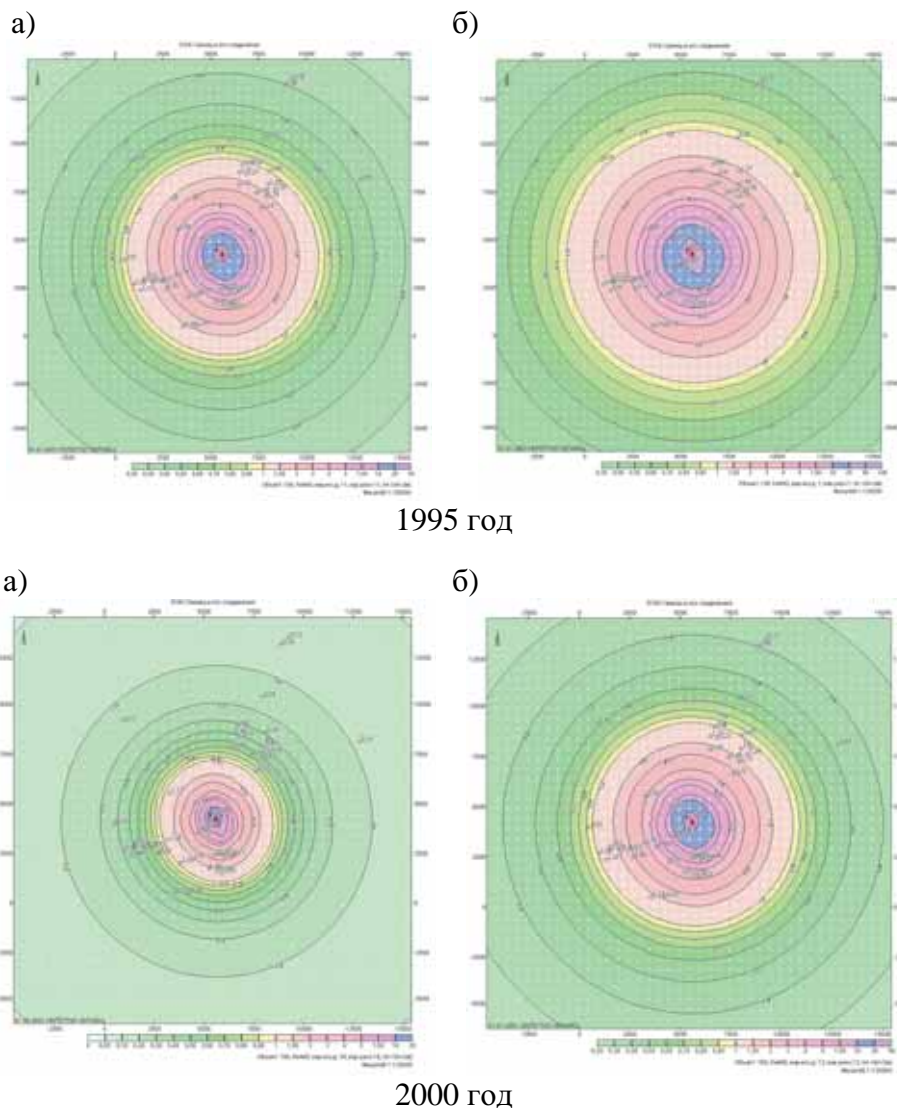


Рис. 8

Как видно из рис. 8, расхождение в результатах, полученных на основе реальных и расчетных данных о мощности, значительное – порядка 2-4 км. Поэтому следующим этапом было распределение среднегодовой суммарной мощности  $G_{\text{сум } i}$  условного суммарного источника выбросов предприятия между реальными источниками выбросов.

Среднегодовая суммарная мощность  $G_{\text{сум } i}$  предприятия равна сумме мощностей отдельных источников выбросов предприятия:

$$G_{\text{сум } i} = G_{i1} + G_{i2} + G_{i3} + \dots + G_{in},$$

где  $G_{\text{сум } i}$  – среднегодовая суммарная мощность предприятия в  $i$ -м году, т/год;  $G_{in}$  – мощность  $n$ -го источника в  $i$ -м году, г/с.

Мощности отдельных источников неодинаковы, поэтому их нельзя найти просто делением  $G_{\text{сум } i}$  на количество реальных источников выбросов в атмосфере.

**Гореликова Е.И. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ДЛЯ РЕТРОСПЕКТИВНОГО АНАЛИЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ АККУМУЛЯТОРНОГО ЗАВОДА (ОАО КНААЗ)**

При увеличении диаметра скорость ГВС будет снижаться, и, следовательно, будет уменьшаться мощность выброса вещества. При уменьшении диаметра скорость снизится, и мощность будет значительно больше. В связи с этим при распределении  $G_{\text{сум } i}$  между реальными источниками выбросов необходимо ввести коэффициенты, которые бы учитывали влияние на мощность выброса каждого источника диаметра трубы и скорости выхода ГВС из устья.

Определим долю вклада диаметра  $n$ -го источника в суммарный диаметр  $D_{\text{сум}}$  условного источника выбросов предприятия:

$$D_{\text{сум}} = 100 \%, \quad D_n = x \%,$$

$$X = \frac{D_n * 100 \%}{D_{\text{сум}}},$$

где  $D_{\text{сум}}$  – суммарный диаметр условного источника выбросов, м;  $D_1, D_2, D_3, D_n$  – соответственно диаметры источников выбросов, м;  $n$  – номер источника выбросов;  $X$  – доля вклада диаметра  $n$ -го источника в суммарный диаметр, %.

Коэффициент пересчета мощности источника с учётом диаметра этого источника  $K_{Dn}$  будет иметь вид:

$$K_{Dn} = X/100 \%$$

или

$$K_{Dn} = \frac{D_n}{D_{\text{сум}}}.$$

При увеличении скорости выброса мощность выброса при постоянном диаметре пропорционально увеличивается. Поэтому следует ввести коэффициент учёта скорости источника  $K_{Vn}$ . Он будет равен отношению скорости  $n$ -го источника  $V_n$  к средней скорости всех источников базового года  $V_{\text{ср}}$ :

$$K_{Vn} = \frac{v_n}{v_{\text{ср}}}.$$

Тогда формула расчета мощности  $n$ -го источника в каждом  $i$ -м году будет выглядеть следующим образом:

$$G_{in} = G_{\text{сум } i} * K_{Dn} * K_{Vn},$$

где  $G_{in}$  – мощность  $n$ -го источника в  $i$ -м году, г/с;  $G_{\text{сум } i}$  – суммарная мощность предприятия за  $i$ -й год, г/с;  $K_{Dn}$  – коэффициент учёта диаметра источника;  $K_{Vn}$  – коэффициент учёта скорости ГВС источника.

Таким методом были найдены мощности выбросов отдельных источников для периода 1942-1984 гг. При этом количество источников и их параметры были взяты аналогично 1985 г. (правомерность этого была рассмотрена выше).

Проверка этого метода по годам, для которых есть все достоверные данные о мощности каждого источника выбросов, показала погрешность определения мощности каждого источника таким способом, равную 1-3 %.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ясенский, Н. А. Применение удельных показателей выбросов загрязняющих веществ на единицу продукции в системе государственного учёта вредных воздействий на атмосферный воздух / Н. А. Ясенский, Н. А. Масленникова, Л. В. Кашлева // Научные труды НИИ Атмосфера. – 1998. – С. 41-48.
2. Буренин, Н. С. О развитии нормативно-правовой базы по техническим нормативам выбросов / Н. С. Буренин, А. Ф. Губанов, А. С. Турбин // Научные труды НИИ Атмосфера. – 2002.
3. Дьяконов, К. Н. Экологическое проектирование и экспертиза: учеб. для вузов / К. Н. Дьяконов, А. В. Дончева. – М.: Аспект Пресс, 2002. – 384 с.
4. Экологическая экспертиза: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В. К. Донченко, В. М. Питулько, В. В. Растоскуев [и др.] ; под ред. В. М. Питулько. – М.: Академия, 2004. – 480 с.



Степанов А.Н.  
Stepanov A.N.

## РАСЧЕТ ТОКА СМЕЩЕНИЯ ЧЕРЕЗ ТЕЛО ЧЕЛОВЕКА

## CALCULATION OF DISPLACEMENT CURRENTS GOING THROUGH A HUMAN BODY

**Степанов Анатолий Николаевич** – кандидат технических наук, профессор, декан электротехнического факультета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail Prof.Stepanova@mail.ru

**Anatoly N.Stepanov** – PhD in Engineering, Professor, Dean of the Electro-technical Engineering Faculty, State Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail [Prof.Stepanova@mail.ru](mailto:Prof.Stepanova@mail.ru)

**Аннотация.** В работе на основании решения уравнений поля получено достаточно простое аналитическое выражение для расчета тока смещения через тело человека как функция параметров провода. Оно может быть использовано для дополнительной проверки уровня электромагнитной безопасности человека. Дана количественная оценка влияния человека на величину электрического поля при его вхождении в это поле. Приведен расчет напряженности на основании решения уравнений поля и показано, что на разных участках тела человека она может принимать значения, существенно отличающиеся как друг от друга, так и от величины напряженности неискаженного поля. С учетом этого сделан вывод, что для обеспечения электромагнитной безопасности необходимо дополнительно к обычно применяемым критериям проводить проверку величины токов смещения, протекающих через тело человека.

**Summary:** The paper presents a rather simple analytic expression for calculating displacement currents going through a human body as the function of the conductor properties, on the basis of the solution of field equations. This expression can be also used for additional checks of the level of electromagnetic safety of humans. Proposed is a quantitative estimate of the impact of a human body upon the value of the electric field when a person enters the field. Presented is a calculation of the intensity based upon the solution of field equations, also shown is that on different areas of a human body the intensity may obtain values significantly differing from each other and from the intensity value of a non-disturbed field. Following from this, a conclusion is made that, apart from normally applied criteria, to ensure electromagnetic safety it is necessary to additionally check the values of displacement currents going through a human body.

**Ключевые слова:** токи смещения, электрическое поле, электромагнитная безопасность, уравнения поля, новые критерии безопасности.

**Key-words:** displacement currents, electric field, electromagnetic safety, field equations, new safety criteria

УДК 504.06:537

При определении токов смещения, протекающих через человека между высоковольтным проводом и землей, пользуются различными приближенными выражениями, в которые, как правило, входит неискаженное значение напряженности электрического поля. Однако при вхождении человека в электрическое поле происходит существенное искажение этого поля, особенно около человека. Более того, даже при проведении инструментального контроля, измерить неискаженное значение напряженности поля достаточно сложно. Поэтому в данной работе сделана попытка тока смещения путем численного расчета электрического поля, создаваемого высоковольтным проводом при нахождении под проводом человека.

Прежде чем проводить численный расчет, определим размеры расчетной области. Размеры области будем определять таким образом, чтобы на ее границах влияние человека практически не влияло на расчетную величину. Для этого рассмотрим следующую модельную задачу. Пусть на проводящей плоскости имеется выступ в форме полуцилиндра радиуса  $R$  и неограниченной длины. Параллельно оси цилиндрического выступа на расстоянии  $H$  от нее расположена нить с зарядом  $\tau$  на единицу длины (см. рис. 1). Необходимо определить электрическое поле. Данную задачу можно решать либо методом разделения переменных в биполярных координатах, либо методом изображений [1].

Поскольку метод изображений проще, то в работе использован этот метод. Отобразженные провода и их заряды показаны на рис. 1. Расстояние  $h_1$  определяется следующим образом:  $h_1 = R^2/H$ .

При таком распределении заряженных проводов потенциал в произвольной точке  $P$  над плоскостью с выступом будет

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left[ \ln \frac{r_4}{r_1} + \ln \frac{r_2}{r_3} \right],$$

где  $r_i$  – расстояние между соответствующим проводом и точкой  $P$ .

Из последнего выражения видно, что влияние выступа на поле определяется вторым слагаемым в квадратных скобках.

Расчет поля для модельной задачи проводился при следующих условиях:  $\tau = 2\pi\epsilon_0$ ;  $R = 1.8$  м;  $H = 5R$ .

Результаты расчета представлены на рис. 2 в виде распределения потенциалов  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  вдоль оси  $OX$  на высоте  $H_1 = 3R$ , где потенциалы определены по следующим выражениям:

$$\varphi_1(x) = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left[ \ln \frac{(H + H_1)^2 + x^2}{(H - H_1)^2 + x^2} + \ln \frac{(H - h_1)^2 + x^2}{(H + h_1)^2 + x^2} \right];$$

$$\varphi_2(x) = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left[ \ln \frac{(H + H_1)^2 + x^2}{(H - H_1)^2 + x^2} \right]; \quad \varphi_3(x) = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left[ \ln \frac{(H - h_1)^2 + x^2}{(H + h_1)^2 + x^2} \right].$$

Как видно из рис. 2 влияние выступа на электрическое поле сказывается даже на высоте, равной тройной высоте выступа. Для более наглядного представления о количественном влиянии выступа на рис. 3 показано распределение в процентах значения  $\varphi_3$  относительно  $\varphi_2$  ( $d\varphi = \varphi_3 * 100/\varphi_2$ ).

Из анализа данного рисунка можно сделать вывод о том, что хотя  $d\varphi$  распределяется вдоль оси  $OX$  и не равномерно, однако оно не превышает 10 %.

На рис. 4 и рис. 5 представлены распределения потенциалов  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  и  $d\varphi$  вдоль оси  $OY$  при  $x = x_1 = 3R$ .

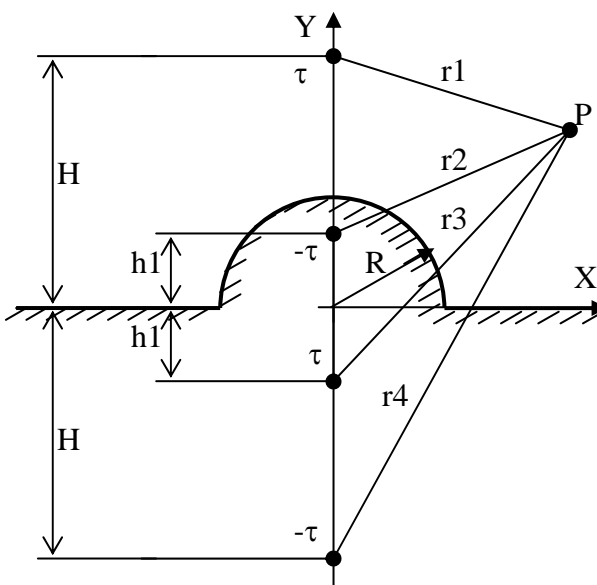


Рис. 1

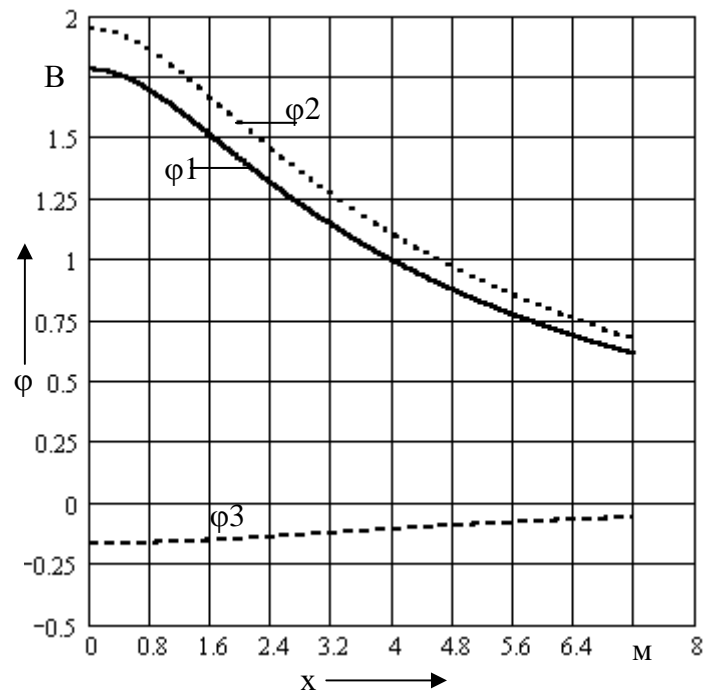


Рис. 2

Потенциалы при этом определялись с помощью следующих выражений:

$$\varphi_1(y) = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left[ \ln \frac{(H+y)^2 + x^2}{(H-y)^2 + x^2} + \ln \frac{(y-h_1)^2 + x^2}{(y+h_1)^2 + x^2} \right];$$

$$\varphi_2(y) = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left[ \ln \frac{(H+y)^2 + x^2}{(H-y)^2 + x^2} \right]; \quad \varphi_3(y) = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left[ \ln \frac{(y-h_1)^2 + x^2}{(y+h_1)^2 + x^2} \right].$$

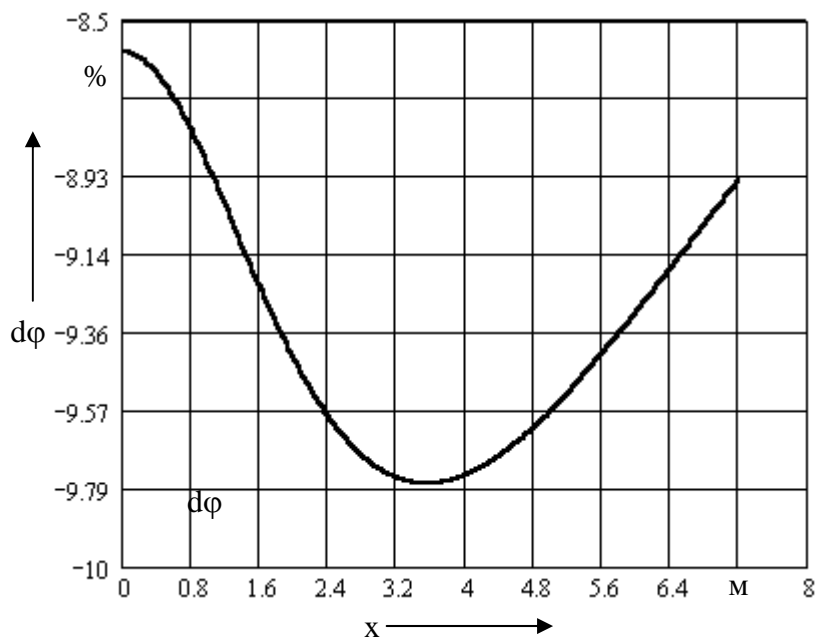


Рис. 3

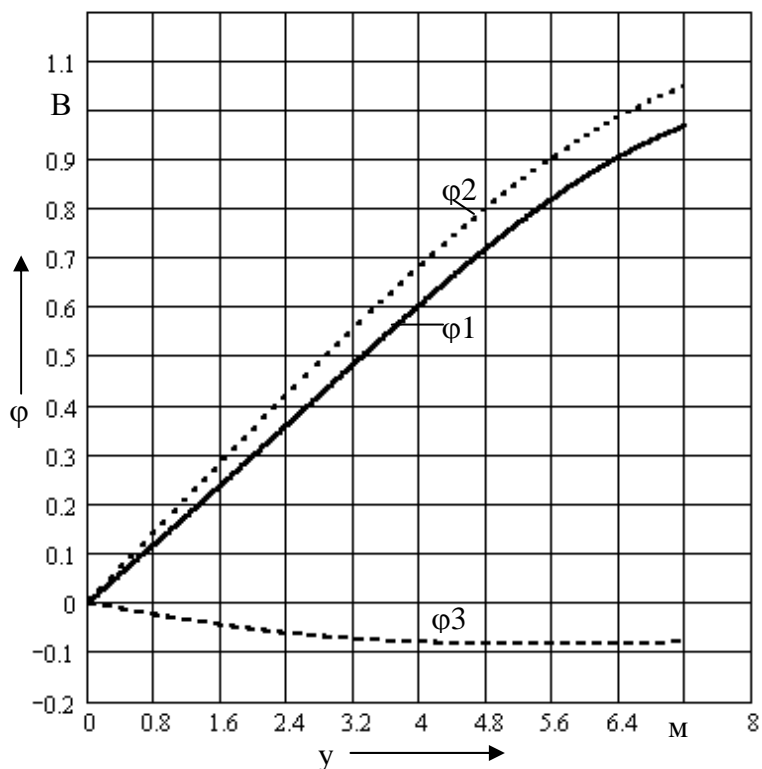


Рис. 4

Как видно из рис. 4, характер изменения потенциалов без выступа ( $\varphi_2$ ) и с учетом выступа ( $\varphi_3$ ) примерно одинаков. Однако в данном случае влияние выступа более заметно (см. рис. 5) и значение  $d\varphi$  может достигать в нижней части области 17.3 %.

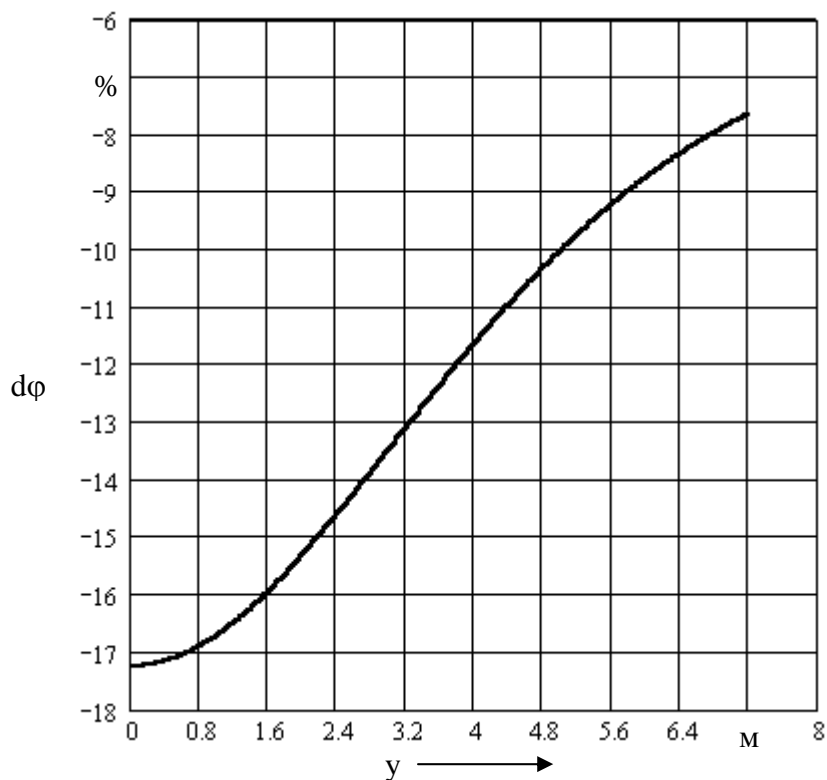


Рис. 5

Поскольку размеры человека существенно меньше размеров выступа, то и его влияние на поле провода будет меньше. Поэтому при расчете электрического поля с учетом влияния человека размеры расчетной области можно принять равными утроенной высоте человека (5.4 м), задавая на границах области значение потенциала, определенного из расчета поля одиночного провода, подвешенного над землей. Форму расчетной области примем в виде куба ( $H_1 = H_2 = H_3$ ) (см. рис. 6). При этом прямоугольным параллелепипедом T1OS1R1TPRS будем моделировать человека. В качестве размеров человека примем следующие размеры:  $2b_1 = 0.4$  м;  $2b_2 = 0.4$  м;  $h_q = 1.8$  м.

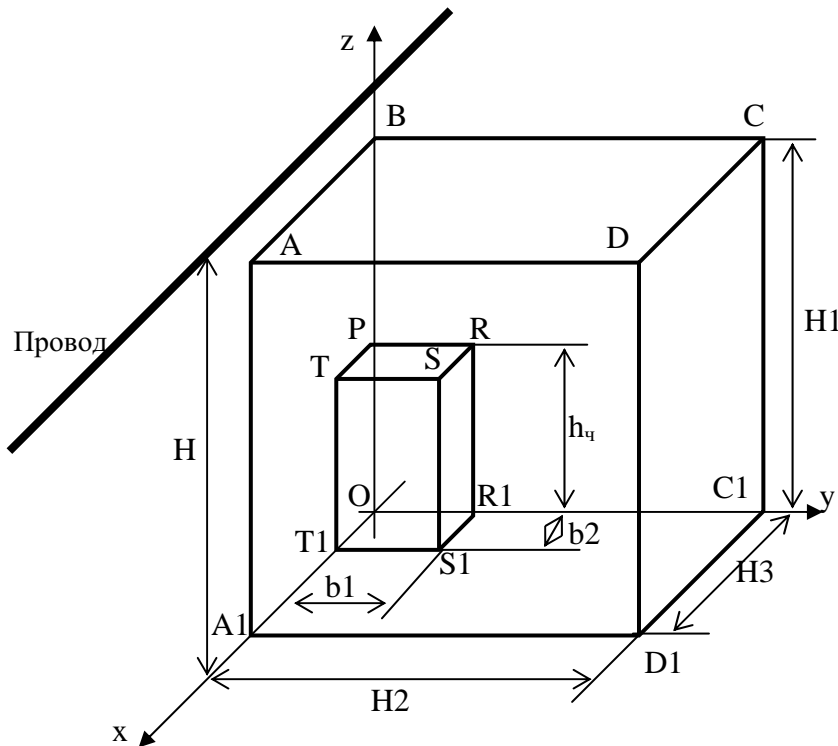


Рис. 6

Расчет электрического поля будем проводить путем численного решения уравнения Лапласа в прямоугольной системе координат

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0.$$

На гранях A1ADD1, D1DCC1, ABCD будем принимать значения потенциалов, определенных по формулам

$$\varphi = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left[ \ln \frac{(H+z)^2 + y^2}{(H-z)^2 + y^2} \right]; \quad \varphi = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left[ \ln \frac{(H+z)^2 + H_2^2}{(H-z)^2 + H_2^2} \right];$$

$$\varphi = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left[ \ln \frac{(H+H_1)^2 + y^2}{(H-H_1)^2 + y^2} \right].$$

На нижней грани A1OC1D1, а также на гранях, ограничивающих модель человека, принимаются нулевые условия. На гранях A1ABO и OBCC1 принимаются условия симметрии.

В качестве линейной плотности заряда провода  $\tau$  принимался заряд, определяемый по следующему выражению:

$$\tau = \frac{2U_0\pi\epsilon_0}{\ln\left[\frac{H}{R} + \sqrt{\left(\frac{H}{R}\right)^2 - 1}\right]},$$

где  $R$  – радиус провода;  $U_0$  – напряжение провода относительно земли (фазное напряжение).

В качестве численного метода был выбран метод конечных разностей с равномерной сеткой (шаг сетки принимался равным 0.02 м). При этом значение потенциала для  $n + 1$  итерации в центральном узле сетки определялось по формуле

$$\varphi_{i,k,m}^{n+1} = W \cdot F + (1 - W)\varphi_{i,k,m}^n,$$

где  $i, k, m$  – узел сетки;  $W$  – ускоряющий множитель (принят равным 1.95);  $F$  – значение потенциала, вычисленное с помощью уравнения:

$$F = \frac{\varphi_{i-1,k,m}^n + \varphi_{i+1,k,m}^n + \varphi_{i,k-1,m}^n + \varphi_{i,k+1,m}^n + \varphi_{i,k,m-1}^n + \varphi_{i,k,m+1}^n}{6}.$$

После определения потенциала проводился расчет величины заряда, индуцируемого на поверхности человека, и находилось значение емкости человека относительно провода при разной высоте подвеса провода над землей. Результаты расчета представлены на рис. 7 в виде зависимости относительного значения емкости человека от высоты подвеса провода:

$$C_{\text{чo}}(H) = \frac{C_{\text{ч}}(H)}{C_{\text{пр}}(H)}.$$

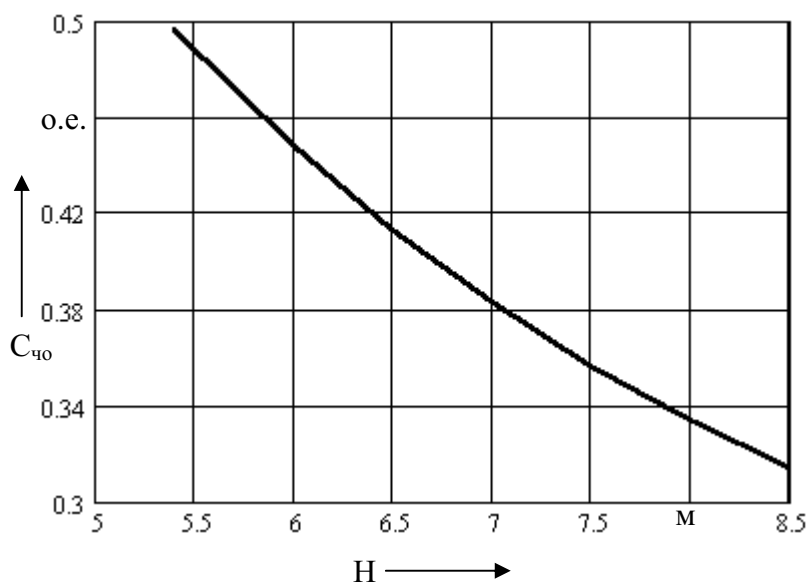


Рис. 7

При этом в качестве базисного значения емкости принималось значение емкости провода на единицу длины, которое определялось по формуле

$$C_{\text{пр}}(H) = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left[\frac{H}{R} + \sqrt{\left(\frac{H}{R}\right)^2 - 1}\right]}.$$

Аппроксимируем функцию  $C_{\text{чo}}(H)$  полиномом третьей степени

$$C_{\text{ча}}(H) = 0.008H^2 - 0.169H + 1.174.$$

График изменения данной функции практически полностью совпадает с графиком функции  $C_{\text{ч0}}(H)$ , представленном на рис. 7. На рис. 8 показано изменение относительной погрешности аппроксимации  $dc$  в зависимости от высоты подвеса провода. Как видно из рисунка, относительная погрешность при данном изменении высоты подвеса не превышает  $\pm 0.5\%$ .

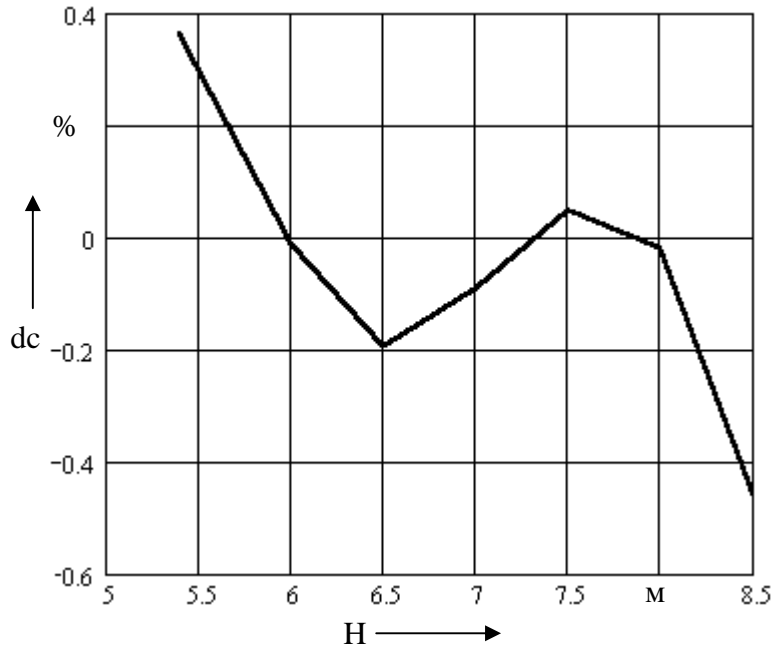


Рис. 8

С учетом этого, а также с учетом того, что высота подвеса провода существенно больше радиуса провода, для определения емкости человека относительно провода с учетом влияния земли предлагается следующее выражение:

$$C_{\text{ч}}(H) = \frac{2\pi\epsilon_0(0.008H^2 - 0.169H + 1.174)}{\ln\left(\frac{2H}{R}\right)}.$$

Отметим, что если не учитывать размеров провода, то для расчета емкости можно использовать и более простую формулу

$$C_{\text{ч}}(H) = [0.088H^2 - 1.79H + 11.466] \cdot 10^{-12}.$$

Ток через человека, таким образом, рассчитывается с помощью следующего выражения:

$$I = \frac{2\pi f U_{\text{мф}} C_{\text{ч}}}{\sqrt{2}}.$$

Здесь  $U_{\text{мф}}$  – фазное напряжение;  $f$  – частота.

Для примера проведем расчет тока, протекающего через человека, который находится под проводом, подвешенным на высоте  $H = 6$  м. Пусть фазное напряжение, под которым находится провод, равно  $U_{\text{мф}} = 800000 / \sqrt{3}$  В, радиус провода  $R = 0.02$  м.

Емкость человека в этом случае будет равна  $3.894 \cdot 10^{-12}$  Ф. Таким образом, ток, стекающий в землю через человека, будет составлять следующее значение:

$$I = \frac{2\pi 50 \cdot 800000 \cdot 3.894 \cdot 10^{-12}}{\sqrt{6}} = 3.995 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$$

Таким образом, в работе получено достаточно простое аналитическое выражение для расчета тока смещения через тело человека, как функция параметров провода. Оно может быть использовано для дополнительной проверки уровня электромагнитной безопасности человека. Аналитические выражения для случая трехфазной линии будут опубликованы в следующих работах.

При нахождении человека под высоковольтными линиями передачи на него действует электрическое поле, которое может оказывать негативное влияние на здоровье. Степень отрицательного действия оценивается по величине отклонения фактического значения напряженности поля от допустимого. Нормативными документами предписывается определять неискаженное значение напряженности электрического поля.

Однако электрическое поле под воздействием человека может существенно искажаться. В связи с этим задача по определению степени влияния человека на величину напряженности электрического поля является достаточно важной.

В настоящей работе представлены некоторые результаты решения задач расчета поля, моделирующих наличие человека под высоковольтным проводом.

В начале покажем, какое влияние на напряженность поля оказывает проводящий выступ неограниченной длины, имеющий форму полуцилиндра. Полуцилиндр имеет радиус  $R = 1.8$  м и расположен на проводящей плоскости (см. рис. 9). Параллельно оси цилиндрического выступа на расстоянии  $H$  от нее расположен провод радиусом  $r$ , находящийся под напряжением  $U_0$  относительно плоскости.

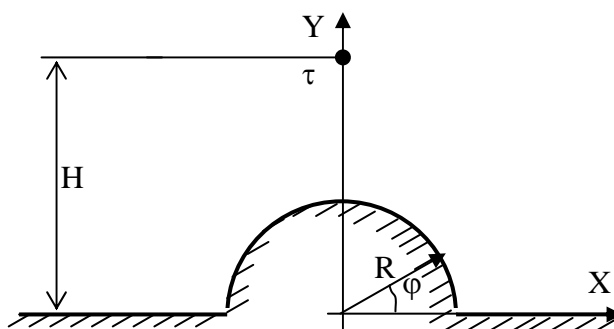


Рис. 9

В качестве линейной плотности заряда провода  $\tau$  примем линейную плотность, определяемую по следующему выражению:

$$\tau = \frac{2U_0\pi\epsilon_0}{\ln \left[ \frac{H}{r} + \sqrt{\left(\frac{H}{r}\right)^2 - 1} \right]}.$$

Решение данной задачи может быть легко получено [1] либо с помощью метода зеркальных изображений, либо методом Фурье в биполярной системе координат. В результате этого решения выявлено, что максимальное значение напряженности электрического поля имеет место в точке выступа, ближайшей к заряду, и равно следующему значению:

$$E_{\max} = \frac{2\tau H}{\pi\epsilon_0(H^2 - R^2)}.$$

Если сравнивать это максимальное значение напряженности электрического поля с напряженностью поля в той же точке для неискаженного поля (без выступа), то данное максимальное оказывается больше ровно в два раза, поскольку напряженность неискаженного поля определяется следующим выражением:

$$E = \frac{\tau H}{\pi\epsilon_0(H^2 - R^2)}.$$

Здесь линейная плотность зарядов рассчитывается по той же формуле, что и для поля с выступом. Однако следует отметить то обстоятельство, что данная формула, строго говоря, справедлива только для одиночного провода, подвешенного над проводящей плоскостью. Если же учитывать и влияние выступа на линейную плотность зарядов на проводе, то тогда  $\tau$  следует определять таким образом:

$$\tau = \frac{2\pi\epsilon_0 U_0}{\ln \left[ \frac{2H(H^2 - R^2)}{r(H^2 + R^2)} \right]}$$

В этом случае максимальное значение напряженности электрического поля несколько увеличится и, таким образом, искажающее воздействие выступа еще больше возрастет.

Поскольку человек представляет собой более «острый выступ», то и его влияние на стороннее поле может оказаться больше. Для оценки такого влияния, в работе был проведен расчет электрического поля численным методом для случая, когда под проводом расположен бесконечно длинный прямоугольный выступ (см. рис. 10). Высота выступа  $R$  была принята равной 1.8 м, а ширина  $b = 0.4$  м.

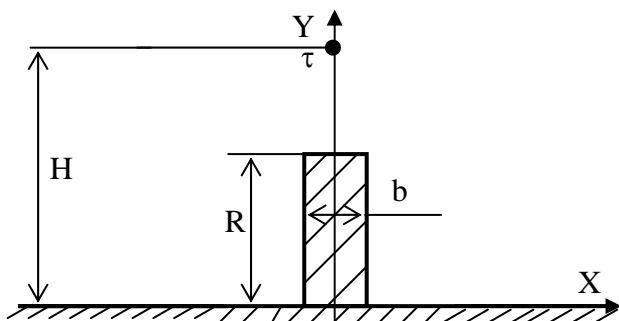


Рис. 10

В данном случае оказалось, что значение напряженности электрического поля на выступе в точке, ближайшей к заряду ( $x = 0, y = R$ ), больше напряженности неискаженного поля в этой же точке в три раза, а в точке ( $x = b/2, y = R$ ) – больше практически в восемь раз.

На графиках (см. рис. 11) представлено изменение напряженности электрического поля на высоте  $y = 1.8$  м вдоль оси  $ox$  для полукруглого (кривая 1) и прямоугольного выступа (кривая 2). Значения напряженности поля даны в относительных единицах. Причем за базисное значение принято значение напряженности неискаженного поля в соответствующих точках.

Как видно из рисунка, величина напряженности электрического поля при наличии прямоугольного выступа становится равной напряженности поля при отсутствии выступа только на расстоянии в 1 м. Что касается полукруглого выступа, то в данном случае его влияние, хотя и существенно меньше над самим выступом, сказывается на большем расстоянии от выступа.

В работе также проведен расчет поля при ограничении прямоугольного выступа в направлении оси  $oz$  расстоянием, равным  $b$ . Результаты расчета также представлены на рис. 12 в виде распределения относительного значения напряженности поля вдоль оси  $ox$  на длине, равной  $b/2$  (кривая 3). Данный график построен при  $y = R, z = 0$  (начало отчета координаты  $z$  принято от середины параллелепипеда). На этом же рисунке (для сравнения) показано изменение напряженности поля при полукруглом (кривая 1) и при прямоугольном выступе (кривая 2).

Как видно из рисунка, в данном случае искажение от прямоугольного параллелепипеда оказывается еще большим и по отношению к неискаженному полю в середине вершины выступа напряженность поля больше в 5.2 раза, а на краю выступа – в 10.8 раза.

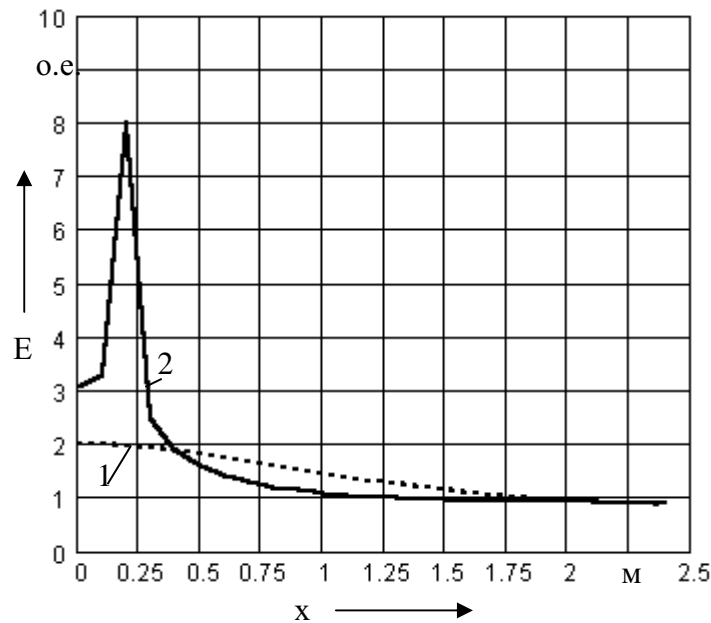


Рис. 11

Здесь следует отметить, что если поместить бесконечно длинный проводящий цилиндр в однородное поле напряженностью  $E_0$ , то максимальное значение напряженности поля на поверхности цилиндра окажется также равным  $2E_0$  (как и для полукруглого выступа в нашем случае), если же в это поле поместить проводящий шар, то максимальное значение напряженности будет равно  $3E_0$ . Таким образом, для шара максимальное значение напряженности поля по сравнению с бесконечно длинным цилиндром возрастает в 1.5 раза. Примерно такое же соотношение наблюдается и при сравнении напряженности поля на средней линии верхней грани прямоугольного параллелепипеда и бесконечно длинного прямоугольного выступа, помещенного в электрическое поле провода. Так, это соотношение в середине параллелепипеда равно 1.69, а на краю ( $x = b/2$ ) – 1.35. На крайних ребрах и, особенно, в вершинах углов искажение поля еще больше.

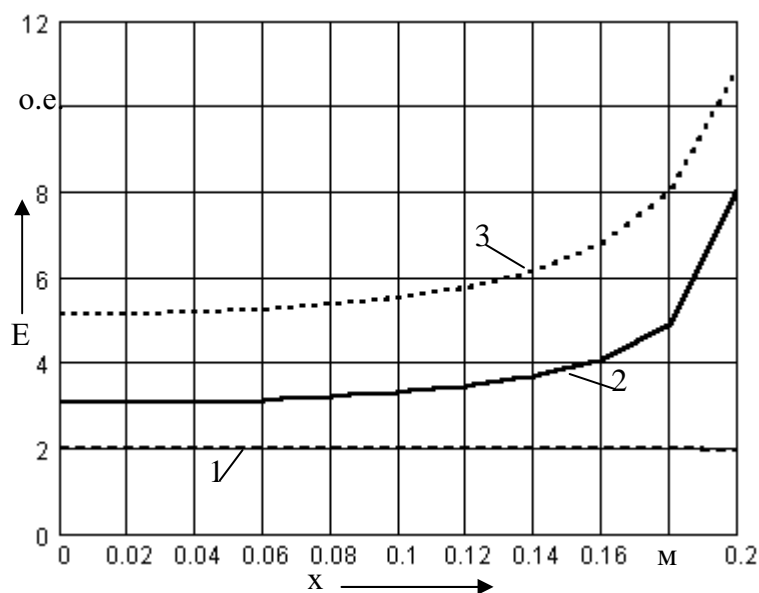


Рис. 12



Тело реального человека имеет больше «острых выступов», чем у рассмотренных расчетных моделей, поэтому можно ожидать и большего искажения поля, чем показано в модельных задачах.

Отсюда следует, что судить о влиянии электрического поля по величине неискаженного значения напряженности достаточно сложно, поскольку она сильно изменяется при вхождении человека в электрическое поле и на разных участках тела человека может принимать значения, существенно отличающиеся как друг от друга, так и от величины напряженности неискаженного поля.

Таким образом, критерий электромагнитной безопасности, базирующийся только на сопоставлении фактического и нормативного значений напряженности неискаженного электрического поля, явно недостаточен. Для обеспечения гарантированной безопасности следует дополнительно проводить проверку величины токов смещения, протекающих через тело человека.

Достаточно точные значения токов смещения можно получить только на основе решения полевых задач. Поэтому существует настоятельная потребность в разработке математических моделей, позволяющих решать подобные задачи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методы расчета электростатических полей / Н. Н. Миролюбов, М. В. Костенко, М. Л. Левинштейн, Н. Н. Тиходеев. – М.: Высш. шк., 1963. – 416 с.

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**  
**CONSTRUCTIONS AND ARCHITECTURE**

**Федосенко В. Б., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л.**  
**Fedosenko V.B., Grigoriev J.Yu., Grigorieva A.L.**

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ  
ПО ХАРАКТЕРУ И УРОВНЮ АГРЕССИВНОСТИ  
К ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

**A SYSTEM ANALYSIS OF CLIMATIC FACTORS BY THE NATURE AND LEVEL OF  
CORROSIVENESS IN RESPECT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN CONSTRUCTION**



**Федосенко Валерий Борисович** – академик Петровской академии наук и искусств, кандидат технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).  
**Mr. V.B. Fedosenko** – PhD in Engineering, Professor, member of the Peter's Academy of Arts and Sciences (Komsomolsk-on-Amur State Technical University), Russia, Komsomolsk-on-Amur,



**Григорьев Ян Юрьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jan198282@mail.ru  
**J. Yu. Grigoriev**, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor (Komsomolsk-on-Amur State. Technical. University), Russia, Komsomolsk-on-Amur. E-mail: jan198282@mail.ru



**Григорьева Анна Леонидовна** – кандидат физико-математических наук, доцент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jan198282@mail.ru  
**A.L. Grigoriev**, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor (Komsomolsk-on-Amur State. Technical. University), Russia, Komsomolsk-on-Amur. E-mail: jan198282@mail.ru

**Аннотация.** Исследование влияния климатических условий на производство строительномонтажных работ (СМР) является важным фактором для принятия организационно-технологических решений и повышения эффективности строительства в регионах с экстремальными климатическими условиями. Особенно это необходимо в СМР, выполняемых зимой, что нашло отражение в данной статье.

**Summary:** The impact of climatic conditions on building and assembly operations is an important factor for managerial and technological solutions and improvement of the efficiency of civil engineering works in regions with a severe climate. This is particularly important for building-and-assembly operations performed in winter time.

**Ключевые слова:** строительномонтажные работы, тепловой баланс, климатическая область.

**Key words:** construction and assembly, heat balance, climatic region.



УДК 338.45:69(571.62)

В технологическом проектировании традиционно учитываются экстремальные значения отрицательных температур, усугубленных силой ветра. На стадии разработки зимних технологий решается проблема защиты технологии от агрессии климата.

Определяющими особенностями производства технологических процессов в зимнее время являются:

- способность воды замерзать при температуре ниже +4 °С, что накладывает серьезные ограничения на производство “мокрых” процессов (технологий, в которых одной из компонент используется вода);

- возникновение дефицита теплового баланса при наборе прочности бетоном и раствором;

- искажение параметров адвективного теплового переноса, накладывающего серьезные ограничения на ход “мокрых” процессов;

- временное или, в отдельных случаях, полная потеря эластичности и других свойств материалов, используемых при отрицательных температурах.

Основные ограничения по температурным режимам технологических процессов приведены в нормативах (СНиПах) и носят обязательный характер.

В основу технологического проектирования положен принцип поддержания определенного теплового баланса между конструкционным телом и температурным полем наружной среды, между которыми происходит нестационарный теплообмен в том или ином направлении. Очевидно, что интенсивность теплообмена будет зависеть от температурного градиента, который будет определяться начальными значениями температур конструкций и внешней среды (температура наружного воздуха). Протекание данного процесса будет определяться степенью защищенности конструкционного тела от агрессии внешней среды. С другой стороны, ввиду неизбежности тепловых потерь, зимними технологиями должны быть предусмотрены мероприятия, направленные на восполнение тепловых потерь до определенного уровня, определяемого технологией рассматриваемой работы.

Таким образом, можно предположить, что основным источником агрессии климатического фактора к технологическим процессам являются экстремальные значения отрицательных температур.

Однако процесс теплового переноса также зависит от параметров ветрового потока, который можно рассматривать как некий механизм теплообмена между конструкциями и внешней средой.

С позиций метеорологии – температура, атмосферное давление, влажность воздуха и параметры ветрового потока взаимосвязаны и являются участниками динамически изменяемой метеорологической обстановки. Решение этой проблемы – важнейшая задача климатологии и метеорологии и поэтому в контексте данной работы рассматриваться не будет.

Общезвестен факт, что параметры ветрового и температурного поля, даже в условиях одной, конкретной стройплощадки, изменяются в достаточно широких пределах.

Изменчивость климатических параметров, в первую очередь, будут обуславливаться отметкой положения рабочего (монтажного) горизонта; общеизвестно, что с увеличением высоты строящегося здания скоростные параметры ветрового потока будут возрастать и соответственно увеличиваться тепловые потери.

Ветровой поток, помимо его участия в теплообмене, оказывает непосредственно динамические нагрузки на конструкции, монтируемые элементы и механизмы, которые обладают определенной парусностью.

Ветровые нагрузки на монтируемые элементы могут вызвать неуправляемое процессирование монтажного элемента в пространстве, например раскачивание, галопирование, вибрирование, которые затрудняют при достижении определенных максимумов процесс монтажа.

Воздействие ветровых нагрузок на грузоподъемные или другие механизмы, обладающие высокой парусностью, может привести к потере устойчивости механизмов, что, в свою очередь, может послужить причиной аварий, которые создают угрозу жизни и здоровью участников трудовых процессов.

Таким образом, при достижении определенных скоростей ветра, например 15 м/с или 10 м/с для большеразмерных элементов, производство монтажных работ запрещается как таковое, что регламентируется СНиПом по технике безопасности.

Определенную, защитно-экранирующую роль при формировании микроклимата на строительной площадке будет оказывать подстилающая поверхность, которая может быть представлена: формой и параметрами рельефа, наличием и видами растительности, водными поверхностями и вертикально расположенными препятствиями. К этим препятствиям относятся инженерные сооружения, жилая и промышленная застройка, высота которых превышает 20-30 м. Изучение параметров локальных ветровых потоков выходит за пределы границ климатологии, а так как их решение актуально для организационно-технологического проектирования, то входит в круг задач инженерных изысканий.

Осадки, точнее максимальные суточные значения величин выпадающих осадков и количество дней в году с выпадением ливневых дождей, представляют несомненный интерес в организационно-технологическом проектировании, исходя из следующих предпосылок:

- равномерное, в течение рабочей смены, выпадение осадков величиной 5 и более мм, накладывает определенные ограничения на выполнение ряда работ, например, сварочных и наружных отделочных работ;

- равномерные осадки интенсивностью более 10 мм вызывают прекращение производства работ с участием людского персонала;

- дождь, сопровождаемый ветром, служит причиной порождения выпадения так называемых “косых” дождей, которые приводят к смачиванию вертикальных поверхностей, что приводит к увлажнению вертикально расположенных конструкций, особенно монтажных стыков, что требует дополнительных мероприятий по технологии их заполнения с целью обеспечения герметичности и долговечности заполнения.

Феномен “косых” дождей общеизвестен и достаточно изучен. Косые дожди особенно характерны для регионов Дальнего Востока и Крайнего Севера.

Зависимость между количеством осадков, выпадающих на горизонтальную поверхность, скоростью ветра и количеством осадков, выпадающих на вертикальную поверхность, определяется эмпирической формулой

$$h_e = 0,19 h_z V_0,$$

где  $h_e$  – сумма осадков, мм, выпадающих на вертикальную поверхность за период дождя;  $h_z$  – то же, на горизонтальную поверхность;  $V_0$  – средняя скорость ветра, м/с, за период дождя.

Полученное уравнение позволяет построить график зависимости  $h_e = f(h_z)$ , который показан на рис. 1.

Анализ информации, представленной на рис. 1, позволяет установить, что уже при скорости ветра 5 м/с величина осадков, выпавших на вертикальную поверхность, соизмерима с количеством осадков, выпавших на горизонтальную поверхность.

Другим негативным фактором, влияющим на производство СМР, являются осадки в виде снега. Непосредственно сильный снегопад служит поводом для прекращения производства СМР. С другой стороны, снежные заносы, особенно на территории острова Сахалин и полуострова Камчатка, требуют значительного времени и средств для их ликвидации, парализуют работу транспорта, создают дополнительные монтажные нагрузки.

Определенное влияние на процессы теплообмена при выполнении ряда СМР оказывает солнечная радиация, величина которой в зимнее время может достигать значения до 270 кал/(сут./см<sup>2</sup>), а в летнее время – до 570 кал/(сут./см<sup>2</sup>).

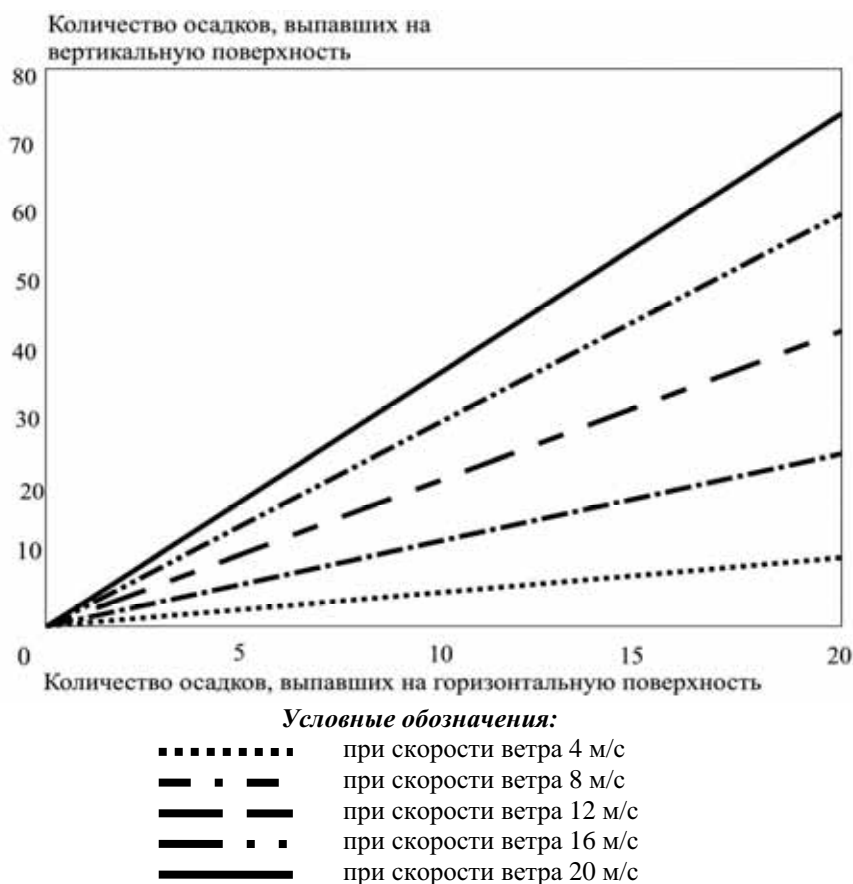


Рис. 1. Графики зависимости количества осадков, выпавших на вертикальные поверхности, от количества осадков, выпавших на горизонтальную поверхность, при определённых скоростях ветра

Таким образом, можно утверждать, что количество солнечной радиации будет определяться следующими факторами:

- положением нагреваемой поверхности (горизонтальная, вертикальная, наклонная);
- временным сезоном года;
- величиной угла положения солнца над горизонтом, в зависимости от времени суток;
- широтой местности;
- высотой над уровнем моря;
- ориентацией вертикальных и наклонных поверхностей относительно меридиана.

Негативное влияние климатических факторов (отрицательная температура, ветер и т.д.) сказывается не только на технологии работ, но связано и с значительной потерей производительности труда. При этом считается, что потери производительности труда учитываются в нормативах, основанных на климатическом зонировании страны. По сложившейся методологии учет влияния климатического фактора в организационно-технологическом проектировании осуществляется путем учета влияния отдельных составляющих (обычно – отрицательные значения температур, скорость ветра или их сочетание) климатического фактора на технологию производства работ [1] и, в частности, на уровень производительности труда.

Согласно сложившейся классификации, можно выделить два типа метеорологических данных, структура которых приведена в табл. 1.

С позиций системного анализа в этой системе можно выделить три предметные области (подсистемы): 1) климатическую; 2) организационно-технологическую; 3) социально-бытовую (см. рис. 2).

## Структура климатических параметров

<b>Непосредственно измеренные климатические параметры (по данным метеостанций Госкомгидромета)</b>	
1	Температура воздуха (максимальная, среднесуточная), Т °С
2	Скорость ветра (максимальная, средняя, порывов), м/с
3	Атмосферная влажность (максимальная, минимальная, среднесуточная), %
4	Давление на уровне метеорологической станции, миллибар
5	Количество среднесуточных осадков, мм
6	Упругость водяного пара
7	Дефицит влажности (средний, максимальный)
8	Облачность
9	Температура почвы (максимальная, минимальная, вытяжка на глубине 0,2 и 0,4 м)
10	Метеорологические явления (гроза, роса, поземка, мгла, изморозь, туман, дымка и т.д.)
<b>Специальные (по СНиП) климатические параметры</b>	
<i>Температура воздуха, °С</i>	
1	Температура воздуха наиболее холодных суток, С, обеспеченностью 0,98 и 0,92
2	Температура воздуха наиболее холодной пятидневки, °С, обеспеченностью 0,98 и 0,92
3	Температура воздуха, °С, обеспеченностью 0,94
4	Абсолютная минимальная температура воздуха, °С
5	Средняя суточная амплитуда температуры воздуха наиболее холодного месяца, °С
6	Продолжительность в сутках и средняя температура воздуха, °С, периода со средней суточной температурой воздуха в диапазонах температур: 0 °С, 8 °С, 10 °С
7	Температура воздуха, °С, обеспеченностью 0,95 и 0,85
8	Средняя максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца, °С
9	Абсолютная максимальная температура воздуха, °С
10	Средняя суточная амплитуда температуры воздуха наиболее теплого месяца, °С
11	Средняя месячная и годовая температура воздуха
<i>Скорость ветра, м/с</i>	
1	Преобладающее направление ветра за декабрь-февраль
2	Максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь, м/с
3	Средняя скорость ветра, м/с, за период со средней суточной температурой воздуха 8 °С
4	Преобладающее направление ветра за июнь-август
5	Минимальная из средних скоростей ветра по румбам за июль, м/с
<i>Облачность</i>	
1	Суммарная солнечная радиация (прямая и рассеянная) на горизонтальную поверхность при безоблачном небе, МДж/м <sup>2</sup> в пределах широт 40-68 0 с.ш. <sup>v</sup>
2	Суммарная солнечная радиация (прямая и рассеянная) на вертикальную поверхность, определенной ориентации, при безоблачном небе, МДж/м <sup>2</sup> в пределах широт 40-68 <sup>0</sup> с.ш.
<i>Влажность атмосферная, %</i>	
1	Средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца, %
2	Средняя месячная относительная влажность воздуха в 15 ч наиболее холодного месяца, %
3	Средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее теплого месяца, %
<i>Количество среднесуточных осадков, мм</i>	
1	Количество осадков за ноябрь-март, мм
2	Количество осадков за апрель-октябрь, мм
3	Суточный максимум осадков, мм
<i>Давление на уровне станции (миллибар)</i>	
1	Барометрическое давление, гПа



Рис. 2. Организационно-технологическая система строительного производства с комплексным учётом климатического фактора

*Климатическая область* включает в себя основные метеорологические параметры и явления, происходящие по законам природы и не подвластные человеку.

Организационно-технологическая область включает в себя все организационно-технологические процессы строительного производства, которые особенно чувствительны к агрессивности определенных составляющих климатического фактора. В качестве таковых выступают три подсистемы: 1) теплообменные процессы; 2) адвективный теплоперенос; 3) монтажные ветровые нагрузки.

Теплообменный процесс и адвективный теплоперенос достаточно близки по сущности, и их различие заключается в том, что под понятием адвективного теплопереноса понимается теплообменный процесс, в котором основной акцент уделяется теплопереносу.

Социально-бытовая область включает в себя региональный (дестабилизирующий) фактор физиолого-биологического характера. Все составляющие этой подсистемы связаны с

проблемами пребывания человека в данной климатической зоне (регионе), вследствие его миграции из других регионов страны.

Результатом такой миграции служат определенные физиологические изменения в здоровье человека, которые требуют периода акклиматизации, в течение которого физиологические функции человека приходят в норму. Очевидно, что процесс акклиматизации влечет за собой снижение производительности труда.

Попутно можно отметить, что некоторая потеря производительности труда неизбежна при определенной активности кровососущих насекомых.

### **Выводы**

1. Установлено, что, помимо традиционного использования строительной климатологии в разделах строительства “Строительная теплотехника”, “Нагрузки и воздействия”, областью приложения строительной климатологии следует считать организационно-технологическое проектирование.

2. Актуальность учета климатических факторов определяется степенью аномальности климатических условий региона.

3. Исследования, выполненные в данной работе, показывают, что выбор анализируемого климатического фактора, во-первых, зависит от степени его агрессивности по отношению к конкретной работе и, во-вторых, определяется чувствительностью к фактору агрессии.

4. Установлено, что наиболее существенное влияние на производительность механизмов оказывают низкие температуры ( $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже), температуры, превышающие паспортный диапазон механизма (обычно свыше  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Афанасьев, А. А. Индустриальные методы облицовки фасадов зданий при их утеплении / А. А. Афанасьев, Е. П. Матвеев, П. В. Монастырев // Промышленное и гражданское строительство. – М.: ООО «Изд-во ПГС», 2005 – 200 с.
2. Федосенко, В. Б. Особенности ценообразования объектов недвижимости в строительном комплексе Дальнего Востока и Крайнего Севера / В. Б. Федосенко // Промышленное и гражданское строительство. – М.: ООО «Издательство ПГС», 2003. – 230 с.
3. СП 11-103-97. Свод правил. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. – М., 1997.