

## СОДЕРЖАНИЕ

### *Информатика, вычислительная техника и управление*

Исследование следящей системы в среде MATLAB <b>А.П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, П.А. Аверьянов.....</b>	<b>7</b>
Моделирование последствий наводнений на основе причинно-следственных комплексов и системно-динамического подхода Форрестера <b>А.Ф. Резчиков, В.А. Кушников, В.А. Иващенко, А.С. Богомолов, Л.Ю. Филимонюк, М.В. Хамутова.....</b>	<b>13</b>
Анализ нейросетевой и термодинамической моделей прогнозирования аварийных ситуаций <b>С.А. Ткалич, О.Ю. Таратынов.....</b>	<b>21</b>
Задача выбора серверных ресурсов для внедрения инфраструктуры виртуальных рабочих столов <b>Д.К. Проскурин, К.А. Маковий.....</b>	<b>26</b>
Системный подход к принятию решений и обработке речевой информации на основе метода нечеткого фонетического кодирования <b>Л.В. Савченко.....</b>	<b>33</b>
Мультиагентная система для оптимизации функционирования сложных обслуживающих комплексов <b>С.А. Олейникова.....</b>	<b>38</b>

### *Энергетика*

Теплоэнергетические аспекты и оценка пожарных рисков производства нефтеполимерной смолы <b>А.В. Жучков, А.М. Чуйков, А.В. Мещеряков, В.И. Лукьяненко, С.Ю. Зайчиков, И.Е. Шабанов.....</b>	<b>43</b>
К вопросу целесообразности применения разнотемпературного конденсационного фильтра для очистки газовых потоков <b>П.А. Солженикин, В.Г. Стогней, В.В. Черниченко .....</b>	<b>49</b>
О возможности определения локальных микрорасслоений в многослойных полимерных обтекателях воздушных судов односторонним тепловым сканированием <b>А.В. Ряжских, Н.П. Заец, И.А. Чижов, О.А. Семенихин.....</b>	<b>55</b>

### *Радиотехника и связь*

Вероятностные характеристики абсолютного максимума гауссовского случайного процесса <b>В.П. Литвиненко, О.В. Чернояров, Л.А. Голпайегани.....</b>	<b>59</b>
Алгоритмы выбора периметровых средств обнаружения <b>А.Б. Антиликаторов, С.Ю. Белецкая, А.С. Кулищенков .....</b>	<b>63</b>
Дифференциальный усилитель биопотенциалов с организацией следящей связи по питанию <b>Д.В. Журавлёв, Ю.С. Балашов.....</b>	<b>67</b>
Малогабаритные акустические системы на основе акустического лабиринта <b>А.С. Бадаев.....</b>	<b>75</b>
Разработка и определение эффективности пассивной приемной антенны <b>А.Б. Антиликаторов, С.А. Антипов, Р.А. Дуров .....</b>	<b>79</b>
Методика анализа данных сканирования ближнего электромагнитного поля <b>М.А. Ромащенко, А.А. Пряхин.....</b>	<b>82</b>
Автоматическая калибровка ЦАП на источниках тока <b>А.В. Строгонов, С.В. Жигульский, В.С. Пожидаев.....</b>	<b>87</b>
Автоматизация проектирования SPICE-моделей резисторных блоков Б19К с позиции температурной стабильности <b>Д.В. Озеркин, С.А. Русановский, В.О. Бондаренко.....</b>	<b>90</b>

## *Машиностроение и машиноведение*

Влияние режимных параметров процесса анодного растворения на обеспечение качества электрохимического формообразования А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, В.В. Григораш.....	98
Разработка и реализация механизма управления качеством процессов логистики на машиностроительном предприятии О.Г. Туровец, И.В. Каблашова, В.Н. Родионова.....	105
Ударная вязкость сварных титановых соединений с окисленной поверхностью А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Б.А. Коломенский.....	114
Расчет параметров струи при комбинированной гидроабразивной обработке О.Н. Кириллов, В.П. Смоленцев.....	120

## *Физика*

Оценка температуры на вершине конусного нитевидного кристалла в точке перехода к цилиндрическому росту О.Д. Козенков, В.В. Горбунов, Л.Г. Косырева, Д.Г. Жияяков.....	125
Колебания кристалла с дислокацией Пайерлса И.Л. Батаронов, Т.А. Надина.....	131
Особенности электрических свойств в гетерогенных системах Ni-MgO и $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ при низких температурах А.А. Гребенников, О.В. Стогней, А.В. Ситников, О.В. Жилова, В.Н. Феклин.....	134
Влияние толщины водных пленок на структуру композиционного строительного материала с использованием фосфогипса С.Н. Золотухин, О.Б. Кукина, А.А. Абраменко, А.А. Гапеев, Е.А. Соловьева, Е.А. Савенкова.....	138

## CONTENTS

### *Informatics, computer engineering and control*

Research tracking system in MATLAB A.P. Kharchenko, Yu.S. Slepokurov, P.A. Averyanov.....	7
Modeling of floods' consequences on the basis of forrester's cause-and-effect systems and system dynamics approach A.F. Rezhchikov, V.A. Kushnikov, V.A. Ivaschenko, A.S. Bogomolov, L.Yu. Filimonyuk, M.V. Khamutova.....	13
Analysis of neural network and thermodynamic models for forecasting accident situations S.A. Tkalich, O.Yu. Taratynov.....	21
Selecting server resources for virtual desktop infrastructure deployment D.K. Proskurin, K.A. Makoviy.....	26
Systematic approach to decision-making and speech processing using "obscure phonetic coding method" L.V. Savchenko.....	33
Multiagent system for optimization of complex service complexes functioning S.A. Oleinikova.....	38

### *Energetics*

Heat-energy characteristics and fire risks assessment of oil polymer resin production A.V. Zhuchkov, A.M. Chuikov, A.V. Meshcheryakov, V.I. Lukyanenko, S.Yu. Zaichikov, I.E. Shabanov.....	43
To the question whether the use of the different temperature condensation filter for purification of gas streams P.A. Solzhenikin, V.G. Stognei, V.V. Chernichenko.....	49
On the possibility of definition of local microbondenouses in multilayer polymeric aircraft vehicles by single-depth thermal scanning A.V. Ryazhskikh, N.P. Zaets, I.A. Chizhov, O.A. Semenikhin.....	55

### *Radio engineering and communication*

Probability characteristics of the absolute maximum of gaussian random process V.P. Litvinenko, O.V. Chernoyarov, L.A. Golpayegani.....	59
Algorithms of perimetric detection aids selection A.B. Antilikatorov, S.Yu. Beletskaya, A.S. Kulishenkov.....	63
Differential bioelectric-potential amplifier with organization of power servo feedback D.V. Zhuravlyev, Yu.S. Balashov.....	67
Compact acoustic systems on the basis of acoustic labyrinth A.S. Badaev.....	75
Passive receiving antenna development and effectiveness A.B. Antilikatorov, C.A. Antipov, R.A. Durov.....	79
Methodology for scanning data analysis of near electromagnetic field M.A. Romashchenko, A.A. Pryakhin.....	82
Automatic calibration of DAc in current sources A.V. Strogonov, S.V. Zhigul'skiy, V.S. Pozhidaev.....	87
Design automatization of B19K resistance block spice-models from the position of temperature stability D.V. Ozerkin, S.A. Rusanovskiy, V.O. Bondarenko.....	90

### *Mechanical engineering and science of machines*

Influence of operating conditions in anodic dissolution process on quality assurance of electrochemical shaping A.I. Boldyrev, A.A. Boldyrev, V.V. Grigorash.....	98
--	----

Development and implementation of quality management of logistics processes at a machine-building enterprise	
<b>O.G. Turovets, I.V. Kablashova, V.N. Rodionova.....</b>	<b>105</b>
Impact toughness of titanium welded joints with oxide films	
<b>A.B. Kolomenskiy, S.V. Shakhov, B.A. Kolomenskiy.....</b>	<b>114</b>
Calculation of jet parameters in combined hydroabrasive processing	
<b>O.N. Kirillov, V.P. Smolentsev.....</b>	<b>120</b>

### *Physics*

Measuring temperature on the top of the cone whisker at the point of transition to cylindrical growth	
<b>O.D. Kozenkov, V.V. Gorbunov, L.G. Kosyreva, D.G. Zhilyakov.....</b>	<b>125</b>
Crystal oscillations caused by the pierls stress	
<b>I.L. Bataronov, T.A. Nadeina.....</b>	<b>131</b>
Electrical exertion features in Ni-MgO and $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ heterogeneous systems displayed at low temperatures	
<b>A.A. Grebennikov, O.V. Stognei, A.V. Sitnikov, O.V. Zhilova, V.N. Feklin.....</b>	<b>134</b>
Influence of thickness of water films on the structure of composite building material based on phosphogypsum	
<b>S.N. Zolotukhin, O.B. Kukina, A.A. Abramenko, A.A. Gapeev, E.A. Solov'eva, E.A. Savenkova.....</b>	<b>138</b>

**ИССЛЕДОВАНИЕ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ В СРЕДЕ MATLAB**

**А.П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, П.А. Аверьянов**

Для приводов манипулятора промышленного робота актуально повышение быстродействия в 2-3 раза при сохранении плавности перемещения захватного устройства (ЗУ). Плавность перемещения ЗУ обеспечивается получением аperiodической 2-го порядка переходной характеристики. Приводы звеньев манипулятора робота строятся однотипно как многоконтурные автоматические системы с подчиненным регулированием. Существует несколько способов обеспечения заданных динамических показателей качества регулирования. Наиболее часто используются корректирующие устройства (КУ), ПИ-регуляторы и в последнее время перспективно применение модального регулятора (МР). Не исследованы возможности современных методов проектирования автоматических систем с обратной связью при их практической реализации. Сравнительный анализ способов повышения быстродействия при вариации их параметров выявил допустимые границы изменения времени регулирования и перерегулирования переходной характеристики при условии сохранения ее вида. Использование ПИ-регуляторов для получения заданных параметров качества регулирования ограничивается взаимной зависимостью времени регулирования и перерегулирования. Произвольное изменение коэффициентов МР выявило нелинейную функциональную зависимость времени регулирования и перерегулирования от их значения. При сравнении чувствительности параметров качества регулирования по переходной характеристике к 50% изменению постоянных времени КУ и 50% изменению коэффициентов МР время регулирования и перерегулирования последнего не изменяется. Изменение на 50% постоянных времени Т в передаточной функции КУ влияет на перерегулирование, и переходной процесс превращается в колебательный. При этом быстродействие САУ при перерегулировании не более (0.04-0.05) % с МР повышается в 3 раза, а быстродействие САУ с КУ - в 1,8 раз.

Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что применение МР обеспечивает наибольшее быстродействие следящей системы и заданных показателей качества управления. Использование МР, в отличие от классических регуляторов, не вносит дополнительную инерционность в следящую систему. Вместе с этим в литературных источниках, где описывается МР, отмечаются некоторые недостатки применения МР, которые ограничивают его практическое применение. Поиск путей устранения этих недостатков является целью представленных и последующих исследований следящей системы с МР

Ключевые слова: электромеханическая следящая система, структурная схема, модальный регулятор, переходная характеристика

**Введение**

Электромеханическая следящая система или система автоматического управления положением представляет собой систему подчиненного регулирования, управляющую перемещением звеньев манипулятора промышленного робота и обеспечивающую стабилизацию положения захватного устройства манипулятора (исполнительного органа) промышленного робота относительно некоторой базовой системы координат в пространстве расположения манипулятора.

Электромеханическая следящая система обеспечивает как линейное, так и угловое перемещение звеньев манипулятора.

Среда Matlab позволяет, используя визуальные блоки и передаточные функции элементов, программно и аппаратно

реализовать структурную схему электромеханической следящей системы.

Структурная схема двухконтурной электромеханической следящей системы управления руки промышленного робота [1] состоит из системы автоматического регулирования скорости (САР) скорости и следящей системы (СС) - рис.1.

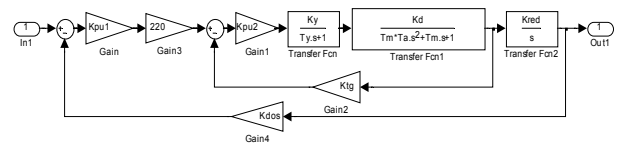


Рис. 1. Структурная схема двухконтурной электромеханической следящей системы

Передаточная функция СС выражается

$$W_{cc}(p) = K_{ny1} * 220 * K_{ny2} * K_y * K_d * K_{red} / [(T_m T_y T_u * p^4 + (T_m T_y + T_m T_u) * p^3 + (T_m + T_u) * p^2 + (1 + K_m z K_{ny2} K_y K_d) * p + K_{dn} * K_{ny1} * 220 * K_{ny2} * K_y * K_d * K_{red})]$$

Дифференциальное уравнение СС выражается

$$T_m T_y T_u * d^4 y(t) / dt^4 + (T_m T_y + T_m T_u) d^3 y(t) / dt^3 + (T_m + T_u) * d^2 y(t) / dt^2 + (1 + K_m z * K_{ny2} * K_y * K_d) * dy(t) / dt$$

Харченко Александр Петрович - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: N210713@yandex.ru  
 Слепокуров Юрий Сергеевич - МИКТ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: ussrs@list.ru  
 Аверьянов Павел Алексеевич - ВГТУ, бакалавр, e-mail: ara10mx31596@mail.ru

$$+K_{\partial n} \cdot K_{ny1} \cdot 220 \cdot K_{ny2} \cdot K_y \cdot K_{\partial} \cdot K_{ред} \cdot y(t) = \\ = K_{ny1} \cdot 220 \cdot K_{ny2} \cdot K_y \cdot K_{\partial} \cdot K_{ред} \cdot x(t).$$

Более компактной формой математического описания СС является уравнения в векторно-матричной форме [2]

$$\frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = C \cdot x + D \cdot u.$$

где  $A, B, C, D$  – матрицы.

При моделировании использованы параметры двигателя постоянного тока LSK 1124M французской компании “Leroy - Somer” мощностью 3,5 кВт. Выбраны датчик обратной связи по положению burster 8820 EN, который имеет измерительный диапазон  $350^\circ \pm 4^\circ$  с разрешением  $0.01^\circ$  и тахогенератор ТПП-1А – коллекторный постоянного тока с зубцовым ротором с крутизной 5 мВ/(об/мин).

СС предварительно настраивается по условиям эксплуатации с П-регуляторами.

Из условий работы САР скорости следует, что при подаче на вход системы  $U_n = 220V$  двигатель разгоняется до номинальной скорости -  $n_{ном}$ . Изменяется  $K_{ny2}$ . По условиям работы переходная характеристика СС быть аperiodической 2-го порядка. Изменяется  $K_{ny1}$ .

На рис. 2 представлены переходные характеристики следящей системы при изменении  $K_{ny1}$ .

Уменьшение коэффициента  $K_{ny1}$  сохраняет форму аperiodической переходной характеристики 2-го порядка, но время регулирования возрастает.

Увеличение коэффициента  $K_{ny1}$  изменяет форму аperiodической переходной характеристики 2-го порядка на колебательную, но время регулирования уменьшается.

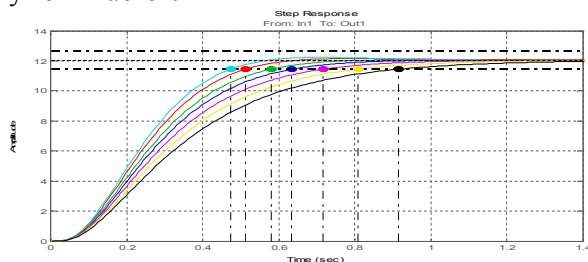


Рис. 2. Переходные характеристики СС при изменении  $K_{ny1}$

### Постановка задачи

Наименьшее время регулирования имеет переходная характеристика СС с перерегулированием не более 0.05% при заданном допустимом отклонении  $\Delta = \pm 0.05 \cdot u_{уст}$ .

Особенностью СС является и то, что различные углы задания ее переходная

характеристика обрабатывает с одним и тем же временем регулирования – рис. 3.

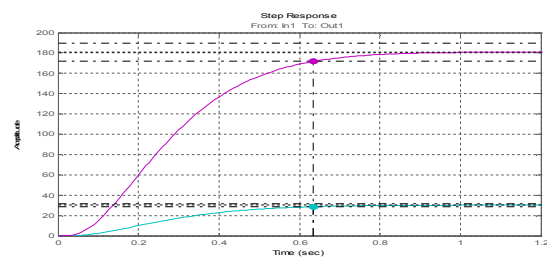


Рис. 3. Переходная характеристика СС при обработке различных углов задания

При сохранении формы переходной характеристики СС уменьшение времени регулирования при использовании П-регулятора не возможно, так как существует зависимость времени регулирования и перерегулирования от значения коэффициента регулятора  $K_{ny1}$ .

Уменьшение времени регулирования СС может быть получено при использовании модального регулятора (МР).

Синтез заданных показателей качества регулирования в среде Matlab с использованием МР требует векторно-матричного уравнения или уравнения пространства состояний СС.

Особенностью исследования систем автоматического управления при задании структурных схем в области Simulink является то, что при исследовании системы в рабочей области Matlab матрицы  $A, B, C$  и  $D$  не соответствуют матрицам исходной системы.

Получены матрицы векторно-матричного уравнения [ 3 ] СС:

$$A1 = \begin{pmatrix} 0 & K_{ред} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_M \cdot T_Y} & -\frac{1}{T_Y} & \frac{K_L}{T_M \cdot T_Y} \\ -K_{дл} \cdot K_{ny1} \cdot 220 \cdot K_{ny2} \cdot \frac{K_Y}{T_Y} & -K_{ТГ} \cdot K_{ny2} \cdot \frac{K_Y}{T_Y} & 0 & -\frac{1}{T_Y} \end{pmatrix}$$

$$B1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_{ny1} \cdot 220 \cdot K_{ny2} \cdot \frac{K_Y}{T_Y} \end{pmatrix}$$

$$C1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0), \quad D1 = 0.$$

Матрица строка коэффициентов МР СС записывается:

$$K = [K1 \ K2 \ K3 \ K4].$$

Уравнение СС с МР представляется

$$dx/dt = (A1 - B1*K)*x + B1*V,$$

где V – скалярный вход, как сумма входного сигнала и выходного сигнала МР.

В то время как динамические свойства исходной СС определяются матрицей A1, динамические свойства СС с МР определяются матрицей  $A = A1 - B1*K$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & K_{ред} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_M \cdot T_R} & -\frac{1}{T_R} & \frac{K_d}{T_M \cdot T_R} \\ -K_{дл} \cdot K_{ин1} \cdot 220 \cdot K_{ин2} \cdot \frac{K_y}{T_y} - K1 & -K_{тр} \cdot K_{ин2} \cdot \frac{K_y}{T_y} - K2 & -K3 & -\frac{1}{T_y} - K4 \end{pmatrix}$$

Первой особенностью при проектировании СС с МР является изменение амплитуды всех составляющих вектора состояний, то есть при повышении быстродействия амплитуды составляющих вектора состояний превышают допустимые значения таких величин, как скорость, ток и напряжение двигателя.

Второй особенностью использования МР является чувствительность переходной характеристики к изменению коэффициентов K1, K2, K3 и K4.

Оценим изменение коэффициентов K1, K2, K3 (коэффициент K4 не влияет) на относительное изменение перерегулирования  $\sigma/\sigma_0$  и относительное изменение времени регулирования  $tp/tp_0$ .

При этом  $tp_0 = 0.182$  с. - время регулирования переходного процесса в исходной структурной схеме СС с МР, а  $tp$  - время регулирования переходного процесса в структурной схеме СС с измененными значениями параметров МР.

Результаты исследований СС приведены в табл. 1-3.

Таблица 1

Влияние коэффициента K1 на исходный аperiodический процесс

K1	tp/tp0	σ/σ0
3	1,0582	0
5,5	2,545	0
11,4168	1	1
20	0,9259	472,3926
40	1,0423	1993.865

Таблица 2

Влияние коэффициента K2 на исходный аperiodический процесс

K2	tp/tp0	σ/σ0
0,0025	1,3439	1239,2638
0,005	1,3016	574,8466
0,01	1	1
0,02	1,9788	0
0,04	3,6508	0

Таблица 3

Влияние коэффициента K3 на исходный аperiodический процесс

K3	tp/tp0	σ/σ0
0,00005	1,1481	0
0,00012	1,0794	0
0,0002	1	1
0,0005	0.94	301,227
0,001	2,2381	822,0859

По результатам исследований построены графики зависимостей  $tp/tp_0 = F(K1)$ ,  $tp/tp_0 = F(K2)$ ,  $tp/tp_0 = F(K3)$  - рис. 4-6.

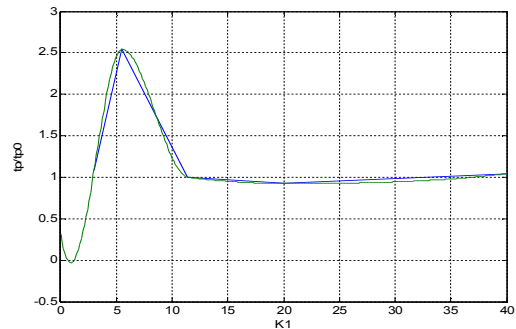


Рис. 4. Зависимость  $tp/tp_0 = F(K1)$

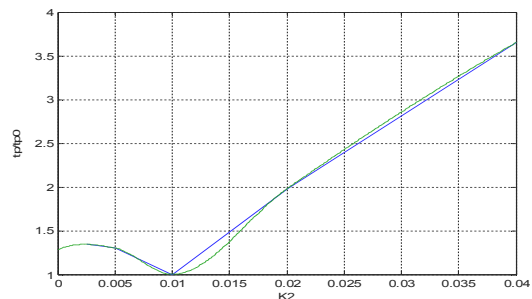


Рис. 5. Зависимость  $tp/tp_0 = F(K2)$

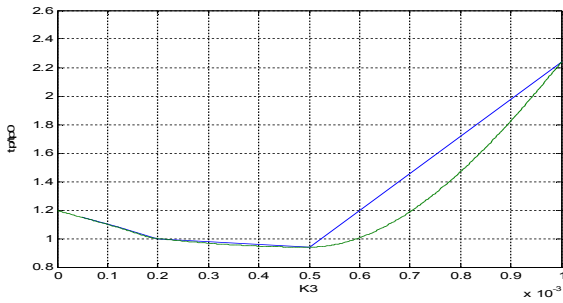


Рис. 6. Зависимость  $tr/tp_0 = F(K_3)$

Графики зависимостей  $\sigma/\sigma_0 = F(K_1)$ ,  $\sigma/\sigma_0 = F(K_2)$ ,  $\sigma/\sigma_0 = F(K_3)$  представлены на рис. 7-9. При этом  $\sigma_0 = 0.05\%$  - переугулирование переходного процесса в исходной структурной схеме с МР, а  $\sigma$  - переугулирование переходного процесса в структурной схеме с доступом к переменным состояний с измененными значениями параметров МР.

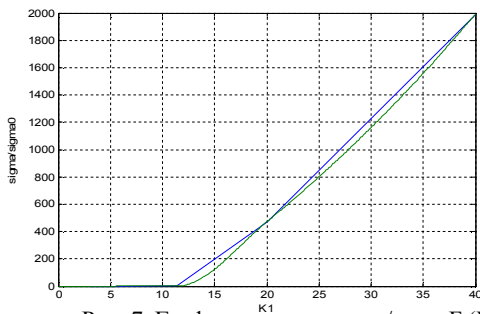


Рис. 7. График зависимости  $\sigma/\sigma_0 = F(K_1)$

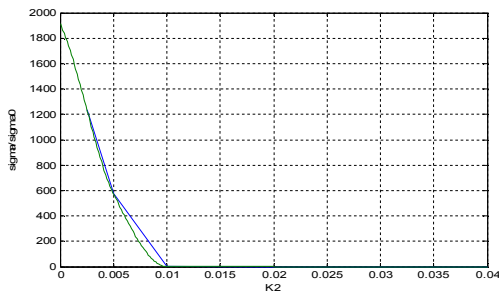


Рис. 8. График зависимости  $\sigma/\sigma_0 = F(K_2)$

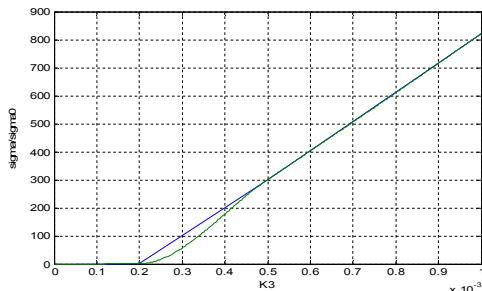


Рис. 9. График зависимости  $\sigma/\sigma_0 = F(K_3)$

### Выводы:

влияние произвольной вариации параметров МР на время регулирования в зависимости от  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  имеет различную функциональную зависимость и степень влияния;

влияние произвольной вариации параметров МР на переугулирование для коэффициентов  $K_1$ ,  $K_3$  имеет прямопропорциональную функциональную зависимость, а для коэффициента  $K_2$  обратнопропорциональную функциональную зависимость;

произвольное увеличение коэффициентов  $K_1$  и  $K_3$  изменяет переходную характеристику на колебательную;

произвольное уменьшение коэффициента  $K_2$  изменяет переходную характеристику на колебательную;

произвольное изменение коэффициентов МР при сохранении формы переходной характеристики не возможно.

Сравним чувствительность параметров переходной характеристики, (время регулирования и переугулирование) СС с последовательным корректирующим устройством (КУ) в виде форсирующего и апериодического типовых звеньев с постоянными времени  $T_1$  и  $T_2$  и чувствительность параметров переходной характеристики СС с МР к коэффициентам  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  и  $K_4$ .

На рис. 10 изображена схема исследования СС с МР и наблюдателем. Наблюдатель восстанавливает недостающие для реализации обратных связей (ОС) переменные  $X_3$  и  $X_4$ .

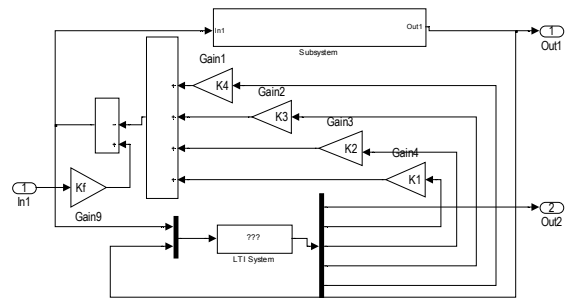


Рис. 10. Схема исследования СС с МР и наблюдателем

Коэффициент  $K_f$  введен для компенсации изменения амплитуды входного сигнала.

Время регулирования переходной характеристики исходной СС  $tr = 0.582$  с.

В табл. 4 представлены исследования с МР, а в табл. 5 исследования с последовательным КУ.



Применение МР, при заданном перегулировании  $\sigma = (0.04-0.05)\%$ , соответствует повышению быстродействия в 3 раза.

Применение последовательного КУ, при заданном перегулировании  $(0.04-0.05)\%$ , соответствует повышению быстродействия в 1.8 раза.

Таблица 4

Исследования СС с МР

K1/K10	K2/K20	K3/K30	K4/K40	tp с.	$\sigma$ %
1	1	1	1	0.182	0.05
0.9	0.9	0.9	0.9	-	0.054
0.8	0.8	0.8	0.8	-	0.059
0.7	0.7	0.7	0.7	-	0.068
0.6	0.6	0.6	0.6	-	0.077
0.5	0.5	0.5	0.5	-	0.084
1.1	1.1	1.1	1.1	-	0.047
1.2	1.2	1.2	1.2	-	0.045
1.3	1.3	1.3	1.3	-	0.043
1.4	1.4	1.4	1.4	-	0.039
1.5	1.5	1.5	1.5	-	0.036

Таблица 5

Исследование СС с последовательным КУ

T1	T2	tp с.	$\sigma$ %
0.15	0.098	0.308	0.04
0.9*T1	0.9*T1	0.314	0.18
0.8*T1	0.8*T1	0.321	0.182
0.7*T1	0.7*T1	0.327	0.4
0.6*T1	0.6*T1	0.333	0.9
0.5*T1	0.5*T1	0.338	1.65
1.1*T1	1.1*T1	0.303	0.648
1.2*T1	1.2*T1	0.298	1.01
1.3*T1	1.3*T1	0.293	1.42
1.4*T1	1.4*T1	0.289	1.85
1.5*T1	1.5*T1	0.286	2.29

### Выводы по результатам сравнения:

время регулирования и перегуливание в СС с МР не изменяется;  
 переходная характеристика в СС с МР остается аperiodической 2-го порядка;  
 время регулирования в СС с КУ изменяется не значительно, а перегуливание увеличивается в десятки раз;  
 переходная характеристика в СС с КУ становится колебательной.  
 повышение быстродействия в СС с КУ ограничено зависимостью времени регулирования от перегуливания  
 Таким образом, исследования СС с МР доказали преимущество МР перед классическими способами проектирования.

### Литература

1. Теория автоматического управления: методы исследования автоматических систем в среде Matlab: учеб. пособие / А.П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, В.В. Кольцова, О.В. Белоусова. – Воронеж: ГОУВПО "Воронежский государственный технический университет", 2012. – 201 с.
2. Филипс Ч. Системы управления с обратной связью/ Ч. Филипс, Р. Хабор. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.
3. Теория автоматического управления: Синтез САУ в среде Matlab: учеб. пособие [Электронный ресурс] / А.П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, А.К. Муконин, П.А. Аверьянов. - Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. – 80 с.

Воронежский государственный технический университет  
 Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж

### RESEARCH TRACKING SYSTEM IN MATLAB

<sup>1</sup>A.P. Kharchenko, <sup>2</sup>Yu.S. Slepokurov, <sup>3</sup>P.A. Averyanov

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
 e-mail: N210713@yandex.ru.

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, International Institute of Computer Technology, Voronezh, Russian Federation  
 e-mail: ussrs@list.ru.

<sup>3</sup>Bachelor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
 e-mail: apa10mx31596@mail.ru.

For the industrial robot manipulator actuators the important performance improvement ranges from 2 to 3 times while the smooth movement of a gripper device (memory) should be maintained at the same level. Smoothness of its movement is provided by the memory, which receives the aperiodic second order transient response. The drive links of the similar robot manipulator are set up as multi-circuit automatic systems with a subordinate regulation. There are several ways to provide specific dynamic indicators of the regulation quality. The most commonly used are corrective devices (CD), PI controllers and the most promising in the recent years – the so called modal controller (MC). The possibilities to apply modern approaches to the automatic feedback systems design are not entirely investigated as of yet. A comparative analysis of the methods to improve performance with their varied parameters revealed acceptable limits of time regulation variations and the possibility to

overshoot the transient response should its form is maintained. The use of PI controllers to obtain the desired quality of regulation is limited to the mutual inter-dependence between the control time, and the overshoot interval. An arbitrary variation of the coefficients modality regulator (MR) revealed a non-linear functional inter-dependence of the control time and overshoot interval based on their actual values. When comparing the sensitivity of the quality parameters of the controlling based on the transient response to 50% change of time constants (CD) and 50% change the coefficients of the (MR) – the time of regulation and the overshoot interval of the latter does not change. 50% change of time of T constant in the transfer function affects the overshoot interval and the transient process becomes oscillatory. The performance of ACS when the overshoot is not more than (0.04-0.05) % increases MR by 3 times, and the performance of ACS itself is increases by 1.8 times.

Based on the above survey results it is possible to conclude that the use of modality regulators provides the highest speed performance of the tracking (servo) system and of the management quality indicators applied. As oppose to the classical regulators, the use of MR does not bring additional inertia into the tracking (servo) system. Nevertheless, some scientific resources describe certain disadvantages of using MR, which may limit its practical application. The purpose of the present study is to find ways of eliminating these drawbacks and subsequently provide for the follow-up research on the MR application

Key words: Electromechanical tracking (servo) system block diagram of a modal controller, transient response

### References

1. Kharchenko A. P., Slepokurov J. S, Koltsov V. V., Belousova O. V. “Automatic control theory: methods of research of automatic systems in the Matlab environment” (“Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: metody issledovaniya avtomaticheskikh sistem v srede Matlab”), Textbook- manual, Voronezh, GOUVPO, Voronezh state technical University, 2012, 201 p.
2. Phillips C., Harbour, R. “Control Systems with Feedback”, Moscow, Laboratory of basic knowledge, 2001, 616 p.
3. Kharchenko A. P., Slepokurov J. S., Lukonin A. K., Averyanov P. A. “Automatic control theory: a Synthesis of ACS in the Matlab environment” (“Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Sintez SAU v srede Matlab”),: Handbook [Electronic version], Voronezh, FGBOU VO, Voronezh state technical University, 2017, 80 p.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМНО-ДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДА ФОРРЕСТЕРА

**А.Ф. Резчиков, В.А. Кушников, В.А. Иващенко, А.С. Богомолов, Л.Ю. Филимонок,  
М.В. Хамутова**

На основе формального аппарата системной динамики, учитывающего причинно-следственные связи между моделируемыми переменными, разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать характеристики наводнений. Построен граф причинно-следственных связей, существующих между моделируемыми характеристиками. Математическая модель для прогнозирования характеристик наводнений описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка. Построены функциональные зависимости правых частей системы уравнений, определенные исходя из анализа опыта специалистов, а также представленные в виде произведения полиномов. Численное решение системы уравнений получено с помощью метода Рунге-Кутты. Проведены вычислительные эксперименты, позволяющие на различных временных интервалах и с учетом изменяющихся параметров внешней среды определить моделируемые характеристики. Сравнение прогнозируемых характеристик, рассчитанных по модели, с различными представлениями правой части системы дифференциальных уравнений с их реальными значениями наводнения, произошедшего в Приморье в августе 2001 года, подтверждает адекватность математической модели. Результаты, полученные по модели, могут быть использованы при разработке информационных систем прогнозирования последствий наводнения для оперативно-диспетчерского персонала МЧС, применение которой позволит повысить эффективность ликвидации последствий наводнений

Ключевые слова: математическая модель, системная динамика, прогнозирование последствий наводнений

### Введение

По сведениям Организации Объединенных Наций, ущерб от стихийных бедствий природного характера, в том числе наводнений, с годами только растет. Экономические потери от последствий наводнений приводят к существенному снижению валового внутреннего продукта государства [1]. Для обеспечения успешной реализации мероприятий по снижению ущерба от наводнений необходим прогноз значений их основных характеристик.

Анализ публикаций, а также материалов, размещенных в сети Интернет [2], показал отсутствие в них сведений о математических моделях, обеспечивающих получение адекватных прогнозных значений основных характеристик наводнений, необходимых для разработки эффективных комплексов мероприятий по минимизации ущерба от них.

Исходя из этого, предложена основанная на формальном аппарате системной динамики математическая модель для прогнозирования значений основных характеристик наводнений в

виде системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка.

### Математическая модель для прогнозирования последствий наводнений

При использовании математического аппарата системной динамики для описания исследуемого объекта осуществляется построение системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{dX_i}{dt} = X_i^+ + X_i^-, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $X_i^+$ ,  $X_i^-$ ,  $i = \overline{1, n}$  – непрерывные или кусочно-непрерывные функции, определяющие положительную и отрицательную скорость изменения значения характеристики  $X_i$ ;  $X_i^- = f_i^-(F_1, F_2, \dots, F_m)$ ,  $X_i^+ = f_i^+(F_1, F_2, \dots, F_m)$ .  $F_j$ ,  $j = \overline{1, m}$  – факторы, влияющие на скорость изменения значения характеристики (фактора  $F_j$  сами могут быть функциями от исследуемых характеристик).

В соответствии с ГОСТ 22.0.06-97/ГОСТ Р 22.0.06-95, при разработке математической модели в качестве основных характеристик наводнений выбраны:  $X_1$  – численность группировки сил, участвующих в аварийно-спасательных работах;  $X_2$  – количество жилых домов, разрушенных и поврежденных в результате наводнения;  $X_3$  – численность населения, эвакуированного из зоны затопления;  $X_4$  – количество погибших;  $X_5$  – протяженность железных и автомобильных дорог, оказавшихся в зоне затопления;  $X_6$  – количество промышленных предприятий в зоне наводнения;

---

Резчиков Александр Федорович - ИПТМУ РАН, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор, e-mail: iptmuran@san.ru  
 Кушников Вадим Алексеевич - ИПТМУ РАН, СГТУ им. Гагарина Ю.А., д-р техн. наук, профессор, e-mail: iptmuran@san.ru  
 Иващенко Владимир Андреевич - ИПТМУ РАН, д-р техн. наук, уч. секретарь, e-mail: iptmuran@san.ru  
 Богомолов Алексей Сергеевич - ИПТМУ РАН, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: alexbogomolov@ya.ru  
 Филимонок Леонид Юрьевич - ИПТМУ РАН, канд. техн. наук, науч. сотрудник, e-mail: iptmuran@san.ru  
 Хамутова Мария Васильевна - СНИГУ им. Н.Г. Чернышевского, аспирант, e-mail: mariuka7d@rambler.ru

$X_7$  – количество транспортных средств, участвующих в аварийно-спасательных работах;  $X_8$  – численность населения в зоне затопления;  $X_9$  – площадь сельскохозяйственных угодий, охваченных наводнением;  $X_{10}$  – количество погибших сельскохозяйственных животных,  $X_{11}$  – ущерб основным производственным фондам в зоне

затопления;  $X_{12}$  – ущерб оборотным производственным фондам в зоне затопления.

На основе анализа взаимосвязей между исследуемыми характеристиками наводнений построен ориентированный граф причинно-следственных связей (рис. 1), положенный в основу построения математической модели (2) [3-5].

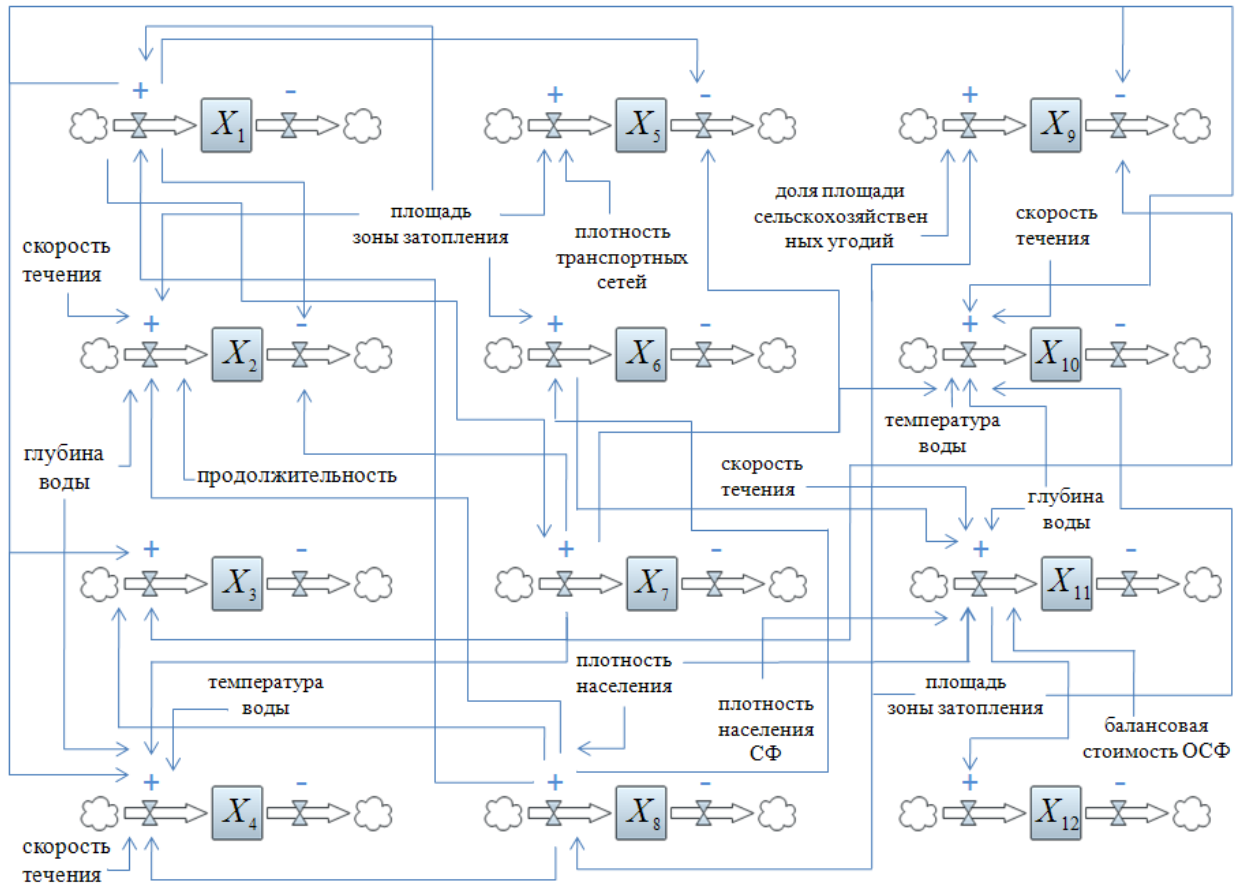


Рис. 1. Ориентированный граф причинно-следственных связей

$$\begin{cases}
 \frac{dX_1(t)}{dt} = f_1^+(S(t), X_5(t)), \\
 \frac{dX_2(t)}{dt} = f_2^+(F(t), G(t), S(t), X_8(t), t) - f_2^-(X_1(t), X_7(t)), \\
 \frac{dX_3(t)}{dt} = f_3^+(X_8(t), X_1(t), X_7(t)), \\
 \frac{dX_4(t)}{dt} = f_4^+(F(t), G(t), T(t), X_8(t), X_7(t), X_1(t)), \\
 \frac{dX_5(t)}{dt} = f_5^+(A(t), S(t)) - f_5^-(X_1(t), X_7(t)), \\
 \frac{dX_6(t)}{dt} = f_6^+(S(t), X_8(t)), \\
 \frac{dX_7(t)}{dt} = f_7^+(X_1(t)), \\
 \frac{dX_8(t)}{dt} = f_8^+(D(t), S(t)) - f_8^-(X_4), \\
 \frac{dX_9(t)}{dt} = f_9^+(I(t), S(t)) - f_9^-(X_1(t), X_7(t)), \\
 \frac{dX_{10}(t)}{dt} = f_{10}^+(F(t), G(t), T(t), S(t), X_1(t), X_7(t)), \\
 \frac{dX_{11}(t)}{dt} = f_{11}^+(F(t), G(t), S(t), X_6, D(t), P, C), \\
 \frac{dX_{12}(t)}{dt} = f_{12}^+(X_{11}),
 \end{cases} \quad (2)$$

где  $A(t)$  – плотность транспортных сетей в зоне затопления;  $D(t)$  – плотность населения;  $F(t)$ ,  $G(t)$ ,

$T(t)$  – средняя скорость течения, глубина и температура воды, соответственно;  $I(t)$  – доля площади сельскохозяйственных угодий;  $S(t)$  – площадь зоны затопления. Если  $A(t)$ ,  $F(t)$ ,  $G(t)$ ,  $T(t)$ ,  $D(t)$  и  $I(t)$  не значительно меняются с течением времени, то можно считать их константами.

### Построение функциональных зависимостей

$f_i^+$  и  $f_i^-$

Как правило, функции  $f_i^{+/-}$ ,  $i = \overline{1,12}$  представляют собой полиномы не высоких степеней, коэффициенты которых определяются по статистическим данным на этапе адаптации разработанного математического обеспечения к особенностям функционирования моделируемого объекта. При отсутствии статистически значимой информации, необходимой для расчета  $f_i^{+/-}$ ,  $i = \overline{1,12}$  предлагается пользоваться соответствующими зависимостями, определенными исходя из анализа опыта специалистов [6-8] и физического смысла

решаемой задачи, и представленные в табл. 1. Коэффициенты  $k_i^{+/-}$ ,  $i = \overline{1,12}$  определяются на этапе адаптации модели к объекту исследования, посредством вычислительного эксперимента.

Таблица 1

Аналитический вид функций $f_i^+$ , $f_i^-$	
$f_1^+$	$\begin{cases} k_1 \sqrt{S(t)X_8}, S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$
$f_2^+$	$\begin{cases} k_2 F(t)G(t)t\sqrt[3]{S(t)X_8}, S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$
$f_3^+$	$k_3 \frac{X_8 X_1}{X_7}$
$f_4^+$	$k_4 \frac{F(t)G(t)T(t)X_8}{X_7 X_1}$
$f_5^+$	$\begin{cases} k_5 A(t)S(t), S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$
$f_6^+$	$\begin{cases} k_6 S(t)^{0.5} X_8^{0.1}, S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$
$f_7^+$	$k_7 X_1$
$f_8^+$	$\begin{cases} k_8 D(t)S(t), S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$
$f_9^+$	$\begin{cases} k_9 I(t)S(t), S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$
$f_{10}^+$	$\begin{cases} k_{10} \frac{F(t)G(t)T(t)S(t)}{X_1 X_7}, S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$
$f_{11}^+$	$\begin{cases} k_{15} \frac{CD(t)G(t)F(t)X_6(t)}{S(t)P}, S(t) > \varepsilon \\ 0, S(t) \leq \varepsilon \end{cases}$
$f_{12}^+$	$k_{16} X_{11}$
$f_5^-$	$k_{12} X_1 X_7$
$f_2^-$	$k_{11} X_1 X_7$
$f_8^-$	$k_{13} X_4$
$f_9^-$	$k_{14} X_1 X_7$

По мере накопления статистики по объекту исследования можно перейти (при необходимости) к выражению в виде полинома. Основной сложностью построения таких полиномов является тот факт, что функциональные зависимости  $f_i^{+/-}$  могут являться многомерными функциями.

Для устранения вышеуказанной сложности рассмотрим альтернативный способ построения функций  $f_i^+$  и  $f_i^-$ , представленный в [9, 10].

Предположим, что функциональные зависимости  $f_i^{+/-}(F_1, \dots, F_n) = k_i^+ \prod_j^m f_i^{F_j}(F_j)$ , где зависимости  $f_i^{F_j}$

можно представить в виде полиномов, которые строятся экспертами в данной области на основе анализа статистических данных, а коэффициенты  $k_i^{+/-}$ ,  $i = \overline{1,12}$  определяются на этапе адаптации модели к объекту исследования.

Таким образом, функциональные зависимости  $f_i^+$  и  $f_i^-$  из системы (2) имеют вид, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Аналитический вид функций $f_i^+$ , $f_i^-$	
$f_1^+$	$k_1^+ f_1^S(S(t)) f_1^{X_8}(X_8(t))$
$f_2^+$	$k_2^+ F(t)G(t) f_2^S(S(t)) f_2^{X_8}(X_8(t))$
$f_2^-$	$k_2^- f_2^{X_1}(X_1(t)) f_2^{X_7}(X_7(t))$
$f_3^+$	$k_3^+ f_3^{X_8}(X_8(t)) f_3^{X_1}(X_1(t)) f_3^{X_7}(X_7(t))$
$f_4^+$	$k_4^+ F(t)G(t)T(t) f_4^{X_8}(X_8(t)) f_4^{X_7}(X_7(t)) f_4^{X_1}(X_1(t))$
$f_5^+$	$k_5^+ A(t) f_5^S(S(t))$
$f_5^-$	$k_5^- f_5^{X_1}(X_1(t)) f_5^{X_7}(X_7(t))$
$f_6^+$	$k_6^+ f_6^S(S(t)) f_6^{X_8}(X_8(t))$
$f_7^+$	$k_7^+ f_7^{X_1}(X_1(t))$
$f_8^+$	$k_8^+ D(t) f_8^S(S(t))$
$f_8^-$	$k_8^- f_8^{X_4}(X_4)$
$f_9^+$	$k_9^+ I(t) f_9^S(S(t))$
$f_9^-$	$k_9^- f_9^{X_1}(X_1(t)) f_9^{X_7}(X_7(t))$
$f_{10}^+$	$k_{10}^+ F(t)G(t)T(t) f_{10}^S(S(t)) f_{10}^{X_1}(X_1(t)) f_{10}^{X_7}(X_7(t))$
$f_{11}^+$	$k_{11}^+ PCF(t)G(t)D(t) f_{11}^S(S(t)) f_{11}^{X_6}(X_6(t))$
$f_{12}^+$	$k_{12}^+ f_{12}^{X_{11}}(X_{11}(t))$

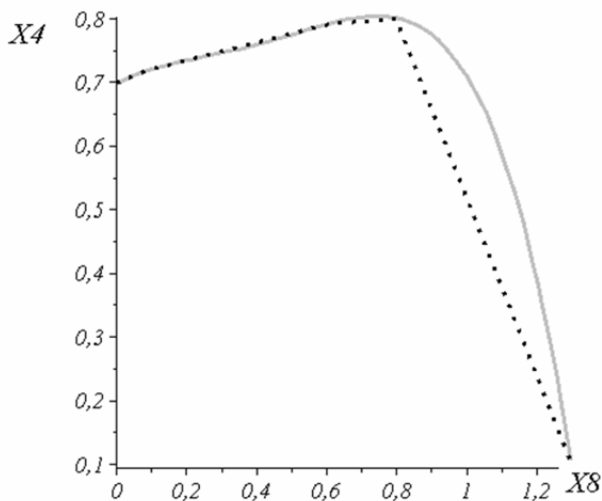
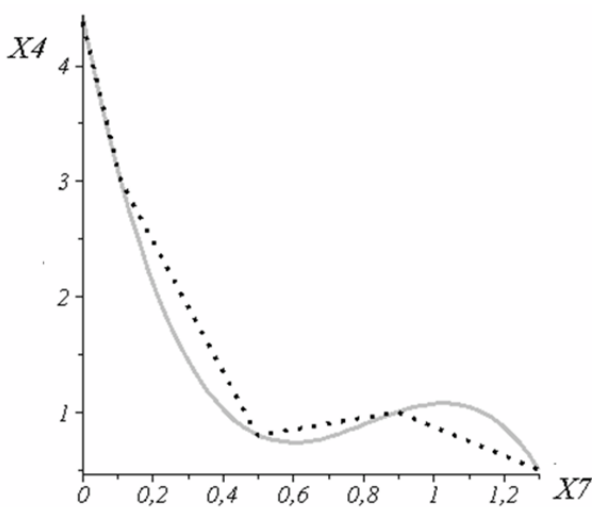
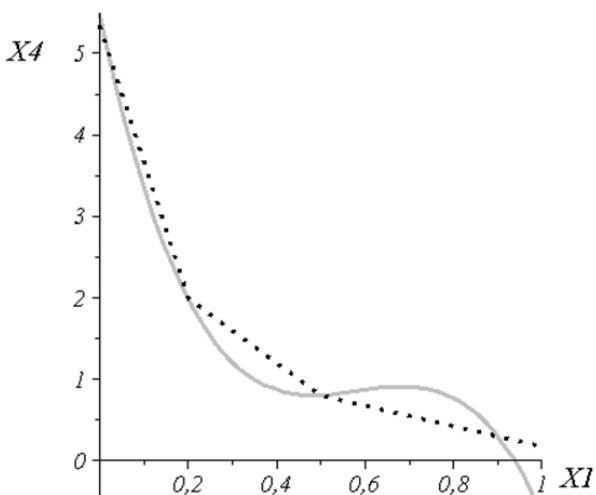
Для определения функциональных зависимостей  $f_j^{X_i}$  и  $f_j^S$ , на основе статистических данных, экспертами или разработчиками математического обеспечения, строятся кусочно-линейные функции, которые как показывает практика, могут быть аппроксимированы полиномами. Так, например, зависимости  $f_4^{X_8}$ ,  $f_4^{X_7}$ ,  $f_4^{X_1}$  имеют вид следующих полиномов:  
 $f_4^{X_8}(X_8) = -1.26X_8^4 + 1.9X_8^3 - 0.95X_8^2 + 0.32X_8 - 0.7$ ;  
 $f_4^{X_8}(X_7) = -0.42X_7^4 - 7.2X_7^3 + 19.3X_7^2 - 15.1X_7 + 4.4$ ;  
 $f_4^{X_8}(X_1) = -24.3X_1^3 + 43.9X_1^2 - 25.24X_1 + 5.49$ .

Графики аппроксимирующих полиномов и кусочно-линейных функций зависимостей  $f_4^{X_8}$ ,  $f_4^{X_7}$ ,  $f_4^{X_1}$  приведены на рис. 2а-2в для нормированных характеристик  $X_i^N = \frac{X_i}{X_i^{\max}}$ ,  $i = \overline{1,12}$ .

Таблица 3

Аналитический вид функций  $f_i^{X_i}$ ,  $f_i^S$ 

$f_1^S$	$7.8 \times 10^{-9} S^3 - 0.23 \times 10^{-4} S^2 + 0.022 S - 5.55$
$f_1^{X_8}$	$-41.6 X_8^5 + 181.4 X_8^4 - 268.6 X_8^3 + 155.6 X_8^2 - 27.7 X_8 + 1.43$
$f_2^S$	$-5.99 \times 10^{-9} S^3 + 0.16 \times 10^{-4} S^2 - 0.01 S + 2.8$
$f_2^{X_8}$	$-14.5 X_8^2 + 22.5 X_8 - 3.3$
$f_2^{X_1}$	$0.573 X_1^2 + 2.276 X_1 + 0.046$
$f_2^{X_7}$	$-3.335 X_7^2 + 5.63 X_7 - 0.126$
$f_3^{X_8}$	$3.28 X_8^2 - 23.3 X_8 + 12.3$
$f_3^{X_7}$	$-0.33 X_7^2 + 2.2 X_7 - 0.26$
$f_3^{X_1}$	$-1.26 X_1^2 + 10.1 X_1 - 17.8$
$f_4^{X_8}$	$-1.26 X_8^4 + 1.9 X_8^3 - 0.95 X_8^2 + 0.316 X_8 - 0.7$
$f_4^{X_7}$	$-0.42 X_7^4 - 7.2 X_7^3 + 19.3 X_7^2 - 15.1 X_7 + 4.4$
$f_4^{X_8}$	$-24.3 X_1^3 + 43.9 X_1^2 - 25.24 X_1 + 5.49$
$f_5^S$	$9.9 \times 10^{-7} S^2 + 0.16 \times 10^{-4} S^2 - 0.94 \times 10^{-3} S + 0.526$
$f_5^{X_1}$	$0.22 X_1^2 - 0.5 X_1 + 0.3$
$f_5^{X_7}$	$-0.3 X_7^2 + 1.1 X_7 + 0.26$
$f_6^S$	$1.9 \times 10^{-7} S^2 + 0.57 \times 10^{-3} S + 0.48$
$f_6^{X_8}$	$-0.05 X_8^3 + 0.9 X_8^2 - 0.023 X_8 + 0.23$
$f_7^{X_1}$	$9.5 X_1^4 - 12.8 X_1^3 + 3.6 X_1^2 + 1.22 X_1$
$f_8^S$	$1.8 \times 10^{-9} S^3 - 0.64 \times 10^{-5} S^2 + 0.77 \times 10^{-2} S + 1.77$
$f_8^{X_4}$	$2.2 X_4^2 - 0.0024 X_4 + 0.17$
$f_9^S$	$4.43 \times 10^{-12} S^4 - 1.66 \times 10^{-8} S^3 + 0.21 \times 10^{-4} S^2 + 0.01 S + 1.85$
$f_9^{X_1}$	$-1.45 X_1^2 + 2.56 X_1^2 - 0.097 X_1$
$f_9^{X_7}$	$1.5 X_7^3 - 1.8 X_7^2 + 0.93 X_7 - 0.024$
$f_{10}^S$	$-1.13 \times 10^{-9} S^3 + 0.14 \times 10^{-4} S^2 + 0.025 S + 12.5$
$f_{10}^{X_1}$	$0.25 X_1^3 - 1.24 X_1^2 + 2.04 X_1 - 0.049$
$f_{10}^{X_7}$	$10.9 X_7^3 - 26.6 X_7^2 + 16.7 X_7 - 0.515$
$f_{11}^{X_6}$	$-3.5 X_6^3 + 7.8 X_6^2 - 2.7 X_6 + 0.25$
$f_{11}^S$	$-1.6 \times 10^{-11} S^3 + 1.1 \times 10^{-7} S^2 + 0.12 \times 10^{-3} S + 0.04$
$f_{12}^{X_{11}}$	$-45.5 X_{11}^4 + 111.95 X_{11}^3 - 84.1 X_{11}^2 + 20.04 X_{11}$

Рис. 2а. График аппроксимирующего полинома  $f_4^{X_8}$ Рис. 2б. График аппроксимирующего полинома  $f_4^{X_7}$ Рис. 2в. График аппроксимирующего полинома  $f_4^{X_1}$ 

В табл. 3 представлены построенные полиномы остальных функциональных зависимостей  $f_j^{X_i}$  и  $f_j^S$ .

### Оценка адекватности модели

Оценка адекватности была проведена по методике [11]. Для выяснения степени соответствия модели реальным результатам использовались данные по наводнению в Приморье, произошедшем в августе 2001 года и наблюдаемом в течение четырех суток. Реальные характеристики последствий этого наводнения сравнивались с результатами, полученными из решения системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка (2).

Уравнения системы (2) при  $t > 0$  и при начальных условиях  $t_0 = 1$ ,  $X_i(t_0) = X_{i0}$ ,  $i = \overline{1,10}$  представляют собой задачу Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Выполнение следующих условий, обеспечивает существование и единственность решения этой задачи:

- функции  $f_i^+ - f_i^-$ ,  $i = \overline{1,10}$  непрерывны в замкнутой области  $\Omega = \{|t - t_0| \leq a; |X_i - X_i^0| \leq b; i = \overline{1,10}\}$ ;

- функции  $f_i^+ - f_i^-$ ,  $i = \overline{1,10}$  удовлетворяют условию Липшица в области  $\Omega$ .

Система уравнений (2) решается при начальных условиях  $t_0 = 1$ ,  $X_i(t_0) = X_{i0}$ ,  $i = \overline{1,10}$ . Для удобства представления результатов решения системы (2), исследуемые характеристики нормированы относительно максимальных значений  $X_i^N = \frac{X_i}{X_{i \max}}$ .

На рис. 3а представлены результаты решения системы уравнений (2) с учетом табл. 1, в свою очередь, на рис. 3б представлены решение системы (2) с учетом представления функций  $f_i^+$  и  $f_i^-$  в виде произведения полиномов из табл. 2, 3. Возрастание значений характеристик связано с увеличением площади зоны затопления, пик которого приходится на четвертый день наводнения.

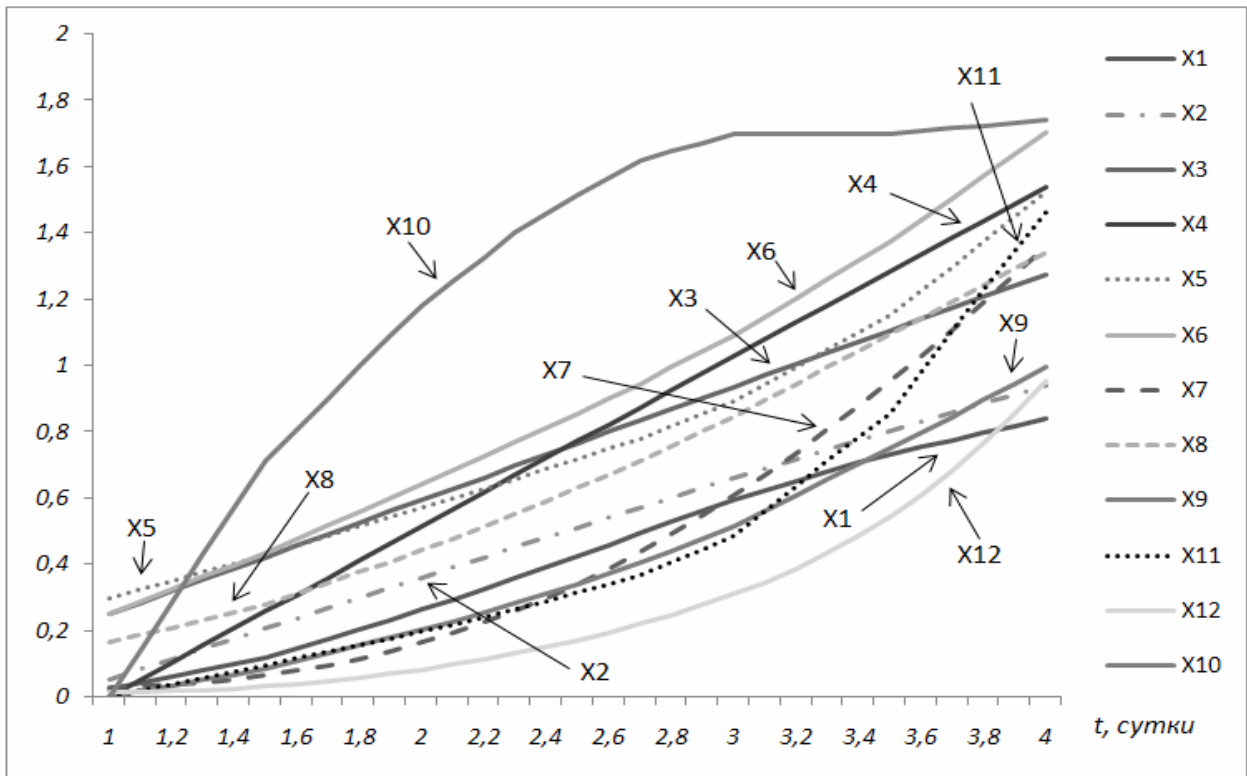


Рис. 3а. Результаты прогнозирования моделируемых характеристик с учетом функций из табл. 1

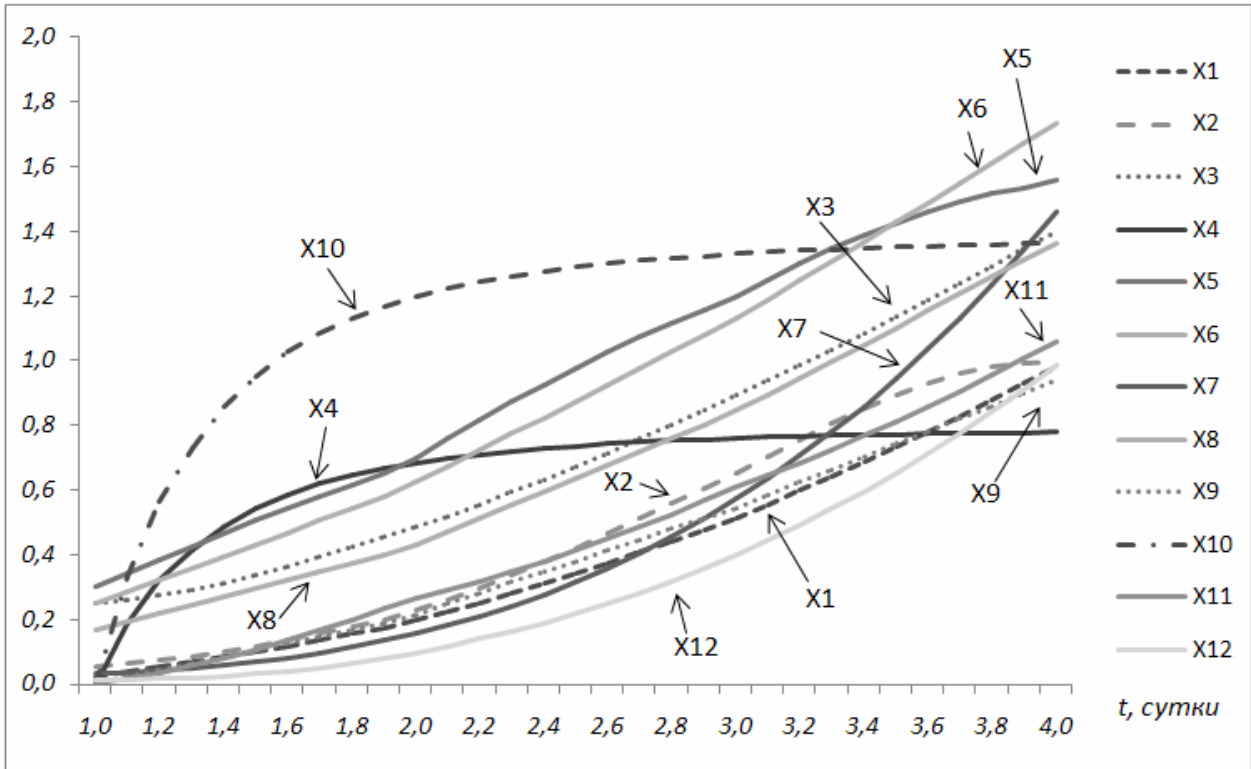


Рис. 36. Результаты прогнозирования моделируемых характеристик с учетом функций из табл. 2, 3

Для сравнения полученных по модели (2) результатов с реальными данными были построены на основе этих результатов многочлены Лагранжа  $L_1(X_i^N(t))$  и  $L_2(X_i^N(t))$ ,  $i = \overline{1,12}$ . Для реальных данных характеристик также были построены полиномы Лагранжа  $L(Y_i^N(t))$ ,  $i = \overline{1,12}$ . Для визуализации результатов сравнения были построены графики интерполяционных полиномов. Например, на рис. 4 представлено сравнение графиков полиномов  $L_1(X_3^N(t))$ , построенного на основе решения системы (2) с учетом функций из табл. 1 для характеристики  $X_3^N$ ,  $L_2(X_3^N(t))$ , построенного на основе решения системы (2) с учетом представления функций в виде произведения многочленов, и  $L(Y_3^N(t))$ , построенного на основе нормированных показателей  $Y_3^N(t)$  реальных данных наводнения. Как видно из рис. 4, графики полиномов  $L_1(X_3^N(t))$  и  $L_2(X_3^N(t))$  незначительно отклоняются от графика полинома  $L(Y_3^N(t))$ , что подтверждают результаты, представленные в табл. 4.

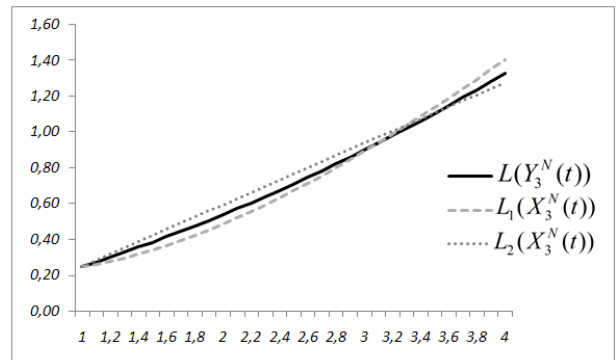


Рис. 4. Сравнение графиков полиномов  $L_1(X_3^N(t))$ ,  $L_2(X_3^N(t))$  и  $L(Y_3^N(t))$

Для определения погрешности моделирования воспользуемся формулами средних значений относительных погрешностей

$$\Delta_{1cp}^{X_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|L_1(X_i^N(t_j)) - L(Y_i^N(t_j))|}{L_1(X_i^N(t_j))} 100\%,$$

$$\Delta_{2cp}^{X_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|L_2(X_i^N(t_j)) - L(Y_i^N(t_j))|}{L_2(X_i^N(t_j))} 100\%, \quad i = \overline{1,12}.$$

В табл. 4 представлены средние значения относительных погрешностей результатов прогнозирования модели (2) с учетом табл. 1 и табл. 2, 3 соответственно.



Таблица 4

Сравнение средних значений относительных погрешностей												
$X_i^N$	$X_1^N$	$X_2^N$	$X_3^N$	$X_4^N$	$X_5^N$	$X_6^N$	$X_7^N$	$X_8^N$	$X_9^N$	$X_{10}^N$	$X_{11}^N$	$X_{12}^N$
$\Delta_{1cp}^{X_i}$	16%	14%	6%	12%	11%	2%	14%	14%	5%	3%	15%	14%
$\Delta_{2cp}^{X_i}$	20%	19%	5%	20%	18%	1%	10%	11%	7%	20%	16%	14%

Анализ приведенных в таблице погрешностей показывает, что характеристики, рассчитанные в результате применения разработанной модели (2), незначительно отличаются от их реальных значений. Указанные погрешности являются вполне допустимыми для моделей прогнозирования последствий наводнения, что позволяет утверждать, что разработанная модель адекватна.

### Заключение

Разработана математическая модель, обеспечивающая получение прогнозных значений основных характеристик наводнений, необходимых для разработки эффективных комплексов мероприятий по минимизации ущерба от них. Проведены вычислительные эксперименты, результаты которых подтверждают адекватность предложенной математической модели. Полученные результаты могут быть использованы при разработке информационно-советующей системы для оперативно-диспетчерского персонала МЧС.

Работа поддержана РФФИ, грант 16-01-00536

### Литература

1. Авакян, А.Б. Наводнения. Концепция защиты / А.Б. Авакян // Известия РАН. Сер. географическая. – 2000. – № 5. – С. 40–46.
2. Анализ эффективности природо-восстановительных проектов в эколого-экономической системе «Волжская ГЭС – Волго-Ахтубинская пойма» / А. А. Воронин, А. А. Васильченко, С. С. Храпов, Е. О. Агафонникова // Управление большими системами.– М.: ИПУ РАН, – 2014. Вып. 52. – С. 133–147.
3. Хамутова, М. В. Модель для прогнозирования последствий наводнений, вызванных половодьями и паводками / М.В. Хамутова, В.А. Кушников // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. Т. 4. № 1 (81). С. 131-137.

4. Хамутова, М.В. Математическая модель прогнозирования последствий наводнений / М.В. Хамутова, В.А. Кушников // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 3. С. 109-114.

5. Информационно-управляющая система для поддержки принятия решения по ликвидации последствий наводнения / В.В. Клюев, А.Ф. Резчиков, В.А. Кушников, А.С. Богомолов, В.А. Иващенко, Л.Ю. Филимонок, М.В. Хамутова // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 11 (149). С. 39-45.

6. ГОСТ 22.0.06-97/ГОСТ Р 22.0.06-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники природных чрезвычайных ситуаций. Поражающие факторы. Номенклатура параметров поражающих воздействий (принят Постановлением Госстандарта РФ от 20.06.1995 № 308).

7. РД 153-34.2-002-01. Временная методика оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнического сооружения (принят Приказом Минэнерго России от 26 апреля 2001 г. № 130).

8. Федянин, В.И. Организация и ведение аварийно-спасательных и других неотложных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций природного характера: учеб. пособие / В.И. Федянин, Ю.Е. Проскурников. - Воронеж: ВГТУ, 2006. Ч. 1. 469 с.

9. Бродский, Ю. И. Лекции по математическому и имитационному моделированию / Ю.И. Бродский. - М. - Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 240 с.

10. Белотелов, Н.В. Сложность. Математическое моделирование. Гуманитарный анализ: Исследование исторических, военных, социально-экономических и политических процессов / Н.В. Белотелов, Ю.И. Бродский, Ю.Н. Павловский; предисл. Г.Г. Малинецкого. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 320 с.

11. Модели и алгоритмы мониторинга глобальной безопасности на основе деревьев событий / В.В. Клюев, В.Б. Байбурун, А.Ф. Резчиков, В.А. Кушников, А.С. Богомолов, Л.Ю. Филимонок // Контроль. Диагностика. 2015. № 8. С. 70-74.

Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

## MODELING OF FLOODS' CONSEQUENCES ON THE BASIS OF FORRESTER'S CAUSE-AND-EFFECT SYSTEMS AND SYSTEM DYNAMICS APPROACH

<sup>1</sup>A.F. Rezchikov, <sup>2</sup>V.A. Kushnikov, <sup>3</sup>V.A. Ivaschenko, <sup>4</sup>A.S. Bogomolov, <sup>5</sup>L.Yu. Filimonyuk, <sup>6</sup>M.V. Khamutova

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russian Federation

e-mail: [iptmuran@san.ru](mailto:iptmuran@san.ru)

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences, Rector, Saratov, Russian Federation

[e-mail: iptmuran@san.ru](mailto:iptmuran@san.ru)

<sup>3</sup>Full Doctor, Academic Secretary, Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russian Federation

[e-mail: iptmuran@san.ru](mailto:iptmuran@san.ru)

<sup>4</sup>PhD, Associate Professor, Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russian Federation

[e-mail: alexbogomolov@ya.ru](mailto:alexbogomolov@ya.ru)

<sup>5</sup>PhD, Researcher, Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russian Federation

[e-mail: iptmuran@san.ru](mailto:iptmuran@san.ru)

<sup>6</sup>Postgraduate Student of the Department of Mathematical Cybernetics and Computer Sciences, Saratov National State Research University named after N. G. Chernyshevskiy, Saratov, Russian Federation

[e-mail: mariuka7d@rambler.ru](mailto:mariuka7d@rambler.ru)

On the basis of system dynamics, which takes into account the causal relationships between the modeled variables, a mathematical model is developed to forecast the characteristics of floods. The graph of cause-effect relations that exist between the modeled characteristics and presented system of nonlinear differential equations was constructed. Functional inter-dependencies of the right-hand parts of the system of equations were determined on the basis of the existing experience of specialists. They are also reviewed as a polynomials derivative. Numerical solution of the system of equations was obtained using the Runge-Kutta method. Computational experiments, allowing for different time intervals to determine the modeled characteristics were conducted. The comparison of the characteristics of different representations of the right-hand side of the system of differential equations calculated using the model, with their real values of the Primorski Krai's floods, which erupted in August 2001, confirms the adequacy of the mathematical model applied. The results of the model can be used in the development of the information forecasting systems of the flood effects for operating and dispatching personnel of the EMERCOM

Key words: mathematical model, system dynamics, forecasting of floods' consequences

## References

1. Avakjan A.B. Navodnenija. "The concept of protection", Floods, *Izvestiya RAN, Seriya Geograficheskaya*, 2000, no. 5, 40–46 pp.
2. Voronin A.A., Vasil'chenko A.A., Hrapov S.S., Agafonnikova E.O. "Efficiency analysis for nature restoration projects in ecologo-economic system of Volga Hydro-Electrical Station and Volga-Akhtuba Floodplain", *Large-scale Systems Control*, Issue 52, Moscow, IPU RAN, 2014, 133–147 pp.
3. Hamutova M.V., Kushnikov V.A. "A model for forecasting flood effects caused by snowmelt and rain floods", *The Bulletin of Saratov State Technical University*, Saratov, 2015, no. 4 (81), 131-137 pp.
4. Khamutova M.V., Kushnikov V.A. "Mathematical model for forecasting of flood effects", *Bulletin of the Astrakhan State Technical University, (Management, Computer Science and Informatics Series*, Saratov, 2016, no. 3, 109-114 pp.
5. Kljuev V.V., Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Bogomolov A.S., Ivashhenko V.A., Filimonjuk L.Ju. M.V., Khamutova M.V. "Informational-control system for decision-making supply during elimination of floods' consequences", *Vestnik komp'uternykh i informatsionnykh tekhnologii (Herald of computer and information technologies)*, 2016. № 11 (149), 39-45 p.
6. GOST 22.0.06-97/GOST R 22.0.06-95. "Safety in Emergency Situations: the sources of natural emergency situations. Destructive factors. Distinctive features of destructive effects" ("Bezopasnost' v chrezvychajnyh situacijah. Istochniki prirodnyh chrezvychajnyh situacij. Porazhajushhie faktory. Nomenklatura parametrov porazhajushhij vozdejstvij"), *State Standard Committee of the Russian Federation Regulation*, 1995, no. 308.
7. RD 153-34.2-002-01. "Time Management Methodology Applied to the Assessment of Damage caused by the Accident Emergency at the Water construction" ("Vremennaja metodika ocenki ushherba, vozmozhnogo vsledstvie avarii gidrotehnicheskogo sooruzhenija"), *Regulation of the Ministry of Energy of the Russian Federation*, April, 2001, no. 130.
8. Fedianin V. I., Proskurnikov Ju. E. "Logistics and implementation of rescue and other emergency operations in emergency situations of natural origin" ("Organizatsiia i vedenie avariino-spatel'nykh i drugikh ne-otlozhnykh rabot pri likvidatsii chrezvychajnykh situatsii prirodnogo kharaktera"), Voronezh, Bulletin of the Voronezh State University, 2006, part 1, 469 p.
9. Brodskij Ju.I. "Lectures on mathematical and simulation modeling" ("Lekcii po matematicheskomu i imitacionnomu modelirovaniju"), Moscow-Berlin, Direkt-Media, 2015, 240 p.
10. Belotelov N.V., Brodskij Ju.I., Pavlovskij Ju.N. ("The Complexity. Mathematical modeling. Humanitarian analysis: the Study of the historical, military, socio-economic and political processes" ("Matematicheskoe modelirovanie. Gumanitarnyj analiz: Issledovanie istoricheskij, voennyh, social'no-jekonomicheskij i politicheskij processov"), Moscow, «LIBROKOM» Publishing House, 2009, 320 p.
11. Kljuev V.V., Bajburin V.B., Rezchikov A.F., Kushnikov V.A., Bogomolov A.S., Filimonjuk L.Ju. "Models and algorithms for the global security monitoring based on the current events development" ("Modeli i algoritmy monitoringa global'noj bezopasnosti na osnove raztastayuschikhsya sobytij"), *Testing. Diagnostics*, 2015, no. 8, 70-74 pp.

## АНАЛИЗ НЕЙРОСЕТЕВОЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

С.А. Ткалич, О.Ю. Таратынов

Постановкой задачи в статье является сравнение результатов прогноза нейросетевой и термодинамической моделей в рамках общей концепции безаварийного управления потенциально опасными технологическими процессами. Для создания нейросетевой модели используется нечеткая логика, которая приближает искусственные процедуры прогнозирования к реакциям живого организма. Обучение происходит методом обратного распространения ошибок с помощью алгоритма LM. Обучающая выборка формируется случайным образом. Входными переменными в термодинамической модели являются данные наблюдений за процессом, представляемые как броуновские функции. Для оценки работы термодинамической модели используется показатель Херста. Приведены результаты сравнительного анализа нейросетевой и термодинамической моделей прогнозирования аварийных ситуаций. При этом на одном графике сравнивается функция степени близости к аварийной ситуации нейросетевой модели и функция состояния процесса термодинамической модели. При количественной оценке прогнозирующих свойств моделей сравнивается время, когда функция степени близости к аварийной ситуации приближается к значению равному единице, и момент времени, когда показатель Херста достигает уровня 0,5. Относительная погрешность прогнозируемого времени наступления аварийной ситуации моделей составляет 0,645 %. Сделан вывод о возможности использования нейросетевой и термодинамической моделей совместно в составе композиционной модели прогнозирования аварийных ситуаций

Ключевые слова: нейронная сеть, термодинамическая модель, прогнозирование, аварийные ситуации

### Постановка задачи

Эффективным представляется создание диагностических экспертных систем предельного быстродействия, использующих в качестве основного инструмента простейшие структуры продукционных форм [1].

Использование методов распознавания текущей ситуации с помощью экспертных систем принятия решения в целом, и системы прогнозирования аварийных ситуаций в частности, позволяет не только заранее выявить приближение к аварийной ситуации, но и дает значительный выигрыш во времени, необходимый для развертывания мер предотвращения аварийных ситуаций. В работе [2] представлен пример, когда в производстве синтетических каучуков лингвистическая система прогнозирования формирует сигнал о возможной аварии за 7 минут до срабатывания промышленных средства противоаварийной защиты.

При этом следует учитывать и тот факт, что быстродействие в современных условиях обеспечивается, в том числе, и показателями технических средств, имеющих тенденцию к стремительному прогрессированию.

Для достижения наиболее точных прогнозов аварийных ситуаций целесообразно использование композиционной структуры модели, самостоятельными компонентами которой являются также нейросетевая и термодинамическая составляющие [3, 4].

Естественной постановкой задачи при этом является желание сравнить результаты прогноза нейросетевой и термодинамической моделей в

рамках общей концепции безаварийного управления потенциально опасными технологическими процессами [5]. Проведем сравнительный анализ этих компонентов.

### Структура нейросетевой модели

Сопоставление возможностей биологических и искусственных нейросетей в решении задач прогнозирования показывает необходимость более детального поиска таких альтернатив биологического прототипа, как свойство гомеостазиса и распределенности памяти [6].

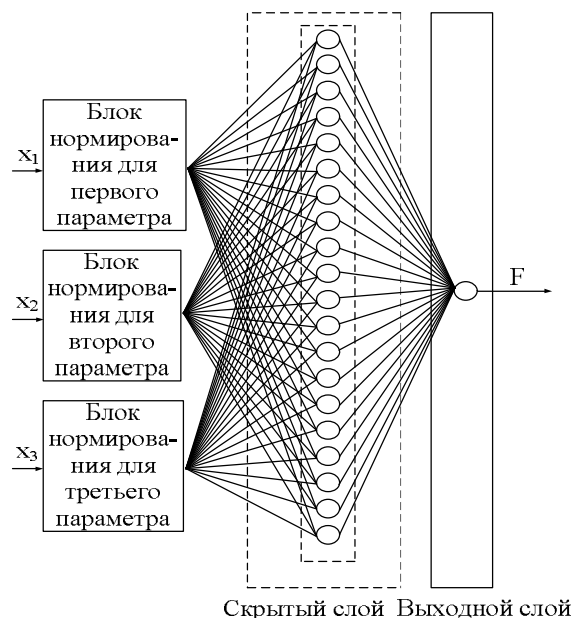


Рис. 1. Общая структура нейросетевой модели:  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – значения параметров технологического процесса;  $F$  – функция степени близости к аварийной ситуации

Ткалич Сергей Андреевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел.8 (473) 243-77-20, e-mail: sergeytkalich@mail.ru  
Таратынов Олег Юрьевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 243-77-20, e-mail: otaratynov@mail.ru

Рассмотрим нейросетевую модель прогнозирования аварийной ситуации (НМ ПАС),

предложенную в работе [7], имеющую структуру, показанную на рис. 1.

Согласно алгоритма модели (рис. 2) происходит формирование обучающей выборки. На вход блока формирования обучающей выборки поступают данные о процессе и информация о номинальных и предельных значениях параметров. В этом блоке с помощью генератора случайных чисел происходит формирование обучающей выборки исходя из номинальных и предельных значений параметров. Обучающая выборка формируется случайным образом. Далее в следующем блоке происходит задание вектора входа  $p$  и вектора желаемых (целевых) значений сигнала  $t$  для разрабатываемой НМ ПАС.

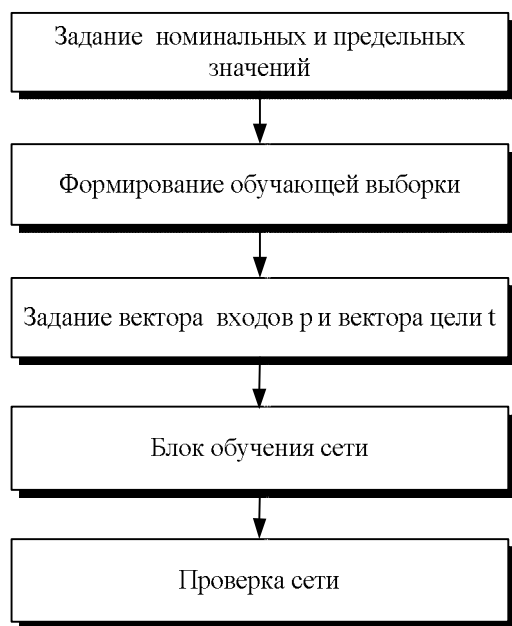


Рис. 2. Алгоритм НМ ПАС

Обучение происходит методом обратного распространения ошибок с помощью алгоритма LM Левенберга – Марквардта [8].

Алгоритм LM Левенберга - Марквардта реализует следующую стратегию для оценки матрицы Гессе. В предположении, что функционал определяется как сумма квадратов ошибок, что характерно при обучении нейронных сетей с прямой передачей, гессиан может быть приближенно вычислен как

$$H \approx J^T J, \quad (1)$$

где  $J = \delta J / \delta W$  - матрица Якоби производных функционала ошибки по настраиваемым параметрам;  $H$  - матрица вторых частных производных целевой функции, или матрица Гессе.

Градиент рассчитан по формуле

$$g = J^T e, \quad (2)$$

где  $e$  - вектор ошибок сети.

Матрица Якоби может быть вычислена на основе стандартного метода обратного распространения ошибки, что существенно проще вычисления матрицы Гессе.

Алгоритм LM использует аппроксимацию гессиана следующего вида:

$$x_{k+1} = x_k - (J^T J + \mu I)^{-1} J^T e_k, \quad (3)$$

где  $x_k$  - вектор значений параметров на  $k$ -й итерации.

Когда коэффициент  $\mu$  равен 0, мы получаем метод Ньютона с приближением гессиана в формуле (1). Когда значение  $\mu$  велико, получаем метод градиентного спуска с маленьким шагом. Поскольку метод Ньютона имеет большую точность и скорость сходимости вблизи минимума, задача состоит в том, чтобы в процессе минимизации как можно быстрее перейти к методу Ньютона. С этой целью параметр  $\mu$  уменьшают после каждой успешной итерации и увеличивают только тогда, когда пробный шаг показывает, что функционал ошибки возрастает. Такая стратегия обеспечивает уменьшение ошибки после каждой итерации алгоритма [9].

В результате анализа формируется выходной вектор состояний. Достижение вектором границы хотя бы по одному из параметров означает сбой нормального хода процесса, или наступление аварии. В этом случае функция степени близости к аварии  $F(t)$  становится равной 1. Если технологический процесс проходит в нормальном режиме и посторонние факторы, вызывающие отклонение от номинального режима работы, минимальны, то значение функции степени близости к аварийной ситуации близко к номинальному значению равному 0. Вид функции степени близости к аварии  $F(t)$  представлен на рис. 3.

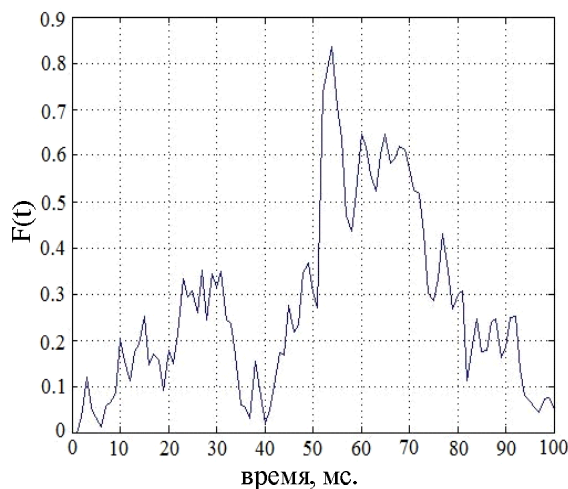


Рис. 3. Функция степени близости к аварии нейросетевой модели

### Структура термодинамической модели

Входными переменными в данной модели являются данные наблюдений за процессом, представляемые как броуновские функции [10].

Алгоритмическая структура системы идентификации и прогнозирования аварийной ситуации (СИПАС) аналогична рассмотренной в работе [11].

На первом этапе работы СИПАС производит нормирование входных величин. Значения входных параметров приводятся к одной системе отсчета, и в результате нормирования формируются новые

допустимые области параметров. Далее система проверяет принадлежность входных значений допустимым областям. Несоответствие хотя бы одного параметра указанным пределам формирует сигнал о нарушении хода технологического процесса и приближении аварийной ситуации. Если значения параметров находятся в допустимых пределах, то система начинает анализ процесса на персистентность [12].

Для оценки работы термодинамической модели используется показатель Херста  $H$ . Текущее значение показателя сравнивается с числом 0,5. Это значение является границей в определении персистентного и управляемого процесса. Если  $H$  превышает 0,5, это означает, что процесс движется к аварийной ситуации [13].

График временной зависимости показателя Херста для функции состояния процесса представлен на рис. 4.

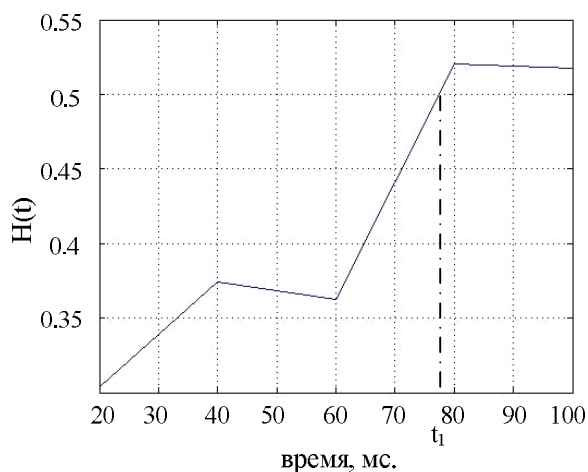


Рис. 4. Временная зависимость показателя Херста для функции состояния процесса

Для примера в качестве входных параметров специально были заданы ряды с появляющейся персистентностью. В одном из рядов зависимость между шагами увеличивалась после значения с индексом 60, в другом – после значения с индексом 70, и еще больше – после значения с индексом 85. Один из трех рядов был задан полностью антиперсистентным. На рис. 4 видно, как идентифицируемое значение  $H$  растет с увеличением времени анализа функции. Так, до момента  $t = 60$  мс показатель Херста колеблется около значения 0,37, то есть рассматриваемый процесс управляем. С момента  $t = 60$  мс наблюдается значительный рост показателя  $H$ , который становится еще заметнее с момента  $t = 75$  мс. Кривая достигает уровня 0,5 в момент времени  $t_1 = 77,5$  мс.

**Сравнение нейросетевой и термодинамической моделей по количественным и качественным показателям**

Проведем сравнение нейросетевой и термодинамической моделей. Для качественного сравнения отобразим на одном графике функцию степени близости к аварийной ситуации

нейросетевой модели и функцию состояния процесса термодинамической модели. Вид функции степени близости к аварийной ситуации и вид функции состояния процесса показаны на рис. 5.

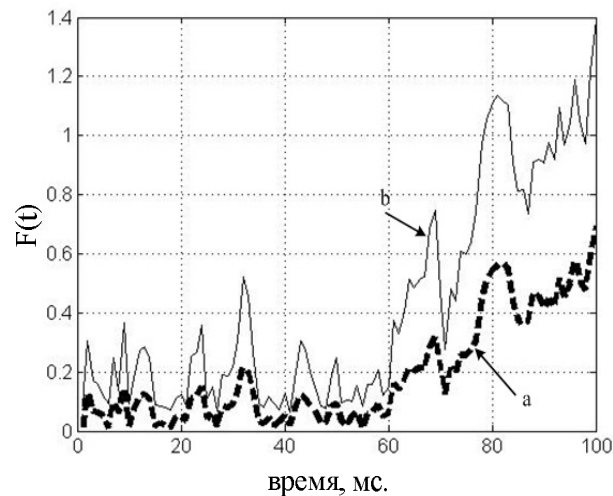


Рис. 5. Качественное сравнение нейросетевой и термодинамической моделей: а – (пунктирная линия) функция степени близости к аварии нейросетевой модели; б – (сплошная линия) функция состояния процесса термодинамической модели.

Из рисунка видно, что функция степени близости к аварии достаточно тенденциозно повторяет вид функции состояния процесса.

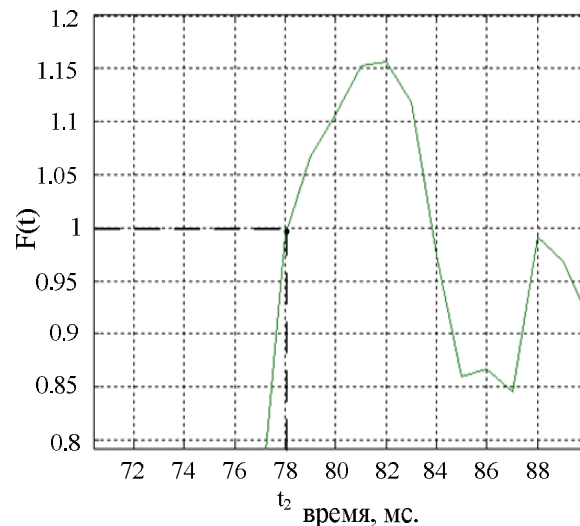


Рис. 6. Функция степени близости к аварии нейросетевой модели

Для количественной оценки прогнозирующих свойств моделей сравним время, когда функция степени близости к аварийной ситуации приближается к значению равному единице, что соответствует аварии, и момент времени, когда показатель Херста достигает уровня 0,5, что также говорит об аварийной ситуации. На рис. 6 показана функция степени близости к аварии нейросетевой модели. Момент времени перехода через единичное значение  $t_2 = 78$  мс.

Из рис. 4 и 6 видно, что прогнозируемое время наступления аварийной ситуации термодинамической модели  $t_1$  и прогнозируемое время наступления аварийной ситуации нейросетевой модели  $t_2$  очень близки. Относительная погрешность прогнозируемого времени наступления аварийной ситуации моделей составляет 0,645 %.

### Заключение

Проведенные исследования показывают, что нейросетевая и термодинамическая модели могут работать параллельно, как составляющие компоненты композиционной модели прогнозирования аварийных ситуаций.

Использование взаимодополняющих компонент имеет важное значение для точного вычисления времени запаса на предотвращение аварии  $t_{\text{запаса}}$ , как определяющего параметра интегрального критерия безаварийного управления [14].

### Литература

1. Ткалич С.А. Диагностические экспертные системы безаварийного управления технологическими процессами /С.А. Ткалич// Вестник Воронежского государственного технического университета.-2007.-Т. 3.- № 5.- С. 38-43.
2. Ткалич С.А. Лингвистическая система прогнозирования аварийных ситуаций в производстве синтетических каучуков/С.А. Ткалич // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2009.- Т. 5.- № 8.- С. 103-112.
3. Ткалич С.А. Реализация композиционной модели прогнозирования аварийных ситуаций в промышленных системах безаварийного управления /С.А. Ткалич, В.Л. Бурковский // Системы управления и информационные технологии. 2010. № 2 (40). С. 91-94.
4. Ткалич С.А. Модели принятия решений в системах управления потенциально-опасными производствами / С.А. Ткалич, В.П. Поваров, А.В. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2014.- Т. 10. -№ 5.1.- С. 129-132.

5. Ткалич С.А. Концепция безаварийного управления на основе моделей прогнозирования состояний потенциально опасных технологических процессов/ С.А. Ткалич, В.Л. Бурковский, О.Ю. Таратынов // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2016.- Т. 12.- № 6.- С. 79-86.

6. Ткалич С.А. Основания и возможности использования искусственных нейросетей в системах прогнозирования/ С.А. Ткалич, Е.М. Васильев // Электротехнические комплексы и системы управления. Воронеж: Издательский дом «Кварта», 2008. № 2(10). С.37-38.

7. Ткалич С.А. Нейросетевая модель процесса прогнозирования аварийной ситуации /С.А. Ткалич// Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3.1 (33). С.196-200.

8. Ткалич С.А. Исследование нейросетевой модели прогнозирования аварийных ситуаций процесса вулканизации /С.А. Ткалич, А.В. Бурковский, Д.В. Котов // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2010.-Т. 6.- № 7.- С. 15-19.

9. Медведев В.С. Нейронные сети MATLAB 6/ В.С. Медведев, В.Г. Потёмкин. М.: Диалог МИФИ, 2002. – 496 с.

10. Ткалич С.А. Термодинамический подход к прогнозированию аварийных ситуаций/ С.А. Ткалич // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3.1 (33). С.200-204.

11. Ткалич С.А. Определение доминирующих параметров риска в системах прогнозирования аварийных ситуаций / С.А. Ткалич // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2010. -Т. 6. -№ 1. -С. 81-84.

12. Ткалич С.А. Исследование системы прогнозирования аварийных ситуаций на базе термодинамической модели / С.А. Ткалич // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3.3 (33). С.399-403.

13. Ткалич С.А. Идентификация состояния стохастических систем / С.А. Ткалич, Е.М. Васильев // Электротехнические комплексы и системы управления. 2008. №1(9). С. 44-46.

14. Ткалич С.А. Интегральный критерий безаварийного управления технологическими процессами / С.А. Ткалич // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 4.1 (38). С. 188-191.

Воронежский государственный технический университет

## ANALYSIS OF NEURAL NETWORK AND THERMODYNAMIC MODELS FOR FORECASTING ACCIDENT SITUATIONS

S.A. Tkalic<sup>1</sup>, O.Yu. Taratynov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [sergeytkalich@mail.ru](mailto:sergeytkalich@mail.ru)

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [otaratynov@mail.ru](mailto:otaratynov@mail.ru)

The results comparison of the neural networking and thermodynamic models forecast within the framework of the general concept of accident-free control of potentially dangerous technological processes is the problem statement of the paper. A kind of obscure logic is applied to create a neural networking model that approximates artificial prediction procedures to the reactions of a living organism. Learning is conducted using the method of back propagation of errors using the LM algorithm. The training sample is generated randomly. The input variables in the thermodynamic model are the observations of the process, represented as Brownian functions. To assess the performance of the thermodynamic model, the Hurst index is used. The results of the comparative analysis of the neural networking and thermodynamic models of the prediction of accident situations are presented. Alongside, the function of the proximity to the accident situation of the neural networking model and the state function of the process of the thermodynamic model are compared on one graph. In the quantitative assessment of

predictive properties of models, the time is compared when the function of the proximity to the accident situation approaches the value equal to unity, and the time when the Hurst index reaches the level of 0.5. The relative error of the predicted time of occurrence of an accident situation for models is 0.645%. The research presumes the possibility of using both the neural networking and thermodynamic models as part of the composite model for accident situations forecasting

Key words: neural network, thermodynamic model, forecasting, accident situations

#### References

1. Tkalich S.A. "Diagnostic expert systems of accident-free management technological processes", *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2007, vol. 3, no. 5, 38-43 pp.
2. Tkalich S.A. "Linguistic system of prediction of contingency situations in production of synthetic rubbers", *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2009, vol. 5, no. 8, 103-112 pp.
3. Tkalich S.A., Burkovskij V.L. "Creating composition model of prediction of contingency situations in the production systems of accident-free management", *Control systems and information technology*, 2010, vol. 40, no. 2, 91-94 pp.
4. Tkalich S.A., Povarov V.P., Burkovskij A.V. "Decision making models in control systems of potential-dangerous productions", *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2014, vol. 10, no. 5-1, 129-132 pp.
5. Tkalich S.A., Burkovsky V. L., Taratynov O. Yu. "The concept of accident-free control based on the forecasting models of statuses potentially dangerous technological processes", *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2016, vol. 12, no. 6, 79-86 pp.
6. Tkalich S.A., Vasiliev E.M. "The background and possibilities of using artificial neural networks in forecasting systems", *Electronic and technical complexes and control systems*, 2008, no. 2, 37-38 pp.
7. Tkalich S.A. "Neural network model of process of prediction of a contingency situation", *Control systems and information technology*, 2008, vol. 33, no. 3.1., 196-200 pp.
8. Tkalich S.A., Burkovskiy A.V., Kotov D.V. "Studying neural network model of forecasting of emergency situations of vulcanization process", *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, vol. 6, no. 7, 2010, 15-19 pp.
9. Medvedev V.S., Potemkin V.G. "Neural networks MATLAB 6" ("Neyronnyye seti MATLAB 6"), Moscow, Dialogue MEFH, 2002, 496 p.
10. Tkalich S.A. "Thermodynamic approach to forecasting emergency situations", *Control Systems and Information Technology*, 2008, vol. 33, no. 3.1., 200-204 pp.
11. Tkalich S.A. "Dominant risk parameters assessment in the systems of prediction of contingency situations", *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2010, vol. 6, no. 1, 81-84 pp.
12. Tkalich S.A. "Research of the prediction of contingency situations system based on thermodynamic model", *Control Systems and Information Technology*, 2008, vol. 33, no. 3.3., 399-403 pp.
13. Tkalich S.A., Vasil'ev E.M. "Condition of stochastic systems identification", *Electronic and technical complexes and control systems*, 2008, no. 1, 44-46 pp.
14. Tkalich S.A. "Integral criterion of accident-free management of technological processes", *Control Systems and Information Technology*, 2009, vol. 38, no. 4.1., 188-191 pp.



## ЗАДАЧА ВЫБОРА СЕРВЕРНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ВИРТУАЛЬНЫХ РАБОЧИХ СТОЛОВ

Д.К. Проскурин, К.А. Маковий

Виртуализация как технологическая основа облачных технологий предоставляет значительные экономические и социальные преимущества для образовательных учреждений. Консолидация серверных ресурсов при использовании серверной виртуализации и централизованное управление рабочими местами пользователей при использовании виртуализации рабочих мест способствует переходу на новый уровень предоставления ИТ-услуг. Серверная виртуализация и виртуализация рабочих столов ставит задачу оптимизации использования ресурсов.

В статье рассматривается задача выбора аппаратного обеспечения для развертывания инфраструктуры рабочих столов. Показана возможность применения методов целочисленного программирования к проблеме размещения виртуальных машин на разнородных аппаратных серверных платформах. Предложена математическая модель выбора серверных платформ и объема памяти для размещения заданного количества виртуальных машин с заданными требованиями к оперативной памяти.

Представлены результаты решения задачи для предложенного набора моделей серверных платформ и различного числа размещаемых виртуальных машин

Ключевые слова: инфраструктура виртуальных рабочих столов, целочисленное математическое программирование, линейное программирование, стоимость оборудования

### Введение

Повышение качества образовательных услуг неразрывно связано с применением современных информационных технологий. В большинстве организаций и предприятий по всему миру, и в России, широко используется серверная виртуализация. В рамках данной технологий на одном физическом сервере выполняются несколько совершенно различных операционных систем, что позволяет изолировать приложения, оптимизировать загрузку аппаратных серверов, решить проблему совместимости различных версий программного обеспечения (ПО). Следующим шагом развития технологий серверной виртуализации является т.н. виртуализация рабочих столов, в рамках которой клиентская операционная система выполняется на сервере и доставляется на клиентское устройство при помощи специальных сетевых протоколов.

Внедрение технологии виртуализации рабочих столов очень сильно меняет всю парадигму обеспечения пользователей клиентскими рабочими местами. Для администрации это большой шаг к централизации предоставляемых услуг, улучшение контролируемости ИТ-инфраструктуры, новый уровень информационной безопасности и обеспечение защиты персональных данных. Особенно актуально такое внедрение в сфере образования. Доставка виртуальных машин на клиентское устройство пользователя решает проблему разнородного клиентского оборудования, позволяет использовать устаревшие компьютеры вуза для организации современных рабочих мест, реализовать концепцию BYOD (Bring Your Own Device – принеси свое устройство с собой), которая

стирает границы между академической и социальной жизнью студента, повышает его вовлеченность в образовательный процесс.

Как любое глобальное изменение технологии, внедрение технологии виртуализации рабочих столов (Virtual Desktop Infrastructure - VDI) – сложный процесс, который требует и финансовых, и административных, и трудовых ресурсов. Несмотря на то, что каждая организация уникальна по своей ИТ-инфраструктуре, у российских вузов много общего, и накопление опыта развертывания и использования новой технологии было бы крайне полезно для других вузов и регионов.

### Модели серверной консолидации

Суть серверной виртуализации состоит в размещении нескольких виртуальных серверных операционных систем на одном физическом сервере и одновременном их выполнении. Такая виртуализация основана на использовании так называемого гипервизора – специального ПО, предоставляющего возможность одновременной работы разных операционных систем на одном аппаратном сервере.

Из-за проблем совместимости прикладного ПО при выполнении на одной операционной системе возникла необходимость разносить значимые для бизнеса приложения на разные серверы, при этом утилизация аппаратных серверов в дата-центрах была катастрофически мала и достигала по оценкам от 20 до 30% [1]. Серверная виртуализация позволила максимально загрузить аппаратные серверы, повысив процент их утилизации. В связи с этим, серверная виртуализация рассматривается как средство консолидации серверов. Существуют две основные причины повышенного интереса к построению наиболее оптимальной модели для задачи консолидации серверов, то есть задачи такого размещения виртуальных серверов на аппаратных платформах, при котором наблюдается максимально эффективное использование

---

Проскурин Дмитрий Константинович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: pdk@vgasu.vrn.ru  
Маковий Катерина Александровна – ВГТУ, старший преподаватель, e-mail: makkatya@mail.ru



аппаратных ресурсов. Одна из них – это эффективность использования оборудования, приводящая к сокращению затрат на приобретение, развертывание, администрирование серверных платформ, и, следовательно, уменьшение общей стоимости владения (TCO- Total Cost of Ownership). Другая причина – энергосбережение. Энергопотребление крупного дата центра сопоставимо с энергопотреблением целого города, и в 10-100 раз превышает таковое на единицу площади по сравнению, например, с жилым многоэтажным домом [2]. Кроме электропитания самих серверов необходимо обеспечить еще и эффективное охлаждение помещения, поэтому поддержание работы простаивающих серверов так неэффективно и не соответствует все более популярной концепции Green Computing [3].

В настоящий момент имеется два принципиально различных подхода к решению задачи оптимизации размещения виртуальных серверов на аппаратных платформах – статический и динамический.

Статический подход в общем случае сводится к решению задачи многомерной упаковки в контейнеры или решению задачи о рюкзаке. Обе эти задачи являются NP- трудными, поэтому для их решения используются самые различные эвристические алгоритмы. В качестве исходных данных используются данные о трассировке нагрузки в реальных центрах обработки данных (ЦОДах). В основном, для демонстрации работы алгоритмов применяются системы имитационного моделирования. Статический подход подразумевает, что нагрузка на серверы, или количество и параметры виртуальных машин (VM) заранее известны и достаточно стабильны, или, по крайней мере, периодически повторяются [1,4].

Динамический подход к решению задачи оптимальной серверной консолидации основан на поддержке наиболее популярными гипервизорами, например, VMWare ESX, Xen, Linux KVM, Hyper-V технологии динамической миграции (*live migration*), позволяющей перемещать виртуальные машины «на ходу» без прерывания их работы. Для этого используется отслеживание операций записи в оперативную память и передача содержимого памяти через сеть, что, в свою очередь, требует значительных ресурсов сети и центрального процессора. Эта технология делает возможным создание алгоритмов динамического выделения ресурсов без предварительного планирования и статического назначения соответствия виртуальной машины конкретному аппаратному серверу, следовательно, такие алгоритмы будут работать в ситуации, когда нагрузка заранее неизвестна, и прекрасно подходит для сервис-провайдеров, которые предоставляют услуги виртуальных машин по запросу, то есть, IaaS (Infrastructure-as-a-Service) [2,3].

Все известные нам коммерческие и *open-source* реализации базируются на некотором контроллере, который отслеживает основные ресурсы и при достижении порогового значения

инициирует процесс динамической миграции виртуальной машины на менее загруженный аппаратный сервер. Достоинство данного подхода состоит в том, что контроллер можно «обучить» предвидеть достижение пороговых значений и мигрировать машины заранее [4,5].

Тем не менее сам процесс миграции виртуальных машин требует больших накладных расходов, поэтому преимущество такого подхода в оптимизации серверной инфраструктуры не очевидно.

В одной из последних работ [7] приведены результаты экспериментального сравнения двух подходов к решению задачи оптимизации и делается вывод о том, что при стабильном наборе бизнес-приложений и предсказуемом временном распределении нагрузки лучше себя показывает статическая модель, которая может быть скомбинирована с динамической для обработки пиковых нагрузок, которые сложно предусмотреть заранее.

### **Виртуализация рабочих столов**

В то время как серверная виртуализация в последнее десятилетие используется в большинстве организаций, виртуализация рабочих столов или VDI (Virtual Desktop Infrastructure) – относительно новая технология. Ключом к ее успеху является использование хорошо зарекомендовавшей себя технологии гипервизора в сочетании с новыми протоколами доставки образа экрана по сети, таких как PCoIP, Vast, HDX. Распространение широкополосного доступа к сети Интернет и повсеместное использование технологии виртуальных частных сетей (VPN) позволяет доставлять образ экрана виртуальной машины, исполняемой на корпоративном сервере или сервере Интернет-провайдера, на клиентское устройство пользователя, обеспечивая высокий уровень безопасности и централизации данных.

На рынке представлено несколько коммерческих продуктов по реализации технологии виртуализации рабочих столов, таких как VMWare Horizon View от компании VMWare, Microsoft VDI, XenDesktop от Citrix. Есть также реализация на базе свободно-распространяемого продукта KVM.

Одним из существенных преимуществ технологии виртуализации рабочих столов является возможность выполнять разнообразные приложения на всем многообразии клиентских устройств, для которых разработаны т.н. клиенты VDI, поскольку приложение выполняется по сути на сервере, а не клиентском устройстве.

Таким образом, виртуализация рабочих столов обеспечивает основу для многообещающей технологии работы корпоративных клиентов – BYOD (Bring Your Own Device) – новой инициативы, подразумевающей использование персональных устройств на рабочем месте и избавляющей сотрудника от необходимости пользоваться разными устройствами для работы и отдыха. Виртуальное рабочее место может быть

доставлено на любое устройство и в случае потери клиентского устройства на нем не останется корпоративных данных, что обезопасит работодателя от риска утечки корпоративной информации.

Число клиентских компьютеров в обычной организации намного превышает число серверов, поэтому проблема оптимизации использования серверных ресурсов при переходе на данную технологию становится еще более актуальной.

В общем случае, задача оптимизации серверных ресурсов применима к виртуализации рабочих столов, но имеет свои особенности, например, использование однотипных виртуальных машин в большом количестве, сконцентрированное по времени включение виртуальных машин и т. д.

Примеры применения моделей к оптимизации ресурсов для данной технологии мы можем найти в [8, 9].

### Постановка задачи

Особенностью внедрения технологии виртуализации рабочих столов являются довольно большие затраты на первом этапе, поскольку экономически переход на данную технологию оправдан для относительно больших количеств клиентских устройств [10]. При внедрении часто бывает необходима закупка аппаратных серверов, на которых будут выполняться виртуальные машины. Повышение процента использования серверных ресурсов и оптимальный выбор оборудования на этапе закупки позволяет минимизировать первоначальные затраты и повысить доверие к проекту внедрения VDI.

В процессе выбора оборудования обычно нужно отталкиваться от необходимого количества виртуальных машин и от их требований к ресурсам. Оценить требования к ресурсам можно с различной степенью точности. Можно отталкиваться от требований производителя ПО VDI в первом приближении, затем можно уточнить требуемые параметры в процессе развертывания пилотного проекта с помощью специального ПО, например, VMWare View Planner, или использовать счетчики производительности в нагрузочных экспериментах.

После оценки требуемых ресурсов для одной машины необходимо выбрать для закупки набор серверов таким образом, чтобы обеспечить выполнение заданного количества виртуальных машин и минимизировать стоимость приобретаемого оборудования. Зачастую в организации используется однотипное оборудование определенного поставщика, для упрощения поддержки имеет смысл выбирать серверы из модельного ряда этого поставщика.

Мы рассматриваем внедрение VDI в Воронежском государственном техническом университете, где уже существует централизованная серверная инфраструктура и хорошо спроектированная сеть. По нашим оценкам, ее пропускной способности должно хватить для работы приблизительно 500 виртуальных машин [10]. Клиентские компьютеры представлены двумя

типами: первый тип — это компьютеры сотрудников университета, имеющие совершенно различный набор программного обеспечения, это и компьютеры на кафедрах, и компьютеры различных служб университета, второй тип — компьютеры, установленные в учебных классах и используемые в учебном процессе. Для внедрения инфраструктуры виртуальных рабочих столов подходит второй тип, представляющий собой наборы однообразно сконфигурированных клиентских устройств. Применение технологии VDI в компьютерных классах позволит значительно повысить гибкость учебного процесса, централизовать администрирование клиентских устройств.

### Математическая модель

Предложенная модель позволяет минимизировать затраты на этапе закупки оборудования, определив технические характеристики и количество серверов из заранее определенного множества, обеспечивающее выполнение заранее заданного количества виртуальных машин с заранее определенными требованиями к ресурсам.

Для построения модели предположим, что виртуализируются только компьютеры учебных классов, и, в общем случае, их должно быть несколько типов, с различными требованиями к ресурсам, но в первом приближении допустим, что все компьютеры одинаковы, и требования к ресурсам заранее известны.

Рассмотрим конечный набор моделей серверов, точнее, серверных платформ, каждая из которых может быть дополнена дополнительной оперативной памятью. Для увеличения объема оперативной памяти можно использовать дополнительные модули памяти разного объема и, соответственно, стоимости.

Предположим, основываясь на практическом использовании виртуализации, что производительность виртуальной машины приемлема, если объем ОЗУ сервера достаточен для работы виртуальной машины только в оперативной памяти без использования страничного файла подкачки. В этом приближении мы не учитываем загрузку процессора, так как основная цель — это минимизация затрат на первом этапе внедрения VDI. Можно считать это первым приближением, которое может быть уточнено в будущем.

Для предложенной модели введем следующие переменные:

$S$  — множество моделей серверных платформ  $s_i \in S, i=1..l$ , которые могут использоваться как аппаратные серверы;

$C$  — множество стоимостей моделей серверных платформ, где  $c_i \in C, i=1..l$  — стоимость платформы  $s_i$ ;

$N$  — число серверов модели  $s_i$  которое будет использоваться в конечном наборе  $n_i \in N, i = 1..l$ ;

$M$  — максимальный объем ОЗУ, который может быть добавлен к модели  $s_i, m_i \in M, i = 1..l$ ;

$R$  – объем памяти  $j$ -го модуля,  $r_j \in R, j=1..k$ ,  
где  $k$  – это количество типов модулей памяти;

$C_v$ – стоимость  $j$ -го модуля памяти,  $c_{v_j} \in C_v$ ,  
 $j=1..k$

$P$ – число слотов памяти сервера  $s_i, p_i \in P$ ,  
 $i = 1..l$ .

Поскольку наша цель – минимизация стоимости, то мы должны определить целевую функцию, отражающую полную стоимость набора аппаратных серверов. Полная стоимость каждого сервера соответствующей модели складывается из стоимости базовой серверной платформы ( $c_i$ ) и стоимости дополнительных модулей памяти ( $\sum_{j=1}^k c_{v_j} a_{ji}$ ), где  $a_{ji}$ - число модулей памяти типа  $j$  на сервере  $i$ .

Таким образом, целевая функция будет выглядеть следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^l (c_i + \sum_{j=1}^k c_{v_j} a_{ji}) n_i \quad (1)$$

Ниже представлены ограничения целевой функции.

1. Общий объем добавляемой к серверной платформе памяти не должен превышать максимальный объем, поддерживаемый серверной платформой:

$$\sum_{j=1}^k r_j a_{ji} \leq m_i, i=1..l, \quad (2)$$

2. Общий объем модулей памяти не может превышать числа слотов памяти на сервере:

$$\sum_{j=1}^k a_{ji} \leq p_i, i=1..l. \quad (3)$$

3. Общий объем памяти на всех серверах из конечного набора должен обеспечивать достаточный объем памяти для работы необходимого числа виртуальных машин:

$$\sum_{i=1}^l ((\sum_{j=1}^k r_j a_{ji})/V) \geq N_v, \quad (4)$$

где  $N_v$  – это минимально необходимое количество виртуальных машин,  $V$  – объем памяти, необходимый для одной виртуальной машины.

4. Чтобы получить решение, которое имеет смысл, добавим ограничение, требующее, чтобы количество серверов и модулей памяти было целочисленным:

$$n_i, a_{ji} \geq 0, n_i, a_{ji} – \text{целые} \quad (5)$$

На первом этапе численного решения мы заполняем оптимальным образом слоты памяти аппаратных серверов планками памяти, чтобы достичь определенной степени заполнения от максимально возможной. В качестве шага возьмем шаг в 25%, то есть рассмотрим варианты с заполнением памяти на 25%, 50%, 75% и 100%. При этом для каждой аппаратной платформы мы минимизируем стоимость закупки необходимого объема памяти подбором необходимых планок памяти. Такую задачу можно сформулировать следующим образом:

$$c_{v_i}^q = \min \sum_{j=1}^k c_{v_j} a_{ji} \quad (6)$$

с учетом следующих ограничений:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^k r_j a_{ji} = m_i q, \\ \sum_{i=1}^k a_{ji} \leq p_i \end{cases}, i = 1..l. \quad (7)$$

где  $q$  – степень заполнения, которая может быть 0,25, 0,5, 0,75 и 1, что соответствует оперативной памяти сервера, заполненной, соответственно, на 25%, 50%, 75% и 100%.

Совокупность полученных решений мы будем рассматривать как множество аппаратных платформ, то есть на базе одной платформы мы получаем четыре сервера во множестве аппаратных платформ, из которых осуществляется выбор. Соответствующую задачу можно сформулировать следующим образом:

$$\min \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^4 (c_i + c_{v_i}^{q_j}) a_{ij}, \quad (8)$$

где  $c_{v_i}^{q_j}$  – это результат (6) с учетом ограничения (4).

Данная задача представляет собой задачу целочисленного линейного программирования. Численное решение было получено с помощью пакета Matlab.

### Исходные данные

В нашем случае выбор осуществляется из серверных платформ HP, поскольку данная серверная платформа широко используется в университете.

Для получения исходных данных были выбраны 11 серверных платформ HP Proliant из продуктовых линеек ML и DL. Серверы ML позиционируются как серверы для малого и среднего бизнеса, DL – стойные серверы. Одной из основных причин выбора этих линеек для нашего расчета является широкое использование этих серверов в ИТ инфраструктуре ВУЗа. Стоимость и комплектация выбранных для анализа решений взяты с сайта одного из поставщиков серверов HP Proliant [11]. Параметры серверов, которые используются для выбора, представлены в табл. 1. Для наглядности в набор включено несколько моделей двухпроцессорных систем, две модели четырехпроцессорных систем и одна модель восьмипроцессорной системы.

Для расчета мы взяли в качестве требуемой оперативной памяти для машины 4Гб, что соответствует требованиям разработчиков. Для оценки реальной потребности планируемых к размещению виртуальных машин в оперативной памяти необходимо провести нагрузочные тесты. Для VMWare Horizon View можно использовать продукт VMWare ViewPlanner, позволяющий с помощью запуска приложений на тестовой виртуальной машине оценить потребляемые при работе аппаратные ресурсы сервера.

Для каждого из выбранных серверов доступны планки памяти для расширения ОЗУ объема 2Гб, 4Гб, 8Гб, 16Гб, 32Гб и стоимостью, соответственно, 26, 136, 215, 315, 840 USD. Для каждого сервера решается задача оптимального, с точки зрения стоимости, заполнения слотов памяти планками оперативной памяти для достижения степени заполненности, соответственно, в 25%, 50%, 75%, 100% от максимального объема поддерживаемой памяти.

Таблица 1

Используемые в модели параметры серверов.

№ платформы	Наименование	Объем ОЗУ, Гб	Установлено модулей ОЗУ, шт.	Максимальный объем ОЗУ, Гб	Слотов ОЗУ, шт.	Цена, USD
<b>ДВУХПРОЦЕССОРНЫЕ СЕРВЕРЫ</b>						
1	ML350e Gen8	2	1	192	12	1624
2	DL360e Gen8	4	1	192	12	1500
3	DL160 Gen9	8	1	512	16	1580
4	DL180 Gen9	8	1	512	16	1760
5	ML350p Gen8	16	2	384	24	7100
6	DL360p Gen8	8	2	384	24	4000
7	DL380p Gen8	8	1	384	24	3300
8	DL380p Gen9	32	2	768	24	15100
<b>ЧЕТЫРЕХПРОЦЕССОРНЫЕ СЕРВЕРЫ</b>						
9	DL560 Gen8	16	2	1536	48	3200
10	DL580R07	64	8	2048	64	10762
<b>ВОСЬМИПРОЦЕССОРНЫЕ СЕРВЕРЫ</b>						
11	DL980	128	8	4096	128	50578

**Результаты**

Результат решения оптимизационной задачи (6-7) для двух серверов приведен в таблице 2. Заполнение оперативной памяти на 100% не всегда возможно при наличии предустановленных планок памяти. В этом случае рассматривался сервер с максимальным заполнением ОЗУ.

Таблица 2

Заполнение слотов модулями оперативной памяти.

Заполнение ОЗУ, %	Модулей по 2Гб, шт.	Модулей по 4Гб, шт.	Модулей по 8Гб, шт.	Модулей по 16Гб, шт.	Модулей по 32Гб, шт.	Цена, USD
<b>Proliant DL360e Gen8</b>						
25	6	1	0	2	0	2286
50	6	1	0	5	0	3231
75	0	2	7	1	2	3631
100	0	2	1	7	2	5736
<b>Proliant DL360p Gen8</b>						
25	18	3	0	3	0	5549
50	12	2	0	10	0	7462

Продолжение табл. 2

75	4	2	0	17	0	9459
100	0	2	1	19	2	11880
<b>Proliant DL980</b>						
25	72	0	0	55	0	67255
50	0	0	0	128	0	88378
75	0	0	0	64	64	121978
100	0	0	0	8	120	151378

Полученный результат использовался для второго этапа расчетов. В нем с помощью метода ветвей и границ происходит выбор оптимального набора серверов для размещения заранее заданного числа виртуальных машин. Причем, из каждой реальной серверной платформы у нас получается четыре варианта серверных платформ в задаче целочисленного программирования.

На рис. 1–4 представлены численные решения оптимизационной задачи для размещения 400, 600, 1200, 1600 виртуальных машин, соответственно.

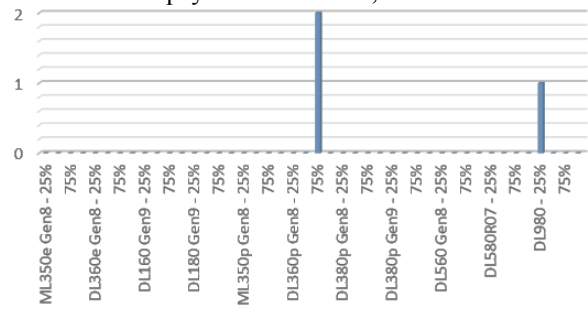


Рис. 1. Решение задачи для 400 виртуальных машин

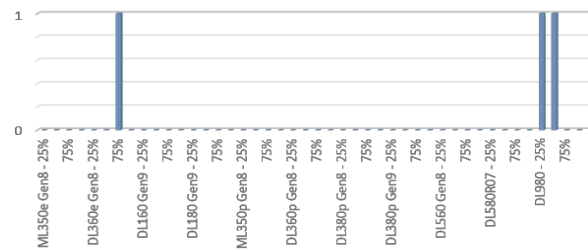


Рис. 2. Решение задачи для 800 виртуальных машин.

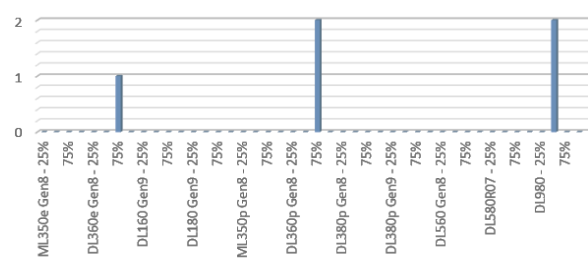


Рис. 3. Решение задачи для 1200 виртуальных машин

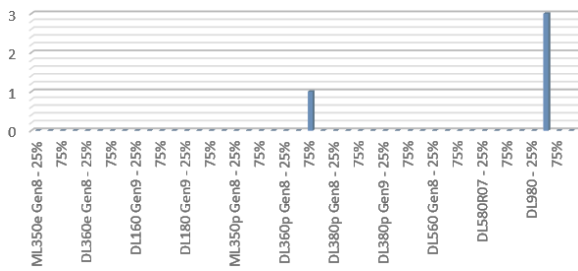


Рис. 4. Решение задачи для 1600 виртуальных машин

Так, на рис. 1 видно, что для минимизации стоимости закупаемого оборудования для размещения 400 виртуальных рабочих столов необходимо приобрести один двухпроцессорный сервер DL360p Gen8 с заполнением оперативной памятью на 75% и восьмипроцессорный сервер DL980, заполненный планками памяти таким образом, чтобы достичь 50% от максимально поддерживаемого объема оперативной памяти. С помощью таблицы 2 мы можем точно сказать, какое количество и каких модулей памяти мы должны докупить. Так, для сервера DL360p Gen8 при условии заполнения ОЗУ на 75% необходимо 17 модулей памяти по 16Гб, 4 модуля памяти по 2Гб и 2 модуля по 4Гб. Согласно таблице 1, при покупке в комплект входит 8Гб предустановленной памяти и 2 слота заняты, то есть в наличии есть два модуля по 4 Гб. Для сервера DL980 с заполнением ОЗУ на 25% необходимо иметь в наличии 72 модуля по 2Гб и 55 модулей по 16Гб, из которых в комплект поставки входит 17, то есть надо докупить 47 модулей по 16Гб и 72 модуля по 2Гб.

Для размещения 800 виртуальных машин требуется покупка одного двухпроцессорного сервера DL360e Gen8 с ОЗУ, заполненной на 75% и двух серверов DL980, с заполнением памяти на 25% и 75%.

Для 1200 виртуальных машин необходимо купить один сервер DL360e Gen8 с заполнением 75%, два сервера DL360p Gen8 с заполнением 75% и два DL980, заполненных на 50%.

Для работы 1600 виртуальных машин нужен один сервер DL360p Gen8 с ОЗУ, заполненным на 75% и три сервера DL980, с заполнением оперативной памяти на 50%.

Анализ полученных результатов для расчета различных количеств требуемых виртуальных машин помогает сделать вывод о моделях серверов с хорошим соотношением цена-качество. Так, в нашем случае, три модели серверов встречаются в решениях наиболее часто: DL360p Gen8, DL980, DL360e Gen8. Тем не менее, консолидация всех виртуальных машин на одном-двух серверах может привести к проблемам отказоустойчивости, так как при выходе из строя мощного сервера можно столкнуться с невозможностью перенести виртуальные машины на другие серверы. Следовательно, в модель необходимо вводить ограничения, позволяющие учесть надежность системы при выходе из строя одного из серверов.

## Заключение

Внедрение виртуализации рабочих столов – это следующий шаг в направлении централизации ИТ-инфраструктуры предприятия, который открывает новые возможности для образовательных учреждений в создании интегрированной образовательной среды.

Предложенная модель позволяет оптимизировать затраты на приобретение оборудования на первом этапе внедрения технологии, снижая финансовую нагрузку на организацию.

## Литература

- Speitkamp B. Mathematical programming approach for server consolidation problems in virtualized data centers/ Benjamin Speitkamp, Martin Bichler // IEEE Trans. Services Comput. – 2010. – Vol. 3. No. X. – P. 266-278.
- Utility Analysis for Internet-Oriented Server Consolidation in VM-Based Data Centers/ Y. Song, Y. Zhang, Y. Sun, W. Shi// Proceedings of the IEEE International Conference on Services Computing. – 2009. – P. 1-10.
- Online self-reconfiguration with performance guarantee for energy-efficient large-scale cloud computing data centers/ H. Mi, H. Wang, G. Yin, Y. Zhou, D. Shi, L. Yuan // Proceedings of the IEEE International Conference on Services Computing. – 2010. – P. 514-521
- Müller H. Optimizing server consolidation for enterprise application service providers / Hendrik Müller, Sascha Bosse, Klaus Turowski // PACIS 2016 Proceedings. – 243. (<http://aisel.aisnet.org/pacis2016/243>)
- More than bin packing: On dynamic resource allocation strategies in cloud computing / Andreas Wolke, Boldbaatar Tsend-Ayush, Carl Pfeiffer, Martin Bichler // Information Systems. – 2015. – №52. – P. 83–95.
- Verma A. Mapper: power and migration cost aware application placement in virtualized systems/ A. Verma, P. Ahuja, A. Neogi // Proceedings of the 9th ACM/IFIP/USENIX International Conference on Middleware. – 2008. – P. 243-264.
- Wolke A. Planning vs. dynamic control: Resource allocation in corporate clouds / Andreas Wolke, Martin Bichler, Thomas Setzer // IEEE Transactions on Cloud Computing. – 2016. – 4(3). P. 322–335.
- Maziero C. Evaluation of desktop operating systems under thrashing conditions / Carlos Maziero, Douglas dos Santos, Altair Santin // Journal of the Brazilian Computer Society. — 2013. №19 – P. 29–42
- Efficient resource management for virtual desktop cloud computing / Lien Deboosere, Bert Vankeirsbilck, Pieter Simoens, Filip De Turck, Bart Dhoedt, Piet Demeester // Journal of Supercomputing. – 2012. – №62. –P. 741–767.
- Маковий К.А. Экономическое обоснование внедрения технологии виртуализации рабочих столов (Virtual Desktop Infrastructure) в ИТ- инфраструктуру высшего учебного заведения/ К.А. Маковий, Ю.В. Хицкова // Современная экономика: проблемы и решения. 2015. № 2 (62). С. 75 – 81.
- Серверы и комплектующие Hewlett-Packard.– Электрон. дан. – Режим доступа: [http://www.proliant.ru/files/File/HP\\_proliant\\_price\\_09\\_15.xls](http://www.proliant.ru/files/File/HP_proliant_price_09_15.xls).

## SELECTING SERVER RESOURCES FOR VIRTUAL DESKTOP INFRASTRUCTURE DEPLOYMENT

<sup>1</sup>D.K. Proskurin, <sup>2</sup>K.A. Makoviy

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

[e-mail: pdk@vgsu.vrn.ru](mailto:pdk@vgsu.vrn.ru)

<sup>2</sup>Assistant Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

[e-mail: makkatya@mail.ru](mailto:makkatya@mail.ru)

Virtualization as a technological base of Cloud Computing technology provides significant economic and social advantages for educational institutions. While using server virtualization and centralized management of desktop computers server resources consolidation combined with desktop virtualization facilitates the transition to a new level of IT service delivery. Both server virtualization and desktop virtualization raise the problem of resource usage optimization.

The problem of hardware selection for Virtual Desktop Infrastructure deployment is reviewed in the article. The possibility of applying methods of integer mathematical programming to the problem of virtual machines placement on heterogeneous hardware platforms is thoroughly analyzed. A mathematical model of server platform and RAM selecting for placement of predetermined number of virtual machines with specified RAM requirements, objective functions and constraints are suggested.

Problem solution for the proposed range of hardware server models and different numbers of hosted virtual machines are introduced

Key words: Virtual Desktop Infrastructure, integer mathematical programming, linear programming; equipment costs

### References

1. Speitkamp B., Bichler M., "A mathematical programming approach for server consolidation problems in virtualized data centers", *IEEE Trans. Services Comput.*, 2010, vol. 3. No. X, 266-278 pp.
2. Song Y., Zhang Y., Sun Y., Shi W. "Utility Analysis for Internet-Oriented Server Consolidation in VM-Based Data Centers", *Proceedings of the IEEE International Conference on Services Computing*, 2009, 1-10 pp.
3. Mi H., Wang H., Yin G., Zhou Y., Shi D., Yuan L. "Online self-reconfiguration with performance guarantee for energy-efficient large-scale cloud computing data centers", *Proceedings of the IEEE International Conference on Services Computing*, 2010, 514-52 pp.
4. Wolke A., Bichler M., and Setzer T. "Planning vs. dynamic control: Resource allocation in corporate clouds", *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2016, vol. 4(3), 322-335 pp.
5. Müller H., Bosse S., Turowski K. "Optimizing server consolidation for enterprise application service providers", *PACIS 2016, Proceedings*, 2016, 243 pp. (<http://aisel.aisnet.org/pacis2016/243>)
6. Wolke A., Tsend-Ayush B., Pfeiffer C., and Bichler M. "More than bin packing: On dynamic resource allocation strategies in cloud computing", *Information Systems*, 2015, no. 52, 83-95 pp.
7. Verma A., Ahuja P., Neogi A., Mapper P. "Power and migration cost aware application placement in virtualized systems", *Proceedings of the 9th ACM/IFIP/USENIX International Conference on Middleware*, 2008, 243-264 pp.
8. Maziero C., Santos D., Santin A. "Evaluation of desktop operating systems under thrashing conditions", *Journal of the Brazilian Computer Society*, 2013, vol. 19, 29-42 pp.
9. Deboosere L., Vankeirsbilck B., Simoens P., De Turck F., Dhoedt B., Demeester P. "Efficient resource management for virtual desktop cloud computing", *Journal of Supercomputing*, 2012, no. 62, 741-767 pp.
10. Makoviy K. A., Khitskova, Yu. V. "Economic basis of Virtual Desktop Infrastructure deployment in institutions of higher education it-infrastructure", *Modern economy: problem and solutions*, 2015, no. 2 (62), 75 - 81 pp.
11. "Servers and Accessories of Hewlett-Packard. - Electron. dan.", Access: [http://www.proliant.ru/files/File/HP\\_proliant\\_price\\_09\\_15.xls](http://www.proliant.ru/files/File/HP_proliant_price_09_15.xls).

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЙ И ОБРАБОТКЕ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НЕЧЕТКОГО ФОНЕТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ

Л.В. Савченко

В статье рассматривается применение методологии системного анализа к задаче распознавания речи в автономных технических и информационных системах с голосовым интерфейсом. На основе теоретико-информационного подхода разработан новый вычислительно эффективный алгоритм принятия решений и обработки речевой информации с нечетким фонетическим кодированием, в котором, в отличие от традиционных подходов с построением отдельных акустических моделей для каждого вида минимальных речевых единиц типа отдельных фонем, предлагается рассматривать взаимосвязи между различными фонемами. Представленный алгоритм реализован в информационной системе интеллектуальной поддержки принятия решений для обработки речевой информации, приведена ее функциональная схема. Для повышения эффективности и надежности голосового интерфейса на предварительном этапе предложено выполнить обучение оператора стабильному произношению каждой фонемы. Представлены результаты экспериментального исследования точности и быстродействия разработанного алгоритма в задаче распознавания изолированных слов русского языка в сравнении с методами на основе скрытых марковских моделей и глубоких нейронных сетей. Показано, что предложенный подход существенно превосходит традиционные методы распознавания речи не только по точности, но и по времени распознавания и затратам памяти для хранения акустической модели

Ключевые слова: системный анализ, обработка речевой информации, нечеткое фонетическое кодирование, теоретико-информационный подход

### Введение

В последнее время появляется все большее число информационных и технических систем, которые непрерывно осуществляют анализ состояния сложных прикладных объектов и используют полученную информацию для последующего управления этими объектами [1]. При этом нередко пользователю необходимо обеспечить доступ к подсистеме управления, чтобы вносить корректировки в автоматически принимаемые решения. В связи с тем, что непосредственный доступ к управляемому объекту может быть затруднен, при обеспечении коммуникации с удаленными объектами все чаще используется голосовые интерфейсы. Существующие технологии трансформации речи в текст, такие как скрытые марковские модели (СММ), модели гауссовских смесей (МГС), глубокие нейронные сети (ГНС), реализуются и оказываются недостаточно эффективными для практического применения в автономных технических системах с повышенными требованиями к надежности и безопасности. Точность распознавания сильно варьируется при наличии разнообразных акустических помех, акцента, дефектов речи, изменении физического и эмоционального состояния пользователя. Несомненный интерес здесь представляет применение в настоящей работе методологии системного анализа и теоретико-информационного подхода в рамках принципа минимума информационного рассогласования Кульбака-Лейблера [2] для повышения эффективности автономных систем принятия решений.

### Системный анализ технических систем с голосовым интерфейсом

Построение голосового интерфейса технических и информационных систем обычно сводится к решению задачи распознавания речи, которая состоит в том, чтобы распознаваемому речевому сигналу поставить в соответствие наиболее близкое слово (фразу) из словаря. Следуя методологии системного анализа, в настоящей работе формулируется проблемная ситуация недостаточной эффективности распознавания изолированных слов (например, команд в системах голосового управления) с использованием существующих речевых технологий в автономных системах с повышенными требованиями к надежности и безопасности. Цель работы состоит в снижении вероятности ошибочного распознавания  $\bar{\alpha}$ , вычислительной сложности (среднего времени) принятия решений  $\bar{t}$ , а также затрат памяти  $z$ , необходимой для хранения акустических моделей. Для достижения поставленной цели необходимо:

- решить задачу повышения точности и времени распознавания изолированных слов на основе представления модели фонемы как нечеткого множества минимальных речевых единиц и асимптотически нормального распределения Кульбака-Лейблера [2];
- реализовать предложенный алгоритм в рамках информационной системы принятия решений и обработки речевой информации для русского языка;
- провести экспериментальные исследования эффективности разработанного подхода в задаче распознавания изолированных слов.

По результатам аналитического обзора литературы было выявлено крайне незначительное число методов, приемлемых для реализации голосового интерфейса в автономных технических

системах на малопроизводительном оборудовании. В частности, на основе теоретико-информационного подхода и принципов слоговой фонетики был разработан метод фонетического кодирования слов (ФКС) [3], который позволяет выполнить быструю адаптацию на голос нового диктора. При этом, как известно [4], для повышения вычислительной эффективности информационное расстояние Кульбака-Лейблера между спектральными мощностями речевых сигналов можно оценить с помощью выхода обеляющего фильтра (ОФ). Нами были выделены следующие недостатки метода ФКС [5]: за счет объединения близких фонем в один кластер на выходе алгоритма распознавания существует много альтернативных решений и при распознавании не учитываются согласные звуки.

**Алгоритм принятия решений и обработки речевой информации с нечетким фонетическим кодированием**

Для преодоления указанных недостатков в настоящей статье предлагается воспользоваться методологией системного анализа. В отличие от традиционных подходов, в которых сложный объект – фонема описывается с построением отдельных акустических моделей для каждого вида минимальных речевых единиц типа отдельных фонем, в настоящей работе предлагается рассматривать взаимосвязи между различными фонемами. Предложен новый вычислительно эффективный алгоритм принятия решений и обработки речевой информации с нечетким фонетическим кодированием слов (НФКС) [5], в котором фонема описывается как нечеткое множество минимальных речевых единиц (МРЕ)

$\{(\mathbf{x}_r^*, \mu_j(\mathbf{x}_r^*))\}, r = 1, R$ , где  $r$  – номер фонемы из

ФБД объемом  $R$ , а  $\mu_j(\mathbf{x}_r^*)$  – степень принадлежности эталона  $\mathbf{x}_r^*$  к  $j$ -ой фонеме, которая

оценивается как условная вероятность  $P(\mathbf{x}_j^* / \mathbf{x}_r^*)$

того, что объект  $r$ -ого класса оказался ближайшим соседом  $j$ -го эталона [5]. Предложенный алгоритм представлен в табл. 1.

Таблица 1

Алгоритм принятия решений и обработки речевой информации с нечетким фонетическим кодированием

<p><b>Входные данные:</b> речевой сигнал <math>X</math>, ФБД эталонных фонем <math>\mathbf{x}_r^*</math>, словарь <math>\{X_l\}</math>.</p> <p><b>Выходные данные:</b> слово из словаря <math>X</math></p>
--

1. Вычислить границы слогов  $(t_n^{(1)}, t_n^{(2)})$  с точностью до номера сегмента с помощью алгоритма амплитудного детектора.

2. Для каждого выделенного слога  $n = 1, N$

2.1. Выполнить сегментацию  $n$ -го слога

2.2. Для каждого выделенного сегмента

$k = 1, K_n$

2.2.1. Поставить каждому  $k$ -му сегменту в соответствие определенный тип звука (гласный, звонкий, сонорный, глухой, шипящий)

2.3. Найти индекс сегмента  $k_n$  гласного звука

2.4. Для каждого фрейма

$t = t_n^{(1)}(k_n), t_n^{(2)}(k_n)$  гласного звука  $k_n$

2.4.1. Вычислить индекс  $v(t)$  ближайшей

фонемы-эталона  $\mathbf{x}_r^*$  по принципу минимума информационного расстояния Кульбака-Лейблера:

$$v(t) = \arg \min_{r \in \{1, \dots, R\}} \rho_{KL}(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*), t = 1, T$$

2.4.2. Для каждого  $r = 1, R$

2.4.2.1. Вычислить  $\mu_n(r)$ :

$$\mu_n(r) = \frac{1}{t_n^{(2)} - t_n^{(1)} + 1} \cdot \sum_{t=t_n^{(1)}}^{t_n^{(2)}} \mu(r, t),$$

где  $\mu(r, t) = \min(\mu_{v(t)}(\mathbf{x}_r^*), \mu(\mathbf{x}(t) / \mathbf{x}_r^*))$ .

3. Для каждого слова  $X_l$  из словаря выполнить

3.1. Если количество слогов  $N$  в распознаваемом слове совпадает с количеством слогов  $L_l$  слова из словаря, то

3.1.1. Вычислить  $\mu_l$ :

$$\mu_l = \delta(L_l - N) \cdot \sum_{n=1}^N \mu_n(r_l, \mathbf{x}_n)$$

где  $\delta(x)$  – дискретная дельта-функция.

3.1.2. Определить количество совпадений фонетических классов  $k_l$

3.1.3. Вычислить модифицированную степень принадлежности слова  $\tilde{\mu}_l$ :



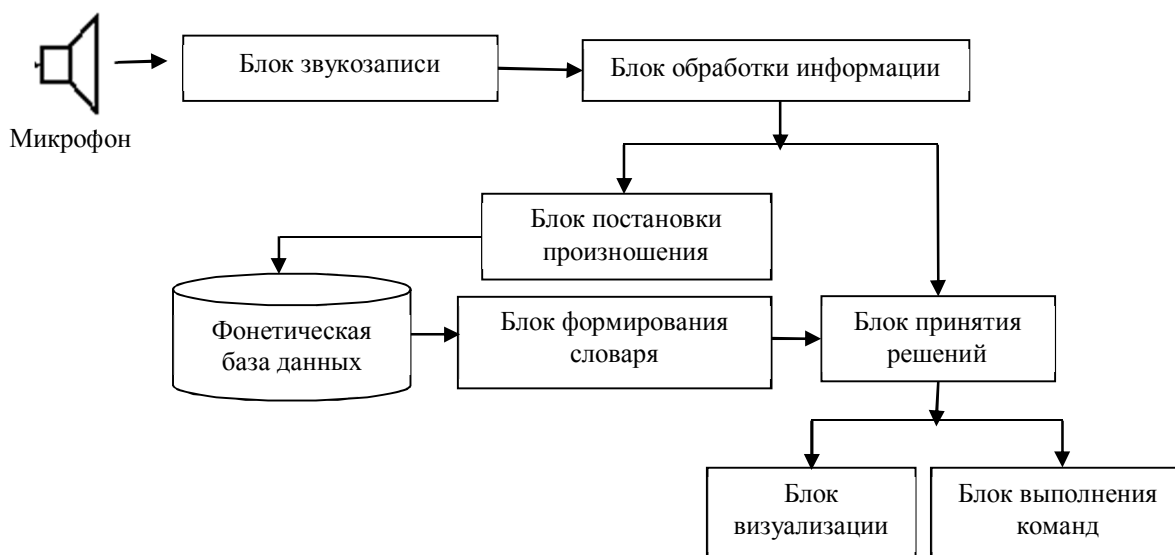
Окончание табл. 1

$$\tilde{\mu}_l = \begin{cases} \mu_l + k_l \cdot \Delta\mu, & \mu_l + k_l \cdot \Delta\mu < 1 \\ 1, & \mu_l + k_l \cdot \Delta\mu \geq 1 \end{cases}$$

4. Найти ближайшее слово  $X^*$  с максимальной степенью принадлежности  $\tilde{\mu}_l$ :

$$X^* = \arg \max_{l \in \{1, \dots, L\}} \tilde{\mu}_l.$$

В этом алгоритме для уточнения полученного решения используются выделенные с помощью алгоритмов машинного обучения сегменты согласных звуков [6], описываемых с помощью таких акустических признаков, как длительность сегмента, отношение максимальной амплитуды фонемы к максимальной амплитуде содержащего ее слога и частота, при которой спектральная мощность сигнала принимает максимальное значение. Параметр  $\Delta\mu$  подбирается экспериментально для каждого класса согласных



Функциональная схема разработанной информационной системы

Здесь речевой сигнал поступает с микрофона в блок звукозаписи, где происходит его запись и автоматическое сохранение в нужном формате. Получившийся звуковой файл поступает в блок обработки информации, где осуществляется его предварительная обработка (удаляются паузы в начале и в конце сигнала), разбиение речевого сигнала на фреймы и фонемная сегментация, после чего для каждого фрейма извлекаются акустические признаки и вычисляется мера близости с эталонами из ФБД. На вход блоку формирования словаря подается блок постановки произношения (пользователь обучается стабильному произношению эталонных фонем), затем выполняется фонетическое кодирование команд. Выход блока обработки и транскрипция

звуков. На предварительном этапе пользователя необходимо обучить стабильному произношению всех эталонных звуков. Для этого в работе [5] была предложена модификация метода НФКС, где в отличие от задачи распознавания заранее известен класс звука.

#### Архитектура информационной системы

В настоящем разделе рассмотрим архитектуру информационной системы интеллектуальной поддержки принятия решений для обработки речевой информации на основе алгоритма НФКС, которая реализует следующие функции:

- автоматическое распознавание речи на основе алгоритма НФКС с фонемной сегментацией речевого сигнала и классификацией согласных фонем;
- автоматическое формирование словаря для метода НФКС по текстовому файлу;
- предварительное обучение пользователя стабильному произношению эталонных фонем;
- возможность сохранения в ФБД нескольких эталонных звуков.

Функциональная схема системы представлена на рисунке.

эталонных команд попадают на вход блока принятия решений на основе предложенного алгоритма НФКС.

#### Результаты экспериментальных исследований

Рассмотрим задачу распознавания изолированных слов русского языка на основе предложенного подхода в сравнении с базовым методом ФКС и традиционными системами распознавания: реализация СММ с МГС в библиотеке CMU Pocketsphinx и акустические модели на основе ГНС из фреймворка Kaldi. В качестве ФБД использовались 10 гласных звуков, произнесенных одним диктором после предварительного этапа обучения произношению.

Словарь содержит 1900 наименований лекарств, продаваемых в одной аптеке Нижнего Новгорода. В эксперименте принимали участие 12 дикторов (8 мужчин и 4 женщины). Каждый из них произносил по 200 изолированных слов из словаря. Распознавание слов осуществлялось в метрике Кульбака-Лейблера и ОФ. Кроме того, использовался традиционный подход с сопоставлением кепстральных коэффициентов (MFCC, Mel-Frequency Cepstral Coefficients) в метрике Евклида. Частота дискретизации речевого сигнала равна 8 кГц, порядок АР-модели  $p=12$ , длительность одного фрейма составила  $M=120$  отсчетов или  $\tau = 15$  мс по времени, отношение сигнал/шум равно 20 дБ. В таблице 2 приведена усредненная по всем дикторам оценка вероятности ошибки распознавания, средняя длительность распознавания однослоговой команды и объем, необходимый для хранения акустической модели. Для оценки последнего показателя предполагается, что вещественное число занимаем 4 байт.

Таблица 2  
Сравнение систем распознавания изолированных слов русского языка

		$\bar{\alpha}$ , %	$\bar{t}$ , мс	z, Кб
СМ М	МГС	20,2±5,6	180±1,2	21335
	ГНС	19,5±6,5	290±1,5	98095
ФКС	Евклида/ MFCC	15,0±3,0	25±0,1	1,6
	Кульбака- Лейблера/ СПМ	13,0±3,2	118±0,8	160
	ОФ	16,5±2,6	17±0,1	0,5
Пред- ложен- ный алго- ритм	Евклида/ MFCC	12,0±1,8	29±0,2	2
	Кульбака- Лейблера/ СПМ	9,5±2,3	125±0,6	160,4
	ОФ	12,0±3,4	21±0,2	0,9

Из таблицы видно, что предложенный подход на основе операций с нечеткими множествами превосходит по точности распознавания традиционные методы на 10-13% и базовый метод ФКС на 3-6%. Методы распознавания ФКС и НФКС на основе теоретико-информационного подхода значительно превосходят традиционные системы распознавания по вычислительной сложности и объему памяти, необходимой для хранения акустической модели. Предложенный подход по этим показателям незначительно уступает методу ФКС за счет дополнительных

затрат на операцию нечеткого пересечения (п. 2.4.2.1 в табл. 1).

#### Заключение

В настоящей работе предложен новый системный подход к принятию решений и обработке речевой информации на основе алгоритма с нечетким фонетическим кодированием. С помощью разработанной информационной системы был проведен ряд экспериментальных исследований. Показано, что предложенный подход на 3-6% превосходит по точности распознавания базовый метод ФКС и на 10-13% традиционные системы распознавания. Предложенный подход существенно превосходит по времени и объему хранения акустической модели традиционные системы распознавания. Поэтому он может служить прототипом автономных технических систем голосового управления на малопроизводительном оборудовании. Например, когда необходимо оператору использовать дополнительный (как правило, дублирующий) канал управления и информации в сложных ситуациях, когда его руки и ноги заняты, а зрение перегружено. В частности, с помощью речи можно осуществить резервное управление бортовым оборудованием, измерительными системами и индикаторами, а также производить запрос навигационных или иных данных и получать информацию (предупреждение) об аварийных ситуациях.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ МД-306.2017.9.*

#### Литература

1. Benesty, J. Springer Handbook of Speech Recognition / J. Benesty, M. Sondh, Y. Huang. N. Y.: Springer,- 2008.- 1159 p.
2. Kullback, S. Information Theory and statistics / S. Kullback // Dover Pub. 1997. 399 p.
3. Savchenko, A.V. Phonetic Words Decoding Software in the Problem of Russian Speech Recognition / A.V. Savchenko// Automation and Remote Control.- 2013.- Vol. 74.- No. 7. P. 1225-1232.
4. Савченко, В.В. Теоретико-информационное обоснование и анализ эффективности метода фонетического кодирования-декодирования в задаче автоматического распознавания речи / В.В. Савченко, А.В. Савченко // Радиотехника и электроника.- 2016.- Т. 61.- № 4.- С. 373-379.
5. Savchenko, L.V. Towards the creation of reliable voice control system based on a fuzzy approach / L.V. Savchenko, A.V. Savchenko // Pattern Recognition Letters.- 2015.- Vol. 65.- P. 145-151.
6. Савченко, Л.В. Оценка качества произношения на основе метода нечеткого фонетического кодирования / Л.В. Савченко // Телекоммуникации.- 2017.- № 5.- С. 33-39.

Нижегородский государственный лингвистический университет

# SYSTEMATIC APPROACH TO DECISION-MAKING AND SPEECH PROCESSING USING “OBSCURE PHONETIC CODING METHOD”

**L.V. Savchenko**

Academic Assistant, Nizhny Novgorod State Linguistic University, Nizhny Novgorod, Russian Federation  
e-mail: [LyudmilaSavchenko@yandex.ru](mailto:LyudmilaSavchenko@yandex.ru)

The article reviews methodology of system analysis in speech recognition for autonomous information systems with a voice interface. Based on the information-theoretic approach, a new computationally effective algorithm for decision-making and processing of speech information with obscure phonetic coding was developed. Unlike traditional approaches, which involve the construction of separate acoustic models for each type of minimal speech units such as individual phonemes, it is suggested to consider the interrelations between different phonemes.

The presented algorithm is applied to the information system of intellectual support of speech information processing. Its functional scheme is also provided in the article. To increase the efficiency and reliability of the voice interface in the preliminary stage, it is suggested to conduct special trainings for system operators in order to enable them to pronounce each of the phonemes adequately. The results of experimental study of the accuracy and speed of the developed algorithm used for recognizing isolated words of the Russian language as compared to the methods based on hidden Markov models and deep neural networks are also presented. The proposed approach significantly exceeds the traditional methods of speech recognition not only in accuracy, but also in terms of recognition time and memory costs for storing the acoustic model

Key words: system analysis, speech processing, obscure phonetic coding, theoretic information approach

## References

1. Benesty J., Sondh M., Huang Y. “Springer Handbook of Speech Recognition”, N. Y., Springer, 2008, 1159 p.
2. Kullback, S. “Information Theory and statistics”, Dover Pub, 1997, 399 p.
3. Savchenko, A. V. “Phonetic Words Decoding Software in the Problem of Russian Speech Recognition”, *Automation and Remote Control*, 2013, vol. 74, no. 7., 1225-1232 pp.
4. Savchenko, V.V., Savchenko A.V. “Information-theoretic analysis of efficiency of the phonetic encoding–decoding method in automatic speech recognition”, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 4, 430-435 pp.
5. Savchenko, L.V., Savchenko A.V. “Towards the creation of reliable voice control system based on a fuzzy approach” *Pattern Recognition Letters*, 2015, vol. 65, 145-151 pp.
6. Savchenko, L.V. “Quality assessment of pronunciation based on the fuzzy phonetic coding method” *Telecommunications*, 2017, vol. 5, 33–39 pp.

## МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБСЛУЖИВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

С.А. Олейникова

Объектом исследования в данной работе являются сложные многостадийные системы с несколькими центрами обслуживания и взаимной зависимостью между работами, длительность выполнения которых является случайной величиной. Целью является оптимизация функционирования таких систем путем формирования план-графика их функционирования. В качестве критерия оптимальности выбран критерий, позволяющий рационализировать использование ресурсов во времени. В работе была сформулирована оптимизационная задача, учитывающая наличие нескольких обслуживающих центров, взаимную зависимость между работами, их случайное время выполнения, а также временные и ресурсные ограничения. Анализ возможных подходов к ее решению показал целесообразность использования мультиагентных технологий. С учетом особенностей задачи была предложена структура мультиагентной системы, включающая агента предварительного планирования, осуществляющего подготовительную стадию формирования расписания, интеллектуальных агентов, выполняющих составление план-графика для закрепленного за ними центра обслуживания, и агента координации. В работе приведены основные функции для агентов всех категорий. Особое внимание уделено специфике их взаимодействия.

Таким образом, получен подход к оптимизации функционирования многостадийных обслуживающих комплексов путем составления расписания их работы, основанный на использовании взаимодействующих интеллектуальных агентов и позволяющий получить субоптимальное решение за приемлемое время

Ключевые слова: мультиагентная система, оптимизационная задача, составление расписания

### Введение

Эффективность функционирования сложных обслуживающих комплексов во многом зависит от качества составленного расписания. Для больших систем, когда для обслуживания заявки необходимо завершить около сотни взаимно-зависимых работ, выполняемых в разных центрах, в случае ресурсных и временных ограничений, а также случайной длительности выполнения, данная задача требует эффективных алгоритмов планирования, которые бы выполнялись за приемлемое время.

В настоящее время множество проблем в области управления проектами, к которой относится рассматриваемая задача, уже исследовано и широко изучено. В частности, получены решения для некоторых многокритериальных задач составления расписаний [1, 2]. Достаточно распространенным является критерий скорейшего завершения работ или критерий максимизации прибыли [3, 4]. Однако для целого класса практических задач время целесообразно учесть в виде ограничений, а в качестве целевой функции использовать критерий, позволяющий рационализировать объем используемых ресурсов во времени. При наличии нескольких центров обслуживания такая задача будет являться многокритериальной. Учитывая также случайную длительность выполнения взаимно-зависимых работ и временные ограничения, данную задачу можно отнести к классу NP-полных, что требует особых подходов к ее решению.

Для ее решения предлагается подход, основанный на использовании мультиагентных

технологий [5]. Целесообразность его применения обусловлена наличием нескольких центров с индивидуальным оборудованием, сотрудниками и расписанием работы. В связи с этим, за формирование графика для каждого центра будет отвечать свой интеллектуальный агент, взаимодействие которых позволит учесть взаимную зависимость работ и составить расписание работы для всего комплекса.

### 1. Постановка задачи и ее особенности

Рассматривается задача составления расписания для сложных обслуживающих комплексов. Он задается своими центрами обслуживания

$$S = (S_1, \dots, S_L). \quad (1)$$

Каждый центр  $j$  ( $j=1, \dots, L$ ) обладает множеством ресурсов нескольких типов:

$$R_j = (R_{j1}, \dots, R_{jk_j}). \quad (2)$$

Здесь  $k_j$  – количество типов ресурсов в центре  $j$ ,  $R_{j1}, \dots, R_{jk_j}$  – объем ресурсов каждого типа.

Каждая заявка  $P_m$ , поступающая на вход, представляет собой множество взаимно-зависимых работ  $W_m$  со случайной длительностью обслуживания. Кроме работ, заявка еще задается директивным временем  $T_m$ , к которому необходимо завершить ее обслуживание:

$$P_m = P_m(T_m, W_m). \quad (3)$$

Любая работа  $w_i \in W_m$  задается следующим набором характеристик:

$$w_i = w_i(S_i, dlit_i, R_i, Pr_i) \quad (4)$$

Здесь  $S_i$  – центр, в котором выполняется работа  $i$ ;  $dlit_i$  – ориентировочное время обслуживания;  $R_i = (R_{i1}, \dots, R_{ik_i})$  – объемы ресурсов, необходимые для выполнения;  $Pr_i$  – множество работ, непосредственно предшествующих выполнению работы  $i$ , с помощью которого задается взаимная зависимость работ.

Оцениваемые параметры математической модели.

Важным параметром, подлежащим оценке, является длительность выполнения работ  $w_i.dlit$ . Ее оценкой будет являться математическое ожидание случайной величины, распределенной по закону бета с неизвестными параметрами  $p$  и  $q$  и известными параметрами  $a$  и  $b$ .

$$w_i.dlit = M\xi_i. \quad (5)$$

Варьируемые параметры математической модели.

К параметрам, которыми можно варьировать для достижения оптимума целевой функции отнесем время начала работ  $w_i.t_{нач}$ . В отличие от раннего времени начала работ, эта характеристика может меняться в пределах ограничений на взаимную зависимость работ.

Целевая функция.

Опишем соответствующую оптимизационную задачу. В качестве критерия оптимизации рассмотрим обобщенный ресурсный критерий [6]. Введем в рассмотрение также функцию  $f_j(t) = (f_{j1}(t), \dots, f_{jk_j}(t))$ , определяющую наиболее целесообразный объем ресурсов, используемых в момент времени  $t$  в центре  $j$ . Занятость системы обслуживанием заявок, поступивших ранее, в центре  $j$  описывается вектором:

$$R_{исп\ j}(t) = (R_{исп\ j1}(t), \dots, R_{исп\ jk_j}(t)). \quad (6)$$

Тогда целевая функция для каждого центра будет минимизировать отклонение фактического объема ресурсов, полученного при решении задачи планирования, от заданного в данный момент времени объема:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_t \sum_{i=1}^{k_1} \left( \sum_{j: w_j \in W_t} w_j \cdot r_i + R_{исп\ 1ki}(t) - f_{1i}(t) \right)^2 \rightarrow \min \\ \dots \\ \sum_t \sum_{i=1}^{k_L} \left( \sum_{j: w_j \in W_t} w_j \cdot r_i + R_{исп\ Lki}(t) - f_{Li}(t) \right)^2 \rightarrow \min \end{array} \right. \quad (7)$$

Ограничения.

Время начала работ необходимо определять в условиях ресурсных ограничений. Они подразумевают, что для каждого центра  $j$  формировать множество работ  $W_t$ , которым будет назначено время начала  $t$ , можно лишь таким образом, чтобы суммарный объем ресурсов этих работ (по каждому типу отдельно) совместно с еще незавершенными работами, время выполнения которым назначили раньше, не превосходил общего объема ресурсов данного типа  $R_{ji}$ :

$$\sum_{w_m \in W_t} w_m \cdot r_i + R_{исп\ ji}(t) \leq R_{ji}(t), i = 1, \dots, k_j. \quad (8)$$

Кроме того, следует учесть ограничение на взаимную зависимость работ:

$$w_i \cdot t_{нач} \geq w_k \cdot t_{нач} + w_k \cdot dlit, \forall w_k \in Pr_i. \quad (9)$$

Другой важной особенностью задачи является ограничение на длительность проекта. Данное

ограничение можно описать с помощью следующего неравенства:

$$T_{i\_факт} \leq T_i. \quad (10)$$

Здесь  $T_{i\_факт}$  – фактическое время, затраченное на обслуживание заявки  $i$ . Его можно определить по формуле:

$$T_{i\_факт} = \max_j (w_j \cdot t_{нач} + w_j \cdot dlit). \quad (11)$$

Необходимо составить график обслуживания заявок, оптимальный с точки зрения критерия (7).

## 2. Структура мультиагентной системы

Рассмотрим специфику решения задачи с учетом ее особенностей. С учетом временных ограничений время, затрачиваемое на процесс планирования задач, является одним из определяющих факторов. В связи с этим, необходим поиск численных методов, позволяющих сократить это время без существенного ухудшения качества решения.

Одной из особенностей задачи является наличие нескольких центров обслуживания, каждый из которых специализируется в выполнении определенных работ. Отметим, что закрепление работ за каждым центром дает ему относительную автономность в процессе составления расписания. В частности, каждый центр может самостоятельно осуществлять деятельность по процессу формирования расписания для своих работ. Однако, взаимная зависимость, существующая между работами (в том числе, и из разных центров) и наличие ограничений обуславливает необходимость координации действий по планированию. В частности, если работу в одном центре перенести на следующий период, то, очевидно, следующие непосредственно на ней работы (в том числе, и в других центрах) также надо будет перенести на более поздний срок. Необходимо также отметить, что каждый центр будет осуществлять процесс планирования в соответствии со своей критериальной функцией. Исходя из этого, каждый центр можно наделить целенаправленной активностью, на основании которой он будет принимать решения о времени выполнения своих задач с учетом данных, полученных от других центров. Таким образом, каждый центр обслуживания обладает следующими свойствами:

- возможность самостоятельного составления расписания для задач, закрепленных за данным центром, т.е. активность или способность к организации и реализации действий по планированию;
- относительная автономность в процессе планирования от других центров;
- частичная зависимость в процессе принятия решений от других центров и, как следствие, необходимость взаимодействия с ними;
- наличие определенной цели и формирование расписания (а также реакция на сообщения от других центров), исходя из этой цели.

С учетом данных свойств, наиболее целесообразным подходом для формирования расписания будет являться мультиагентный подход. Мультиагентные системы являются наиболее эффективным инструментом решения сложных задач в тех случаях, когда их можно распределить в виде заданий, выполнением каждого из которых будет заниматься отдельный агент [5]. В общем случае считается, что агент обладает лишь частью знаний о задаче, достаточных для выполнения своего задания. В этом случае, организовав деятельность каждого агента и взаимодействие между ними, можно получить решение всей задачи, которое бы удовлетворяло целям (в той или иной степени) всех агентов. Фактически, технология мультиагентных систем является развитием результатов как в области искусственного интеллекта, так и в области параллельных вычислений и распределенной обработки данных.

С учетом возможности распараллеливания алгоритма решения задачи, поручим планирование работ некоторого центра  $l$ ,  $l=1, \dots, L$  интеллектуальному агенту  $IA_l$ . Он должен выполнять следующие функции:

- формировать план-график для своего обслуживаемого центра с учетом имеющихся в нем ресурсов, существующего расписания и критерия оптимальности;
- оценивать время завершения проекта после каждого этапа планирования;
- учитывать данные от других центров о возможном изменении сроков завершения проекта, а также о необходимости корректировать расписание для своих работ;
- синхронизировать работу с другими интеллектуальными агентами.

Каждый агент имеет доступ ко всей информации базы данных, которая касается непосредственно его центра; информация о работах других центров для него недоступна.

Для согласования действий агентов после каждого временного интервала, синхронизации действий их работы в систему целесообразно добавить еще одного агента мета-уровня, который будет отвечать за координацию между агентами.

С учетом определения всех агентов, архитектура их взаимодействия будет определена следующим образом (рис. 1).

Здесь АПП – агент предварительного планирования (который отвечает за предварительное расписание с учетом взаимной зависимости работ, но без учета ресурсов);  $IA_l$  – интеллектуальный агент планирования работ для центра  $l$ ,  $l=1, \dots, L$  АК – агент координации агентов  $IA_l$ .

После предварительного планирования дальнейший процесс составления расписания выполняется агентами  $IA_1, \dots, IA_L$ , которые работают автономно в пределах очередного временного интервала.

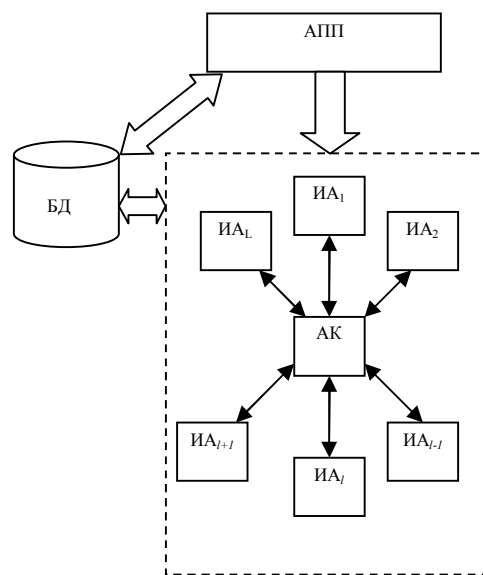


Рис. 1. Структура мультиагентной системы

После завершения формирования графика на данном этапе идет процесс согласования с помощью АК. В результате такого согласования агенты узнают о возможном сдвиге во времени работ для своего центра, а также о необходимости возврата на более ранние этапы. Если планирование для всех центров в данное время прошло успешно, то осуществляется переход к следующему этапу, иначе – возврат на некоторый предыдущий интервал.

Проанализируем специфику взаимодействия агентов более подробно. В первую очередь, агент должен оповестить остальных агентов об окончании планирования на данном этапе и выборе для себя следующего момента планирования. Переход к следующему временному интервалу начинается только в том случае, когда агент получит соответствующее сообщение. Данный интервал выбирается как наименьший из всех моментов, определенных агентами. Если у некоторого агента нет в данное время работ для планирования, то он пропускает этот момент и ожидает. Другим важным сообщением является необходимость о сдвиге работ на следующий временной интервал. В этом случае необходимо найти всех агентов, отвечающих за участки с работами, непосредственно следующими за перенесенной работой, и оповестить их. Очевидно, что время выполнения таких работ необходимо тоже начинать позже. Однако, деятельность агентов на данном временном интервале от этого зависеть не будет. В результате планирования своих работ некоторым агентом возможно увеличение времени проекта. Здесь могут быть две ситуации:

- увеличено время проекта, однако оно не превысило критического значения (в этом случае необходимо оповестить всех агентов о новом времени, чтобы они могли пересчитать временные резервы для своих работ);
- время проекта увеличено настолько, что оно превышает критическое значение (в этом случае

посылается информация о возврате на предыдущие этапы).

Завершив планирование всех своих работ агент посылает соответствующее сообщение и переходит в состояние пассивного ожидания, поскольку может возникнуть ситуация с возвратом на предыдущие этапы и необходимостью корректировки графика из-за невыполнения ограничений у других агентов. Он должен получить одно из двух сообщений: или планирование у всех агентов завершено или возникла необходимость возврата. Таким образом, можно выделить следующие сообщения, которые будет отправлять агент:

- завершение планирования на данном интервале и момент следующего временного интервала;
- увеличение времени проекта (без нарушения временных ограничений);
- сообщение о необходимости сдвига работ на более поздний момент времени;
- сообщение о необходимости возврата на более ранние этапы и момент времени для возврата;
- завершение планирования.

Исходя из анализа возможных сообщений, диаграмма деятельности данного агента представлена на рис. 2.

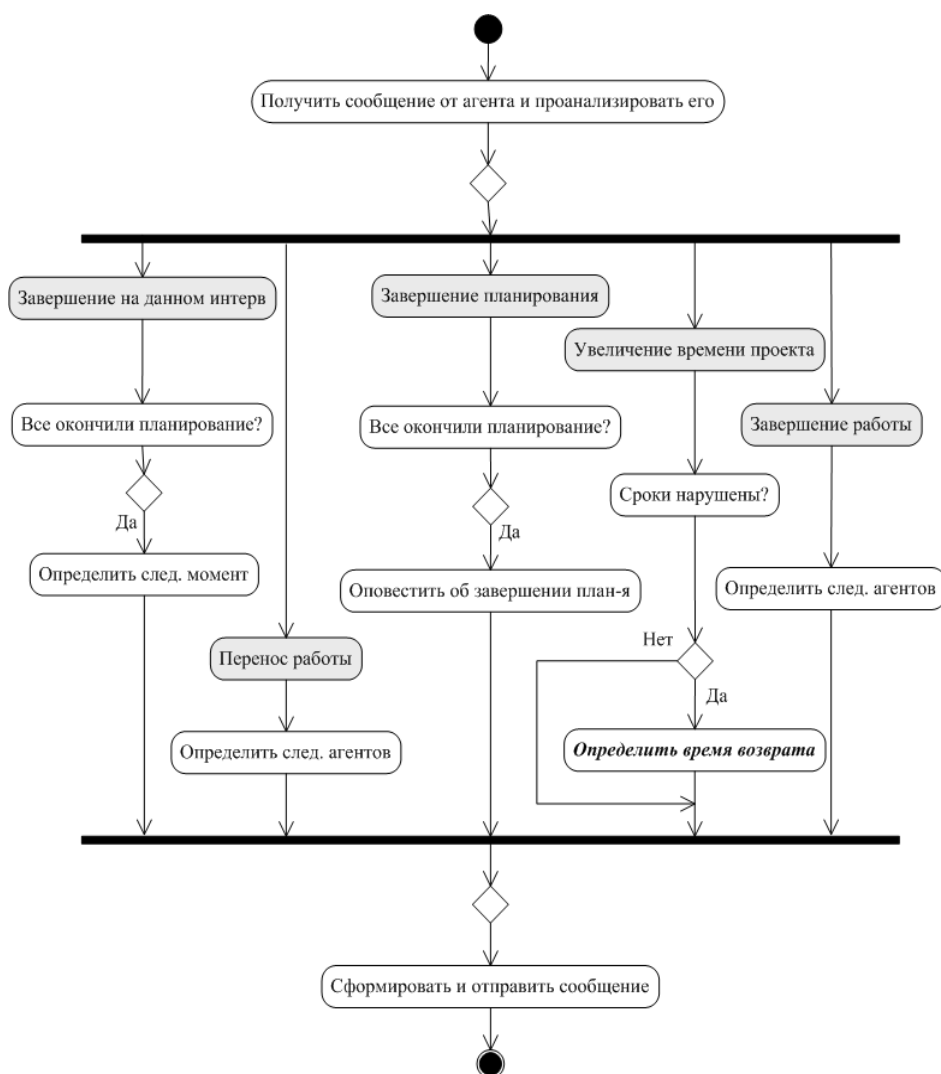


Рис. 2. Диаграмма деятельности агента координации

### Выводы

Целью работы являлась оптимизация функционирования многостадийных обслуживающих комплексов путем составления расписания на основе мультиагентного подхода.

В результате были решены следующие задачи:

1. Сформулирована математическая постановка задачи, учитывающая наличие нескольких центров, обобщенный ресурсный

критерий, а также временные и ресурсные ограничения.

2. Обоснована целесообразность использования мультиагентного подхода к решению данной задачи.

3. Разработана структура мультиагентной системы и определены основные функции агентов, а также специфика их взаимодействия

Предложенный подход составил основу алгоритмического программного обеспечения, предназначенного для оптимизации функционирования сложных систем с несколькими центрами обслуживания путем составления расписания их работы.

#### Литература

1. Прилуцкий, М.Х. Многокритериальные многоиндексные задачи объемно-календарного планирования / М.Х. Прилуцкий // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2007. №1. С.83-87.
2. Prilutskij M.Kh. Multikriterial distribution of a homogeneous recourse in hierarchical systems / M.Kh. Prilutskij // Автоматика и телемеханика. 1996. № 2. С. 139-146.

3. Бурков, В.Н. Как управлять проектами / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков. – М.: Синтег, 1997. – 188 с.

4. Бурков, В.Н. Теория активных систем: Состояние и перспективы / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков. – М.: Синтег, 1999. – 128 с.

5. Тарасов, В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика/ В.Б. Тарасов. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 352 с.

6. Олейникова, С.А. Математическая модель и оптимизационная задача составления расписания для мультипроектной системы с временными и ресурсными ограничениями и критерием равномерной загрузки/ С.А. Олейникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. – Т.9. - №6.3. - С. 58-61.

Воронежский государственный технический университет

## MULTIAGENT SYSTEM FOR OPTIMIZATION OF COMPLEX SERVICE COMPLEXES FUNCTIONING

**S.A. Oleinikova**

Full Doctor, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
[e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com](mailto:s.a.oleynikova@gmail.com)

The subject matter of this study in this paper are complex multistage systems with several service centers and mutual inter-dependence between tasks, the duration of which is of random value. The goal of the study is to optimize the operations of such systems by creating a schedule for their functioning. The criterion that makes it possible to use the resources rationally time-wise was chosen as a criterion of optimality. The paper formulated an optimization task that takes into account the existence of several service centers, mutual dependence between tasks, their random execution time and resource constraints. Analysis of different possible approaches to the above task showed the expediency of using multi-agent technologies. Taking into account the peculiarities of the problem, the special structure of the multi-agent system was proposed. It includes a pre-planning agent, performing the preparatory stage of forming of the schedule, intelligent agents who execute a schedule for the service center assigned to them, and the coordination agent. The paper outlines the main functions for agents of all categories. Particular attention is paid to the specific features of their interaction.

Thus, the optimization approach to the functioning of multi-stage service complexes by scheduling their work, based on the use of interacting intellectual agents and the possibility to make a sub-optimal decision within acceptable time limits was developed

Key words: multi-agent system, optimization task, scheduling

#### References

1. Prilutskij M. Kh. "Multi-criteria and multi-index resource scheduling problems", *Russian Academy of Science Journal: Theory and Systems of Control*, 2007, vol. 46, no. 1, pp. 78-82 pp
2. Prilutskij M. Kh. "Multi-criteria distribution of a homogeneous recourse in hierarchical systems", *Automatics and Remote Control*, 1996, no. 2, 139-146 pp.
3. Burkov V.N., Novikov D.A. "How to manage projects" ("Kak upravlyat proektami") Moscow, Sinteg Publisher, 1997, 188 p.
4. Burkov V.N., Novikov D.A. "Theory of active systems: Their state and prospects" ("Teoriya aktivnyh system: Sostoyaniya i perspektivi"), Moscow, Sinteg Publisher, 1999, p.
5. Tarasov V.B. "From Multiagent Systems to Intellectual Organizations: Philosophy, Psychology, Informatics" ("Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika"), Moscow, Editorial URSS Publ., 2002, 352 p.
6. Oleinikova S.A. "Mathematical model and optimization problem of scheduling for multi-project system with time and resource constrains and criteria of uniform download", *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2013, vol. 9, no. 6-3, 58-61 pp.



## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ОЦЕНКА ПОЖАРНЫХ РИСКОВ ПРОИЗВОДСТВА НЕФТЕПОЛИМЕРНОЙ СМОЛЫ

**А.В. Жучков, А.М. Чуйков, А.В. Мещеряков,  
В.И. Лукьяненко, С.Ю. Зайчиков, И.Е. Шабанов**

Рассмотрены теплоэнергетические аспекты принципиальной технологической схемы производства нефтеполимерной смолы. Отмечается необходимость снижения парциального давления паров нефтеполимерной смолы для повышения качества получаемой продукции. Обсуждаются возможные пути решения этой проблемы: вакуумирование технологических аппаратов, разбавление газовой фазы перегретым водяным паром. Предлагаются различные варианты аппаратурного оформления участка отгонки непрореагировавших компонент в процессе производства нефтеполимерной смолы.

Изложена методика экспериментального определения давления насыщения паров нефтеполимерной смолы в зависимости от температуры. Приведены результаты экспериментального исследования равновесного давления от температуры для нефтеполимерной смолы. Получена аналитическая зависимость равновесного давления от температуры.

Выполнена оценка пожарных рисков производства. Определены объемные концентрации паров нефтеполимерной смолы пиропласт 2К, соответствующие верхнему и нижнему концентрационным пределам воспламенения. Предложена функциональная зависимость равновесного давления пара от температуры среды. Определен интервал парциальных давлений и температур, в котором возможно воспламенение технологической жидкости. Установлено, что наибольший риск возгорания технологического сырья присутствует на стадии его нагревания до рабочей температуры. В основном режиме отгонки летучих компонентов концентрация паров превышает верхний концентрационный предел воспламенения, что делает маловероятным ее возгорание

Ключевые слова: пожарная безопасность, концентрационные пределы воспламенения, отгонка, давление насыщенных паров, нефтеполимерные смолы

Нефтеполимерные смолы (НПС) находят широкое применение в лакокрасочной промышленности для производства нефтеполимерной олифы, термоплавких клеев, ПВХ-плиток, герметиков, мастик, в технологиях добычи и транспортировки нефти и др.

На рис. 1 представлена принципиальная технологическая схема периодического производства НПС.

Процесс отгонки непрореагировавших углеводородов можно интенсифицировать за счет подачи водяного пара в полимеризатор, поскольку парциальное давление газообразных углеводородов при этом снижается. Температура отгонки также снижается.

Температурный режим производства нефтеполимерных смол определяется рабочими концентрациями НПС, для определения которых необходимо располагать данными по равновесной концентрации паров НПС в зависимости от температуры.

При получении НПС исходным сырьем сначала заполняется полимеризатор 1 (или 10). Слой сырья продувают инертным газом, а затем нагревают до температуры 250 °С за счет циркуляции теплоносителя через рубашку аппарата [1]. Непрореагировавшие углеводороды из полимеризатора 1 (10) поступают в конденсатор-холодильник 2 (4), где они конденсируются и постурают в сборник 3 (5).

Полимеризаторы 1 и 10 последовательно переключаются. При работающем полимеризаторе 1, в полимеризаторе 10 осуществляют выгрузку готового продукта и загрузка последующей партии сырья. После окончания работы полимеризатора 1, в нем выполняются операции выгрузки – загрузки, а полимеризатор 10 включается в работу и т.д.

Технология получения нефтеполимерной смолы (НПС) термическим способом из фракции С9 продуктов пиролиза является наиболее перспективной с экономической точки зрения, а также с точки зрения качества получаемой продукции. Процесс необходимо

---

Жучков Анатолий Витальевич - ВИ ГПС МЧС России, д-р техн. наук, профессор, тел. 8-908-140-76-61  
Чуйков Александр Митрофанович – ВИ ГПС МЧС России, канд. техн. наук, начальник кафедры, тел. 8-920-226-73-87  
Мещеряков Алексей Викторович - ВИ ГПС МЧС России, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-920-402-38-59, e-mail: [Malviktp@gmail.com](mailto:Malviktp@gmail.com)  
Лукьяненко Владимир Ильич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-920-438-09-01  
Зайчиков Сергей Юрьевич - ООО «Конструкторское бюро МКС», инженер, тел. 7-908-140-76-61, e-mail: [@yandex.ru](mailto:@yandex.ru)  
Шабанов Игорь Егорович - ООО «Конструкторское бюро МКС», канд. техн. наук, директор, тел. 8-910-283-36-69, e-mail: [79081407661@yandex.ru](mailto:79081407661@yandex.ru)

вести в определенных режимах узкого диапазона температур и давлений.

Одной из наиболее важных стадий процесса получения НПС является отгонка высококипящего растворителя который представляет собой смесь дифенилметана, трифенилметана, дифенила и других веществ с температурой кипения более 250°C [3] из расплава полимера. При столь высокой температуре происходит деструкция компонентов полимера, его потемнение и ухудшение его качества.

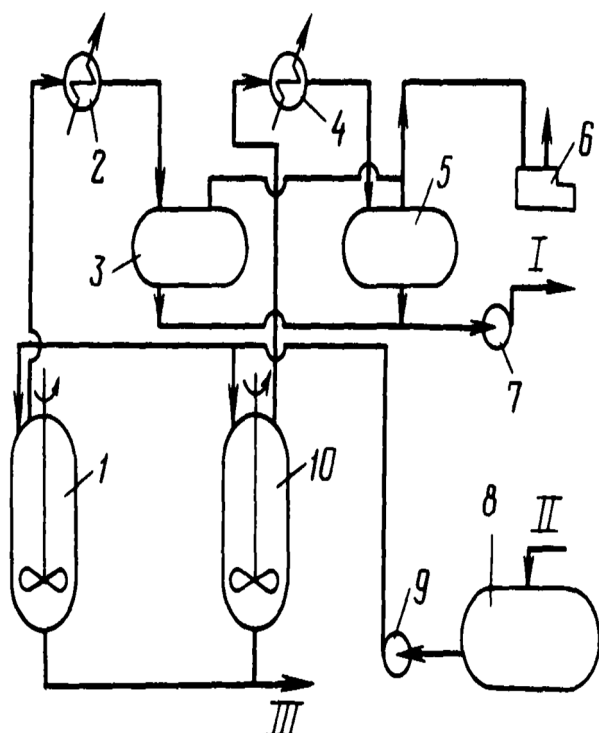


Рис. 1. Технологическая схема производства НПС. 1, 10 – полимеризаторы; 2, 4 – холодильники-конденсаторы; 3, 5, 8 – емкости; 7, 9 – насосы

Проблема может быть решена при использовании специализированных аппаратов с малым гидравлическим сопротивлением, высокой площадью поверхности контакта фаз в среде перегретого водяного пара [1]. Задачей является разработка методов расчета параметров процесса и определение теплофизических характеристик применяемых растворителей, что необходимо для оценки пожароопасности, а также моделирования процессов тепло и -массообмена в соответствующем технологическом оборудовании. С этой целью выполнено исследование зависимости давления насыщения паров НПС от температуры.

Пожарные риски нефтеполимерного производства определяются концентрацией углеводородов в паровой фазе, которая

определяется температурой жидкости в полимеризаторе.

Воспламенение и распространение пламени в технологической среде возможно в интервале концентраций углеводородов в паровой фазе в интервале от нижнего до верхнего концентрационных пределов углеводородов (НКПР и ВКПР, соответственно). Эти концентрационные пределы могут быть рассчитаны по формуле [2,6]:

$$\varphi_{n(\phi)} = \frac{100}{a \cdot n + b}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{n(\phi)}$  - НКПР (ВКПР), % (объемн.); n- стехиометрический коэффициент при кислороде ( $O_2$ ) в реакции горения; a, b – эмпирические параметры (табл. 1).

Таблица 1  
Параметры a и b для расчета концентрационных пределов распространения пламени

Концентрационные пределы распространения пламени		Параметры	
		a	b
Нижний		8.684	4.67 9
Верхний	$n \leq 7.5$	1.550	0.56 0
	$n > 7.5$	0.768	6.55 4

Объемная концентрация углеводородов в паровой фазе связана с его парциальным давлением следующим соотношением:

$$\varphi = \frac{100 P_n}{P_0}, \quad (2)$$

где  $P_n$  – парциальное давление углеводородов в паровой фазе;  $P_0$  – общее давление парогазовой среды.

Горение жидкости возможно, если  $\varphi_n < \varphi_v$

Давление насыщенного пара при известной температуре может быть определено по уравнению Антуана

$$\lg P_n = A - \frac{B}{C + t}, \quad (3)$$

или уравнению Вант-Гоффа

$$\frac{d(\ln P_n)}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2}, \quad (4)$$

где  $\Delta H$  – теплота испарения жидкости, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная ( $R=8.31$  Дж/моль).

Практическое использование соотношения (3) сопряжено с необходимостью предварительного определения эмпирических параметров  $A$ ,  $B$  и  $C$  на основе экспериментального исследования. Использование соотношения (4) для НПС затруднено отсутствием точной информации о химическом составе НПС и, как следствие, отсутствием данных по теплоте испарения НПС ДН.

Поскольку НПС является многокомпонентной системой, точный химический состав которой неизвестен, то единственным методом получения такой зависимости является экспериментальное исследование [5].

Зависимость давления паров НПС от температуры определялась на экспериментальной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.

В колбу 1, соединенную с U-образным манометром 4 трубкой 6, с помощью шприца 2 вводили 0,1 л исследуемой жидкости.

В качестве манометрической жидкости U-образного манометра использовался перфтордекалин с плотностью  $\rho = 1,94 \text{ г/см}^3$ . Постоянство температуры в исследуемой системе поддерживалось при помощи термостата 5, контроль температуры в рабочем объеме осуществлялся с помощью термометра 3.

После ввода смеси давление в системе увеличивалось из-за испарения компонентов растворителя НПС. Его величина измеряемое U-образным манометром 4.

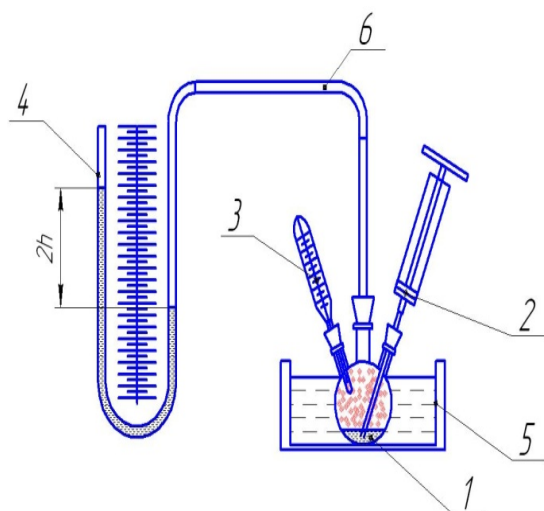


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения равновесных параметров НПС

1 – колба; 2 – шприц; 3 – термометр; 4 – U-образный манометр; 5 – термостат; 6 – трубка соединительная.

Парциальное давление паров НПС определялось, как разность между общим давлением, измеренным U-образным манометром 4, и парциальным давлением воздуха, содержащимся в колбе и соединительных трубопроводах установки.

Эксперименты по определению равновесного давления НПС выполнялись в следующей последовательности.

В начальный момент времени (при  $\tau = 0$ ) когда жидкость (НПС) введена в колбу 1, а испарение незначительно, весь рабочий объем заполнен воздухом (рис.2). Величина этого объема равна сумме объемов колбы (за вычетом объема жидкости), соединительного трубопровода, свободного объема правого колена манометра и определяется по формуле:

$$V_0 = V_{\text{я}} + h_0 s - V_{\text{ж}}, \quad (5)$$

где  $V_0$  - объем газового пространства в начальный момент времени (при  $\tau = 0$ ),  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{я}}$  - рабочий объем ячейки (с учетом объема всех коммуникаций),  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{ж}}$  - объем введенной в ячейку жидкости,  $\text{м}^3$ ;  $s$  - площадь сечения манометрической трубки,  $\text{м}^2$ ;  $h_0$  - снижение уровня относительно нулевой отметки в правом столбце манометра, вызванное вводом жидкости в ячейку, м.

Давление в системе определяется зависимостью:

$$P_0 = P_{\text{ат}} + 2\rho_{\text{м}} g h_0, \quad (6)$$

где  $P_0$  - давление в рабочем пространстве в начальный момент времени (при  $\tau = 0$ ), Па;  $P_{\text{ат}}$  - атмосферное давление, Па;  $\rho_{\text{м}}$  - плотность манометрической жидкости в манометре,  $\text{кг/м}^3$ ;

В произвольный момент времени после начала испарения ( $\tau > 0$ ) объем газового пространства увеличивался из-за понижения уровня жидкости в правом колене манометра за счет роста давления в системе, т.е.

$$V = V_{\text{я}} + h s - V_{\text{ж}}, \quad (7)$$

где  $V$  - объем газового пространства в рабочий момент времени после начала испарения ( $\tau > 0$ ),  $\text{м}^3$ ;  $h$  - снижение уровня относительно нулевой отметки в правом колене манометра, вызванное испарением жидкости в системе, м.

Рабочее давление в системе в произвольный момент времени соответственно определяется зависимостью:

$$P = P_{\text{ат}} + 2\rho_{\text{м}} g h. \quad (8)$$

Давление насыщенных паров исследуемого растворителя определялось по формуле:

$$P = P_{\text{ам}} \cdot \frac{V_0}{V} \cdot \frac{T}{T_0} \quad (9)$$

где  $T$ ,  $T_0$  – текущая и начальные температуры, соответственно.

Результаты экспериментальных исследований по равновесным параметрам НПС представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Равновесного давления паров НПС в зависимости от температуры

№ эксперимента	Температура, °С	Показания манометра, мм	Равновесное давление паров НПС, Па
1.	75	1	133,322
2.	86	2	266,644
3.	95	3	399,966
4.	100	4	533,288
5.	110	5	666,610
6.	112	6	799,932
7.	115	7	933,254
8.	118	8	1066,576
9.	120	9	1199,898
10.	123	10	1333,220
11.	130	15	1999,830
12.	139	20	2666,440
13.	144	25	3333,050
14.	148	30	3999,660
15.	152	40	5332,880
16.	160	50	6666,100
17.	165	60	7999,320
18.	168	70	9332,540
19.	172	80	10665,76
20.	183	100	13332,20
21.	200	150	11998,98
22.	212	200	26664,40
23.	216	250	33330,50
24.	220	300	39996,60
25.	230	400	53328,80

На основании экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость равновесного давления паров НПС от температуры:

$$p(T) = p_0 \cdot \exp \left[ A \cdot \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (10)$$

где  $A$  – эмпирический коэффициент, определенный методом наименьших квадратов по экспериментальным данным (табл. 2).

Установлено, что  $A = 6800$ .

На рис. 3 представлено сравнение опытных данных с рассчитанными по формуле (10).

Полученные экспериментальные и расчетные данные обладают удовлетворительной сходимостью. Относительное отклонение не превышает 20 %.

При известных нижнем и верхнем концентрационных пределах распространения пламени для НПС можно оценить температурный интервал, в котором возможно воспламенения НПС.

Для фракции  $C_9$  стехиометрический коэффициент при кислороде в реакции горения  $n=14$ . Расчеты концентрационных пределов по формуле (1) позволяет получить следующие значения:  $\varphi_H = 0.8 \%$ ,  $\varphi_B = 5.8 \%$  (объемных). Парциальные давления паров НПС, соответствующие этим концентрациям, можно определить по формулам:

$$P_{\text{п,н}} = P_0 \cdot \frac{\varphi_H}{100}, \quad (11)$$

$$P_{\text{п,в}} = P_0 \cdot \frac{\varphi_B}{100}, \quad (12)$$

где  $P_0 = 10^5$  Па – атмосферное давление.

Для указанных концентраций  $\varphi_H$ ,  $\varphi_B$  эти давления равны:  $P_{\text{п,н}} = 800$  Па,  $P_{\text{п,в}} = 5800$  Па. Температуры НПС, соответствующие этим давлениям могут быть найдены из табл. 1 или рассчитаны по формуле (10):  $t_H = 112^\circ\text{C}$ ,  $t_B = 157^\circ\text{C}$ .

Таким образом, опасность воспламенения технологической среды наиболее высока на этапе ее нагревания. В режиме отгонки рабочая температура превышает  $t_B$  ( $t=250^\circ\text{C}$ ). Возгорание жидкости в этих условиях невозможно, поскольку превышен верхний концентрационный предел.

Полученная зависимость давления насыщения паров НПС от температуры (10) может быть также использована при определении движущей силы процесса паровой отгонки НПС. Она позволяет оценить температурный интервал, при котором возможно возгорание НПС, создать математическую модель процесса отгонки тяжелого растворителя из расплава нефтеполимерной смолы пиропласт 2К и разработать методику инженерного расчета режимов ведения процесса отгон-

ки, обеспечить наименьшую вероятность ее возгорания.

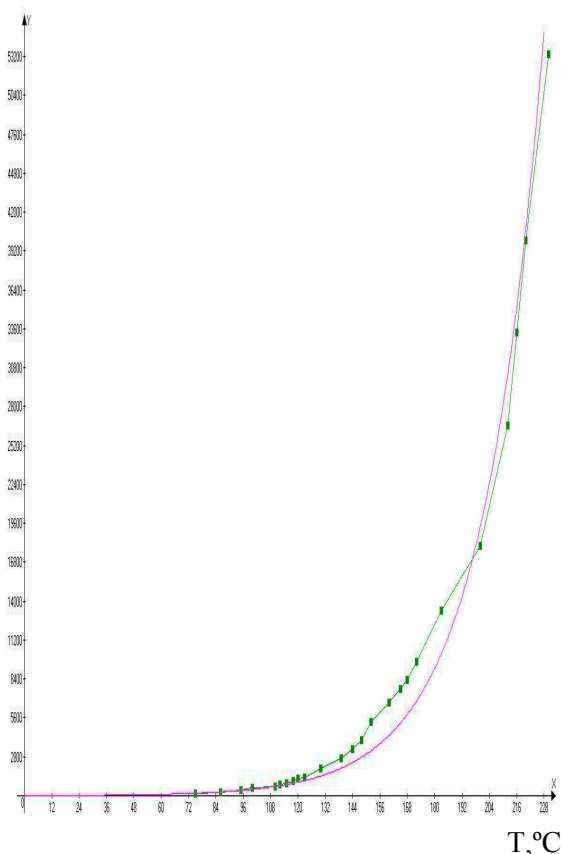


Рис. 3. Графическая зависимость расчетных и экспериментальных значений давления насыщенных паров НПС от температуры

Воронежский институт государственной противопожарной службы МЧС России  
Воронежский государственный технический университет  
ООО "Конструкторское бюро МКС", г. Воронеж

## HEAT-ENERGY CHARACTERISTICS AND FIRE RISKS ASSESSMENT OF OIL POLYMER RESIN PRODUCTION

**A.V. Zhuchkov<sup>1</sup>, A.M. Chuikov<sup>2</sup>, A.V. Meshcheryakov<sup>3</sup>, V.I. Lukyanenko<sup>4</sup>, S.Yu. Zaichikov<sup>5</sup>,  
I.E. Shabanov<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh Institute of Russian Ministry for Emergency Situations, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [79081407661@yandex.ru](mailto:79081407661@yandex.ru)

<sup>2</sup>PhD, Head of the Department of Chemistry and Combustion Processes, Voronezh Institute of Russian Ministry for Emergency Situations, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [hipg\\_vigps@mail.ru](mailto:hipg_vigps@mail.ru)

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Department of Chemistry and Combustion processes, Voronezh Institute of Russian Ministry for Emergency Situations, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [Malviktp@gmail.com](mailto:Malviktp@gmail.com)

<sup>4</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [lukyanenkol@yandex.ru](mailto:lukyanenkol@yandex.ru)

<sup>5</sup>Engineer, ISS Design Bureau, Voronezh, Russian Federation

### Литература

1. Думский Ю.В. Химия и технология нефтеполимерных смол / Ю.В. Думский, Б.И. Но, Г.М. Бутов. М.: Химия, 1999.
2. Лопанов А.Н. Физико-химические основы теории горения и взрыва / А.Н. Лопанов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 149 с.
3. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии / С. Уэйлес. В 2 ч. М.: Мир, Ч.2.1989.
4. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик. М.: Наука, 1972.
5. Удовенко В.В. Давление пара трехкомпонентных систем / В.В. Удовенко, Л.П. Александрова // Журн. физ. химии. 1960. Т. 34. № 6. С. 1367-1372.
6. Портола В.А. Расчет процессов горения и взрыва / В.А. Портола, Н.Ю. Луговцова, Е.С. Торосян. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 108 с.

Thermal energy characteristics of the basic technological production method of petroleum resin are reviewed in the paper. Paper also emphasizes the need to reduce partial vapor pressure of petroleum resin to improve the quality of the products obtained as a result of the processing. The authors suggest possible solutions of this problem, such as evacuation of technological devices or dilution of the "gas phase" with superheated steam. Various other solutions for the placement of unreacted components during the production of petroleum resin inside the device itself are also proposed.

The technique for the experimental identification of the vapor saturation pressure of petroleum polymer resin, which closely correlates with the temperature, is also introduced. The results of the experimental study of the equilibrium pressure for petroleum polymer resin depending on the temperature are presented. The analytical dependence of the equilibrium pressure and the temperature is obtained.

Fire risks assessment of production is provided. The volumetric concentrations of the vapor of petroleum resin "Pyroplast-2K", corresponding to the upper and lower limits of ignition concentration, are identified. A functional inter-dependence of the equilibrium vapor pressure and the temperature of environ, is outlined. The interval of partial pressures and temperatures, in which the ignition of the processed fluid is possible is confirmed experimentally. It is also confirmed that the greatest risk of ignition of technological raw materials appears at the stage when it is heated to the level of the operating temperature. In the basic mode of volatile components distillation, the concentration of vapors exceeds the upper concentration limit of ignition, which makes the ignition of the product unlikely

Key words: fire safety, concentration limits of ignition, distillation, saturated vapor pressure, petroleum polymer resins

### References

1. Dumsky Yu.V., No. B.I., Butov G.M. "Chemistry and technology of petroleum-resin resins" ("Khimiya i tekhnologiya neftepolimernykh smol"), Moscow, Chemistry, 1999.
2. Lopanov A.N., "Physicochemical basics of the combustion and explosion theory" ("Fiziko-khimicheskiye osnovy teorii goreniya i vzryva"), Belgorod, Belgorod State University Publishing House, 2012, 149 p.
3. Weiles S., "Phase equilibrium in chemical technology", (in 2 volumes), Moscow, Mir, vol. 2, 1989.
4. Vargaftik N.B., "Handbook of thermophysical properties of liquids and gases" ("Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam zhidkostey i gazov"), Moscow, Nauka, 1972.
5. Udovenko V.V., Aleksandrova L.P., "Vapor pressure of three-component systems", Physical and Chemical Journal, 1960, vol. 34, no.6, pp. 1367-1372.
6. Portola V.A., Lugovtsova N.Yu., Torosyan E.S., "Calculation of combustion and explosion processes" ("Raschet protsessov goreniya i vzryva"), Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publishing house, 2012, p.108.

## К ВОПРОСУ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗНОТЕМПЕРАТУРНОГО КОНДЕНСАЦИОННОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

П.А. Солженикин, В.Г. Стогней, В.В. Черниченко

В статье проводится сравнительный анализ работы общеизвестных газоочистных установок и обосновывается целесообразность применения универсального разнотемпературного фильтра, обладающего способностью очищать высокотемпературные потоки больших расходов. Приводится описание установки для очистки воздуха от аэрозольных частиц на основе конденсационного фильтра, и экспериментальных исследований по изучению тепломассобменных закономерностей для использования их при разработках промышленных разнотемпературных конденсационных фильтров для очистки газообразных выбросов. Искомые зависимости определялись на основе изменения разности температур между рабочими стенками газового тракта фильтра, меняющегося расхода загрязненного газового потока через установку и давления в рабочем канале. Высокая эффективность фильтра обусловлена разнотемпературной организацией температурного поля в нем. Исследуемый фильтр обладает высокой степенью очистки, малым гидравлическим сопротивлением и малой энергоемкостью. Применение предлагаемого конденсационного метода очистки даст значительный экономический эффект при использовании на предприятиях металлургической промышленности, при улавливании ценных продуктов, находящихся в тонкораспыленном состоянии, при работе на предприятиях нефтяной и газовой промышленности для удаления твердых частиц, конденсата тяжелых углеводородов и водяных паров. На данный способ очистки и на конструкцию установки получены 10 патентов на изобретение

Ключевые слова: фильтр, пересыщение, конденсация, газовый поток

### Введение

В настоящее время, одновременно с ростом и бурным развитием промышленности, все большее внимание уделяется ее экологической обоснованности, а именно: проблеме очистки и утилизации отходов. На данном этапе, когда безотходная технология находится в периоде становления, основной задачей очистки является доведение содержания токсичных примесей в отходах, в частности, в газовых смесях, до предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных санитарными нормами [1]. Многие промышленные предприятия еще не оснащены в достаточной степени необходимыми установками, обеспечивающими требуемое качество очистки газовых потоков, в связи с чем исследования, направленные на решение данной проблемы, являются необходимыми и актуальными.

При выборе установок для разделения неоднородных систем следует учитывать целый ряд факторов. Прежде всего, следует принять во внимание основные требования, которые предъявляются к качеству разделения этих систем. Они могут быть обусловлены требованиями технологии (к примеру, защитой насосов или вентиляторов от быстрого износа из-за разрушения их лопастей твердыми частицами), экологическими соображениями (в целях обеспечить чистоту водоемам и воздушной атмосфере), а также ценностью взвешенных частиц в газе или жидкости. Помимо этого, важно

учитывать еще и концентрацию дисперсных частиц, их распределение по тем или иным размерам, температуру и агрессивность среды и так далее. И, разумеется, следует принимать в расчет технические и экономические показатели работы самих аппаратов.

### Постановка задачи

Произведём небольшое сравнение распространённых промышленных фильтров, отметив их преимущества и недостатки. Рассмотрим для примера рукавные фильтры, электрофильтры, пылеосадительные камеры и циклоны.

Наиболее предпочтительными по эксплуатационным и капитальным затратам в плане использования являются такие установки, как циклоны и пылеосадительные камеры. Однако они способны улавливать только лишь довольно крупные частицы. Именно поэтому в качестве самостоятельной аппаратуры их лучше всего применять для очистки газов от крупных пылинок на объектах, имеющих малую мощность. Основными недостатками циклонов являются: высокое гидравлическое сопротивление (1250-1500 Па); низкая эффективность улавливания частиц размером менее 5 мкм; невозможность использования для улавливания слипающейся пыли. Они также не могут обеспечить полную очистку газов от мелких частиц пыли из-за сил инерции и центробежных сил, которые возникают тогда, когда происходит перемена направления газового потока. Кроме того, такие фильтры на продвижение газа затрачивают огромное количество электроэнергии, да и сами от воздействия абразивной пыли подвергаются быстрому износу.

Стоит отметить, что такие установки, как электрофильтры, способны обеспечить высокую степень очистки газа, в том числе и от мельчайших частичек. Однако такие устройства довольно часто требуют предварительной

Солженикин Павел Анатольевич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: scorpiion-050806@yandex.ru  
 Стогней Владимир Григорьевич – ВГТУ, Заслуженный работник ВШ, профессор, e-mail: sto@sci.vrn.ru  
 Черниченко Владимир Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: vlad1427@yandex.ru

подготовки газов. К тому же они совершенно не подходят для отделения частиц, имеющих небольшое удельное электрическое сопротивление а также для очистки взрывоопасных газов.

Рукавные фильтры способны давать высокую степень очистки от любого размера пылинок более 1 микрона, однако они могут эффективно работать лишь при относительно небольшой запыленности исходных газов. Кроме того, эти аппараты требуют поддержания температуры газов в определенных рамках. Рукавные фильтры по капитальным затратам несколько дешевле тех же электрофильтров, но у них больше расходы на эксплуатацию. К недостаткам рукавных фильтров можно отнести тот факт, что они не могут очищать газы от химически агрессивных газов, влажной и липкой пыли

Выбор газоочистительного фильтра обусловлен следующими факторами:

- свойствами пылевых частиц;
- размером пылинок;
- уровнем влажности;
- начальным содержанием пыли в газе;
- необходимой степенью очистки газа.

Для удобства сравнения газоочистительных установок по таким показателям, как начальная концентрация пыли, размер отделяемых частиц пыли, создаваемое гидравлическое сопротивление, степень очистки, отобразим данные в таблице ниже.

Достаточно различная степень очистки, ограниченный размер отделяемых частиц пыли, несовершенство конструкций, малая эффективность, громоздкость и другие недостатки говорят о несовершенстве газоочистительного оборудования, в связи с чем целесообразно применение универсальной газоочистительной установки, не имеющей подобных недостатков, – разнотемпературного конденсационного фильтра.

Сравнение газоочистителей

Тип аппаратов	Начальная концентрация пыли, мг/м <sup>3</sup>	Размер отделяемых частиц пыли, мкм	Гидравлическое сопротивление, мм вод.ст	Степень очистки, %
Рукавные фильтры	≥200	≥2	70–100	≥99,5
Электрофильтры	—	≥0,005	—	≤99,5
Пылеосадительные камеры	—	≥100	—	40–60
Циклоны: конические батарейные	≥1000	≥15	40–70	≤90
	—	≥15	—	≥95

## Методика эксперимента

Исследования по очистке газовых потоков с помощью разнотемпературного конденсационного фильтра проводились на установке (рис. 1), основными узлами которой являются компрессор 1, увлажнитель сжатого воздуха 4, подогреватель 5, разнотемпературный конденсационный фильтр 6 (рис. 2), влагоотделитель 7. Фильтр выполнен в виде цилиндрической емкости, внутри которой двумя поверхностями (горячей и холодной стенками) образован канал для прохода газового потока [2]. При этом расстояние между холодной и горячей поверхностями поддерживается равным 80 мм при высоте канала 500 мм. Пространство между неподвижной горячей стенкой 3 и корпусом фильтра 1 заполнено горячей водой, требуемая температура которой достигается с помощью электронагревателей. Холодная стенка канала фильтра 5 может перемещаться по специальным направляющим и фиксироваться в заданном положении, определяющем ширину канала. Необходимая температура холодной поверхности обеспечивается изменением параметров и расхода проточной холодной водой, проходящей через коробчатую емкость. Коробчатая емкость соединяется с трубопроводом холодной воды 6 съемным эластичным элементом. Для сбора и измерения количества выделяемого конденсата в нижней части камеры предусматривается система отвода конденсата 7. Сжатый воздух, вырабатываемый поршневым компрессором, подавался в разнотемпературный фильтр, в котором происходила конденсация влаги. Часть конденсата улавливалась в фильтре, а оставшаяся часть - в расположенном за ним влагоотделителе. Комплект, состоящий из увлажнителей и подогревателя, позволял изменять влажность и температуру воздушного потока в широком диапазоне. Изменение расхода и давления сжатого воздуха осуществлялось с помощью регулирующих задвижек и настройки компрессора.

В процессе экспериментальных исследований изучались закономерности теплообмена в фильтре для использования их при разработках промышленных разнотемпературных конденсационных фильтров для осушения больших количеств газовых потоков или для очистки газообразных промышленных выбросов [3]. Рассматривались много-численные варианты изменения влагосодержания, относительной влажности воздуха в фильтре и количество выделяемого конденсата при изменении разности температур, расстояния между холодной и горячей поверхностями и температуры, влажности и давления воздуха на входе в камеру.



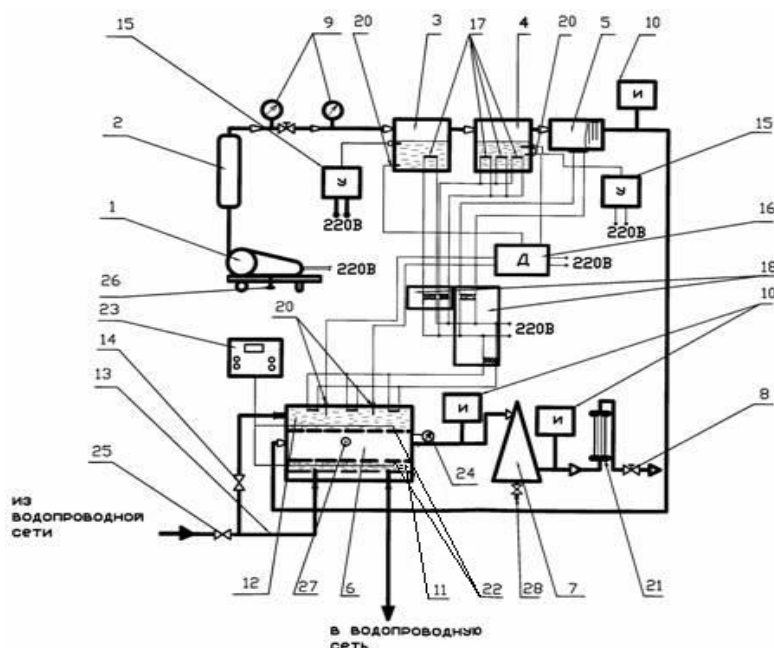


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования режимов работы разнотемпературного конденсационного фильтра: 1 – компрессор; 2 – ресивер; 3 – дополнительный увлажнитель; 4 – основной увлажнитель; 5 – подогреватель; 6 – разнотемпературная конденсационная камера; 7 – влагоотделитель; 8 – регулирующий вентиль; 9 – манометр редуктора; 10 – измерительный блок; 11 – холодная стенка; 12 – горячая стенка; 13 – водопроводные шланги; 14 – уровнемер воды; 15 – уровнемер воды; 16 – измеритель-регулятор температуры; 17 – водяной тэн; 18 – автотрансформатор; 19 – вентиль редуктора; 20 – хромель-копелевая термопара; 21 – ротаметр; 22 – термопары; 23 – потенциометр; 24 – образцовый манометр; 25 – водопроводный вентиль; 26, 27, 28 – сливной вентиль

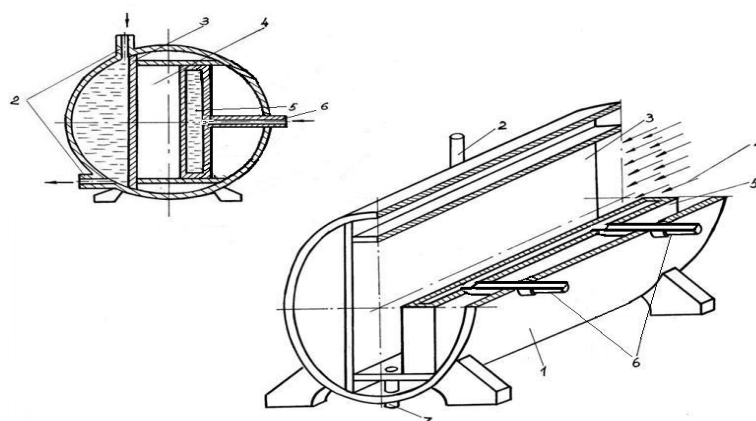


Рис. 2. Разнотемпературный конденсационный фильтр: 1 – корпус; 2 – подвод и отвод горячей воды; 3 – горячая стенка; 4 – поток в камере (канал); 5 – холодная стенка; 6 – подвод и отвод холодной воды; 7 – слив конденсата

Характер изменения критериев Рейнольдса, Прандтля, Нуссельта и других характерных величин при изменении параметров конденсационного фильтра и газового или воздушного потоков показаны на рис. 3, 4, 5. Из них следует, что изменение разности температур горячей и холодной поверхности фильтра приводит к изменению степени пересыщения потока и интенсивности конденсации. Это позволяет осуществлять автоматическую настройку конденсационного фильтра на оптимальный режим работы при изменении параметров осушаемого или очищаемого потока.

Зависимости диффузионного критерия Нуссельта  $Nu$  и коэффициента массоотдачи  $\beta$  позволяют определить диапазон разности температур горячей и холодной поверхностей фильтра, при которых обеспечиваются наилучшие условия конденсации. Этот диапазон  $\Delta t$  равен  $35 - 55$  °С. Зависимость критерия Рейнольдса от разности температур поверхностей характеризует процесс конденсации водяных паров в потоке. Рост температуры капельной жидкости (воды), содержащейся в воздушном потоке, приводит к существенному уменьшению критерия Прандтля,

что позволяют определять интервал температур стенок фильтра, при которых он начинает

работать в режиме сушки [3].

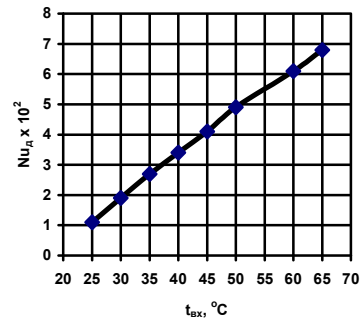
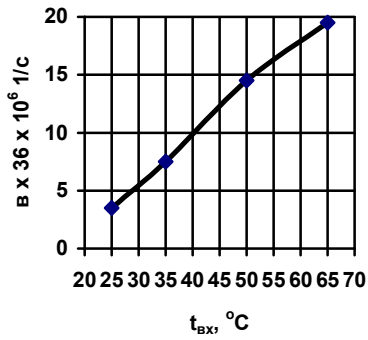


Рис. 3. Изменение критерия  $Nu_d$  и коэффициента  $\beta$  при изменении  $t_{\text{вх}}$  (температура потока на входе в канал)

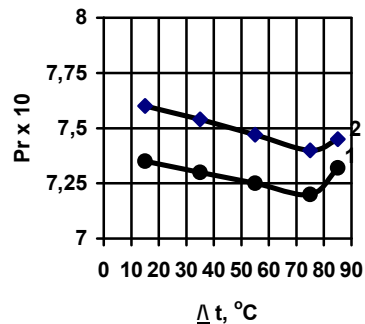
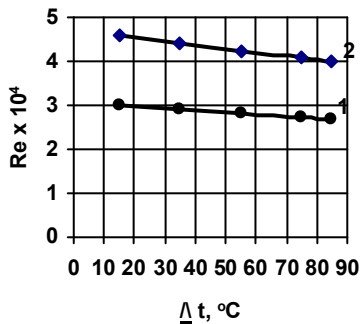
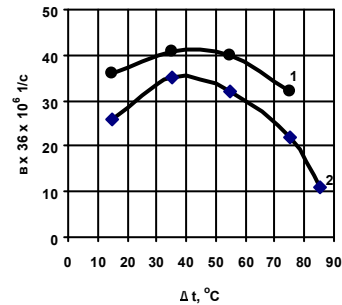
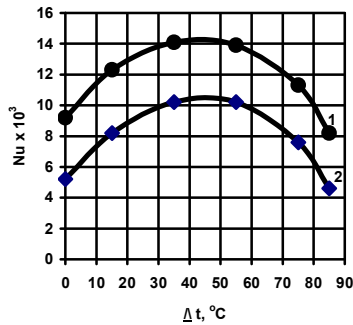


Рис. 4. Изменение критериев  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Nu$  и коэффициента  $\beta$  при изменении  $\Delta t$  (высота канала: 1 – 0,6 м; 2 – 0,4 м)

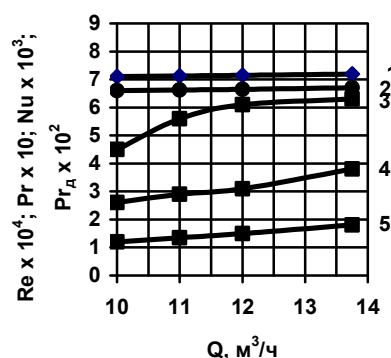
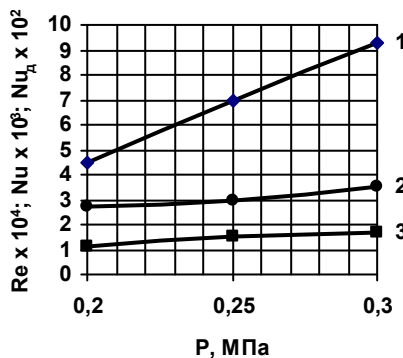


Рис. 5. Изменение критериев подобия при изменении давления (а) и расхода газов (б): а) 1 –  $Re \times 10^4$ ; 2 –  $Nu \times 10^3$ ; 3 –  $Nu_d \times 10^2$ ; б) 1 –  $Re \times 10^4$ ; 2 –  $Pr \times 10$ ; 3 –  $Nu \times 10^3$ ; 4 –  $Pr_d \times 10$ ; 5 –  $Nu_d \times 10^2$

Анализ экспериментально выявленных зависимостей показывает, что повышение

температуры газов на входе в разнотемпературный канал не снижает

эффективности работы конденсационного фильтра. Это имеет большое значение для очистки загрязненных высокотемпературных газовых потоков перед их утилизацией.

Характер изменения экспериментальных кривых, приведенных на рис.5, говорит о том, что эффективность процесса очистки в конденсационном фильтре повышается с увеличением расхода и давления газа в разнотемпературном канале. В то же время, при дальнейшем увеличении скорости газового потока в фильтре может наблюдаться значительный унос аэрозольных примесей ввиду того, что они не будут успевать осесть в рабочем канале. Это приведет к резкому снижению эффективности очистки такого аппарата, поэтому в каждом конкретном случае необходимо определять оптимальные режимы течения очищаемого газового потока.

Принцип метода, на котором основан процесс очистки, заключается в следующем: при очистке загрязненный газовый поток подается в разнотемпературный канал, в котором происходит конденсация паров примеси на ядрах конденсации, например, механических частицах, газовых ионах и их рост до размеров капель.

Фильтр имеет газовый тракт прямоугольного сечения, противоположные стенки которого поддерживаются с разной температурой. При такой организации температурного поля внутри канала обеспечивается смещение зоны конденсации от холодной стенки в ядро потока, что приводит к более эффективному ведению процесса.

Данная установка должна отвечать следующим техническим требованиям: степень очистки конденсационного фильтра - до 99%; гидравлическое сопротивление конденсационного фильтра - до 500 Па; производительность 0-120000 м<sup>3</sup>/ч, малая энергоемкость, легкость монтажа в технологический процесс.

Анализ экспериментально выявленных зависимостей показывает, что повышение температуры газов на входе в разнотемпературный канал не снижает эффективности работы конденсационного фильтра. Это имеет большое значение для очистки загрязненных высокотемпературных газовых потоков перед их утилизацией.

Характер изменения экспериментальных кривых говорит о том, что эффективность процесса очистки в конденсационном фильтре повышается с увеличением расхода и давления газа в разнотемпературном канале. В то же время, при дальнейшем увеличении скорости газового потока в фильтре может наблюдаться значительный унос аэрозольных примесей ввиду того, что они не будут успевать осесть в рабочем

канале. Это приведет к резкому снижению эффективности очистки такого аппарата, поэтому в каждом конкретном случае необходимо определять оптимальные режимы течения очищаемого газового потока. Разнотемпературный конденсационный фильтр обладает универсальностью по температурным и расходным характеристикам рабочих сред. Он имеет меньшие размеры, менее энергоемок по сравнению с существующими установками для тонкой очистки газовых потоков - электрофильтрами и матерчатými фильтрами, и его работа может обеспечиваться за счет частичной утилизации теплоты самих выбросов. Положительным фактором является то, что при соблюдении расчетных параметров рабочей камеры ее конфигурация может быть выполнена с учетом возможного размещения конденсационного фильтра в цехе. Это позволяет при необходимости устанавливать его прямо в газоходах, вентиляционных каналах и других газоздушных трактах.

### **Заключение**

Возможность создания конденсационных фильтров с заведомо весомо малыми сопротивлениями и при отсутствии забивающихся загрязнениями очищаемого потока представляет самые широкие возможности для разработки широкой гаммы конденсационных фильтров для различных предприятий всего народного хозяйства, и, в частности, предприятий металлургической промышленности.

Конденсационный метод очистки также может быть эффективно использован и для тонкой очистки промышленных газов, где наряду с санитарно-инженерным, он может дать значительный экономический эффект при улавливании ценных продуктов, находящихся в тонкораспыленном состоянии.

Применение предлагаемого разнотемпературного способа газоочистки значительно облегчит работу предприятий нефтяной и газовой промышленности. Природный газ, получаемый с промыслов, содержит посторонние примеси: твердые частицы (песок и окалину), конденсат тяжелых углеводородов, водяные пары и часто сероводород и углекислый газ. Присутствие твердых частиц в газе приводит к быстрому износу соприкасающихся с газом деталей компрессоров. Твердые частицы засоряют и портят арматуру газопровода и контрольно-измерительные приборы скапливаясь на отдельных участках газопровода, они сужают его поперечное сечение. Жидкие частицы, оседая в пониженных участках трубопровода, также вызывают уменьшение площади его поперечного

сечения. Они, кроме того, оказывают коррозирующее действие на трубопровод, арматуру и приборы. Влага в определенных условиях приводит к образованию гидратов, выпадающих в газопроводе в виде твердых кристаллов. Гидратные пробки могут полностью закупорить трубопровод.

Согласно техническим требованиям на природные и нефтяные газы содержание жидкой взвеси в транспортируемом газе не должно превышать 25 - 50 г на 1000 м<sup>3</sup> газа. Еще более жесткие требования необходимо предъявлять к содержанию твердой взвеси (не более 0,05 мг/м<sup>3</sup>), которая способствует эрозионному износу технологического оборудования газопроводов. Так, при содержании 5 - 7 мг/м<sup>3</sup> твердой взвеси к.п.д. трубопроводов уменьшается на 3 - 5 % в течение двух месяцев эксплуатации, а при запыленности более чем 30 мг/м<sup>3</sup>

трубопровод выходит из строя через несколько часов из-за полного эрозионно-ударного износа.

На данный способ очистки и на конструкцию установки получены 10 патентов на изобретение.

#### Литература

1. Амелин А.Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара/ А.Г. Амелин. Изд. 3-е, доп. и перераб. М.: «Химия», 1972 – 304 с.

2. Математическая модель тепломассообменного процесса в конденсационной камере / В.И. Рязских, В.Г. Стогней, П.А. Солженикин, В.В. Черниченко // Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика – 2006): материалы Междунар. конф. и Рос. науч. шк.– М.: Радио и связь, 2006. Т. 2. Ч. 5. С. 74 – 78.

3. Солженикин П.А. Моделирование тепломассообмена и совершенствование конструкции аппарата для очистки промышленных газов от аэрозольных включений // Дис. канд. техн. наук / ВГТУ. – Воронеж, 2008. 179 с.

Воронежский государственный технический университет

## TO THE QUESTION WHETHER THE USE OF THE DIFFERENT TEMPERATURE CONDENSATION FILTER FOR PURIFICATION OF GAS STREAMS

**P.A. Solzhenikin<sup>1</sup>, V.G. Stogney<sup>2</sup>, V.V. Chernichenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [scorpion-050806@yandex.ru](mailto:scorpion-050806@yandex.ru)

<sup>2</sup>PhD, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [sto@sci.vrn.ru](mailto:sto@sci.vrn.ru)

<sup>3</sup>PhD, Associate professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [vlad1427@yandex.ru](mailto:vlad1427@yandex.ru)

Paper provides comparative analysis of the prominent acting gas purification plants and justifies the expediency of using universal multi-temperature filter, which is able to purify high-temperature flows of large expenditures. Special facility which helps to purify air from aerosol particles based on a condensation filter is represented. The possibility to use the heat-base regularities in the development of industrial multi-temperature condensation filters for the purification of gaseous emissions is proved experimentally. The required inter-dependencies were determined on the basis of the observed change of the temperature difference between the working surfaces of the gas path of the filter, the varying flow rate of the contaminated gas flow through the facility and the pressure in the working channel. The high efficiency is achieved by the differentiation of the temperatures within the temperature area of the filter. The filter under investigation has a high degree of purification, low hydraulic resistance and low energy intensity. The proposed “condensational purification method” provides significant economic effects as applied to metallurgical industry, trapping out valuable products in a finely dispersed state, removing particulate matter, heavy hydrocarbon condensate and water vapor in the oil and gas industry. Overall ten author’s certificates for this particular method of cleaning as well as for the plant design were received by the author

Key words: filter, supersaturation, condensation, gas stream

#### References

1. Amelin A.G., “Theoretical basis of fog formation during the process of steam condensation”, (“Teoreticheskiye osnovy obrazovaniya tumana pri kondensatsii para”),., Moscow, (The third reviewed edition), “Chemistry”, 1972, 304 p.

2. Ryazhskikh V.I., Stogney V.G., Solzhenikin P.A., Chernichenko V.V., “Mathematical model of the heat and mass exchange process within the condensation chamber”, *System problems of reliability, quality, information and electronic technologies in innovative projects, Innovations, Materials of the International conference and Russian school of sciences*, Moscow, Radio and Communication, 2006, Part 5, vol. 2, 74 – 78 pp.

3. Solzhenikin P. A., “Simulation of a heat and mass exchange and enhancement of construction of the device for cleaning of industrial gases from aerosol switching on” (“Modelirovaniye teplomassoobmena i sovershenstvovaniye konstruksii apparata dlya ochistki promyshlennykh gazov ot aerezol'nykh vklyucheniyy”), Ph.D thesis, Voronezh State technical University, Voronezh, 2008, 179 p.

## О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ МИКРОРАССЛОЕНИЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ОБТЕКАТЕЛЯХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ОДНОСТОРОННИМ ТЕПЛОВЫМ СКАНИРОВАНИЕМ

А.В. Рязских, Н.П. Заец, И.А. Чижов, О.А. Семенихин

На основе нестационарного уравнения теплопроводности в формате 2-D предложена модель для определения наличия каверн расслоения в обтекателях летательных аппаратов в предположении отсутствия градиента температуры в несвязанной области за исключением зоны конвективного подвода теплоты и незначительного по величине коэффициента теплопроводности среды каверны, с использованием которой обоснована эффективность одностороннего теплового сканирования на примере носового обтекателя МИГ-29. Получена детальная картина температурного поля при небольшой длительности нагрева с помощью численного интегрирования уравнений модели со смешанными граничными условиями 2-го рода на ненагреваемых поверхностях области сканирования и 3-го рода на нагреваемой конвективным способом поверхности методом конечных элементов с использованием адаптивной сетки на платформе пакета FlexPDE6. Подтверждено наличие приемлемого температурного контраста на поверхности обтекателя для регистрации даже малочувствительными тепловизорами. Преимуществом синтезированной математической модели является однопараметричность от числа Био, что позволяет инвариантно применять такой подход для различных характеристик как геометрических, так и теплофизических для анализа и идентификации локальных микрорасслоений в многослойных полимерных обтекателях летательных аппаратов различного назначения. С помощью вычислительных экспериментов подтверждена гипотеза недиффундируемой зоны нагрева над предполагаемым местом расслоения многослойных полимерных конструкций. Показана возможность редукции модели в формат 1-D путем введения “эффективного” числа Био, означающего более интенсивный нагрев в зоне над каверной отслаивания

Ключевые слова: тепловое сканирование, многослойный полимерный слой, расслоение, каверна, теплопроводность

### Введение

Определение неоднородности сплошных сред с помощью теплового сканирования является важной задачей в различных предметных областях [1]: в технологических процессах (электроника, металлургия, строительство и т.д.); в технических системах (электрооборудование, теплоэнергетика, нефтегазовые сети и др.); в медицине; в экологии, биологии и астрономии, а также в военном деле.

Широкое применение многослойных полимерных материалов в авиационной технике, в частности, при создании обтекателей [2], требует их целостности в процессе эксплуатации, т.к. конструктивно сопряженные с ними антенные системы радиоэлектронной борьбы, навигационное оборудование и т.д. должны функционировать в условиях минимальных искажений электромагнитных сигналов [3,4], возникающих из-за образования локальных микрорасслоений толщиной  $\sim 0,1$  мм, механизм генерации которых еще до конца не выяснен. В настоящее время проблема определения локальных микрорасслоений решается с помощью акустических низкочастотных методов [5], которые не обладают приемлемой точностью и оперативностью, а опыт применения теплового сканирования связан прежде всего с выявлением достаточно объемных каверн [6], поэтому оценка возможности

применимости данного метода для определения микрорасслоений является актуальной.

Системные исследования этой проблемы начаты Хадсоном [7] и продолжены отечественными и зарубежными учеными вплоть до конца прошлого века [8, 9]. Однако новый импульс к возобновлению исследований в этом направлении обусловлен появлением эффективной контрольно-измерительной аппаратуры (тепловизоров) [10] и качественно новых композиционных материалов. Следует отметить, что теоретической базой решения указанной проблемы остается теория тепломассообмена [11].

**Постановка задачи.** Многослойные полимерные авиационные обтекатели представляют собой сэндвич-конструкции, в которых полимерные слои специальной текстуры контактируют через клеевые прослойки (рис. 1а), причем теплофизические характеристики слоёв незначительно отличаются друг от друга. В результате лётной эксплуатации с резко изменяющимися термодинамическими характеристиками окружающей среды и динамическими напряженными состояниями корпуса воздушного судна возникают локальные расслоения, как правило дислоцирующиеся между первой клеевой прослойкой и вторым полимерным слоем (рис. 1б).

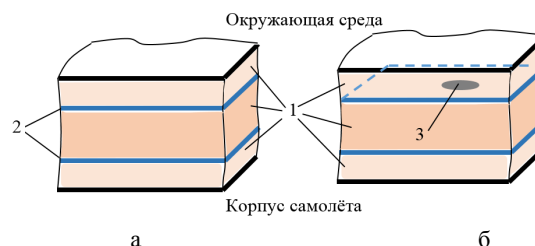


Рис. 1. Структура многослойной авиационного обтекателя без расслоения (а) и с расслоением (б): 1 – полимерные слои; 2 – клеевые прослойки; 3 – каверна расслоения

Рязских Александр Викторович - ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: ryazhskihav@bk.ru

Заец Николай Петрович - ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», научный сотрудник, e-mail: zaecnp@mail.ru

Чижов Игорь Александрович - ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. техн. наук, доцент, e-mail: chizh\_31@mail.ru

Семенихин Олег Александрович - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: semenihi72@yandex.ru

Если предположить, что в каверне отслоения воздушная среда, температуропроводности материала обтекателя, то возникающая каверна становится практически непроницаемой для теплового потока и поэтому над ней прогрев обтекателя будет происходить более интенсивно.

В этом случае тепловое одностороннее сканирование в аэродромных условиях заключается в осуществлении, например, конвективного нагрева обтекателя со стороны окружающей среды и последующего анализа температурного поля тепловизором на предмет его неоднородности. Площадь и время нагрева, температура и расход греющего теплоносителя (как правило воздуха) являются основными управляющими параметрами процесса определения температурного контраста, т.е. разности температур в исследуемой точке и в дефектной области, что обуславливает выбор тепловизора с соответствующей температурной чувствительностью и форматом кадра с битностью цифрового представления.

Использование экспериментального способа выявления закономерностей при тепловом сканировании затруднительно из-за необходимости формирования идентичных реальным каверн расслоения без нарушения целостности обтекателей. Метод математического моделирования решает эту проблему в широком диапазоне управляющих параметров.

#### Математическая модель

Синтезируем математическую модель в формате 2-D (рис. 2), считая, что обтекатель имеет некоторые интегральные теплопроводность, массовую теплоемкость и плотность, а основной механизм переноса теплоты подчиняется классическому закону Фурье.

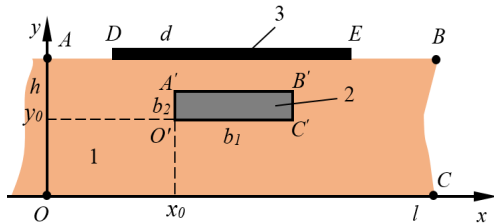


Рис. 2. Расчётная схема: 1- обтекатель; 2 – каверна; 3 – зона подвода теплоты

В выбранной декартовой системе координат модель формализована в виде начально-краевой задачи для нестационарного уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T(X, Y, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(X, Y, Fo)}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T(X, Y, Fo)}{\partial Y^2}; \quad (1)$$

с начальным условием

$$T(X, Y, 0) = 1, \quad x, y \in P; \quad (2)$$

и граничными условиями

$$\frac{\partial T(X, 1, Fo)}{\partial Y} = -BiT(X, 1, Fo), \quad X \in \Gamma_0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(X, 1, Fo)}{\partial Y} = 0, \quad X \in \Gamma_1; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(X, 1, Fo)}{\partial Y} = 0, \quad X \in \Gamma_2; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T(0, Y, Fo)}{\partial X} = 0, \quad Y \in \Gamma_3; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T(L, Y, Fo)}{\partial X} = 0, \quad Y \in \Gamma_4; \quad (7)$$

$$\frac{\partial T(X, 0, Fo)}{\partial Y} = 0, \quad X \in \Gamma_5; \quad (8)$$

$$\frac{\partial T(X, Y_0, Fo)}{\partial X} = 0, \quad X \in \Omega_1; \quad (9)$$

$$\frac{\partial T(X_0 + b_1/h, Y, Fo)}{\partial Y} = 0, \quad Y \in \Omega_2; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T(X, Y_0 + b_1/h, Fo)}{\partial X} = 0, \quad X \in \Omega_3; \quad (11)$$

$$\frac{\partial T(X_0, Y, Fo)}{\partial Y} = 0, \quad Y \in \Omega_4, \quad (12)$$

где  $Fo = \alpha\tau/h^2$ ;  $X = x/h$ ;  $Y = y/h$ ,  $L = l/h$ ;  $T(X, Y, Fo) = [t(x, y, \tau) - t_\phi] / (t_0 - t_\phi)$ ;  $X_0 = x_0/h$ ;  $Y_0 = y_0/h$ ;  $Bi = \alpha h / \lambda$ ;  $x, y$  - текущие декартовы координаты;  $\tau$  - время;  $\alpha, \lambda$  - коэффициенты температуропроводности и теплопроводности обтекателя;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи при конвективном нагреве поверхности обтекателя;  $P = OABC \setminus O'A'B'C'$ ;  $\Gamma_0 = DE$ ;  $\Gamma_1 = AD$ ;  $\Gamma_2 = EB$ ;  $\Gamma_3 = OA$ ;  $\Gamma_4 = CB$ ;  $\Gamma_5 = OC$ ;  $\Omega_1 = O'C'$ ;  $\Omega_2 = C'B'$ ;  $\Omega_3 = B'A'$ ;  $\Omega_4 = A'O'$ .

#### Вычислительный эксперимент

Для численного интегрирования системы (1) – (12) методом конечных элементов составлен программный код на платформе пакета FlexPDE 6 [12] с использованием адаптивной конечно-элементной сетки (рис. 3), что позволяет получать детальную картину температурного поля даже при небольшой длительности нагрева (рис. 4).

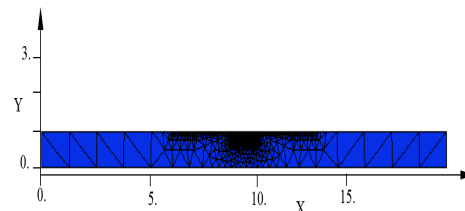


Рис. 3. Конечно-элементная схема для численного интегрирования системы (1) – (12) при  $L=20$ ;  $X_0=9,5$ ;  $Y_0=0,85$ ;  $b_2=0,1$ ;  $b_1=1$

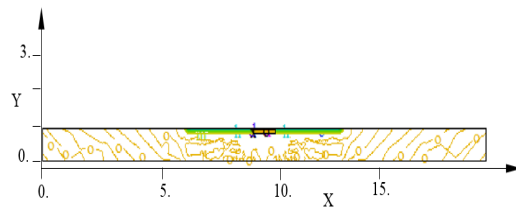
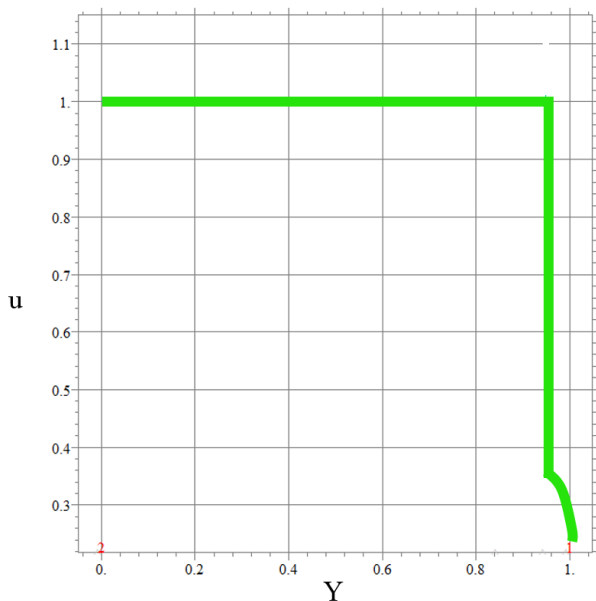


Рис. 4. Общее температурное поле при  $Bi=14$ ;  $Fo=5 \cdot 10^{-3}$

Исходные данные вычислительного эксперимента взяты для носового обтекателя МИГ-29:  $h = 12 \text{ мм}$ ;  $\lambda = 0,259 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ;  $a = 1,168 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ;

толщина и ширина каверны расслоения  $0,1\text{мм}$  и  $10\text{мм}$  соответственно; время нагрева  $6\text{ сек.}$ ; характерный размер зоны нагрева  $70\text{ мм.}$ ;  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ;  $t_\phi = 90^\circ\text{C}$   
Сравнение профилей температур в дефектной и бездефектной ситуациях (рис.5) подтверждает предпо-



ложение о различной интенсивности прогрева, при этом температурный контраст поверхности достаточен для регистрации аномальных зон температурного поля (рис.6).

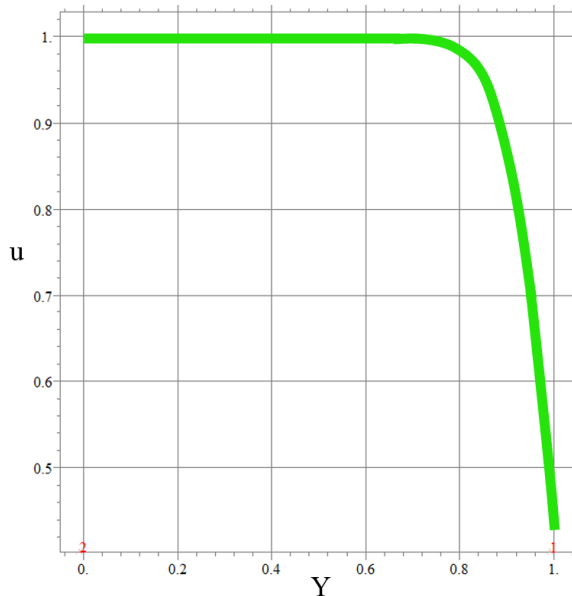


Рис. 5. Изменение температур в обтекателе с каверной расслоения (а) и без (б)

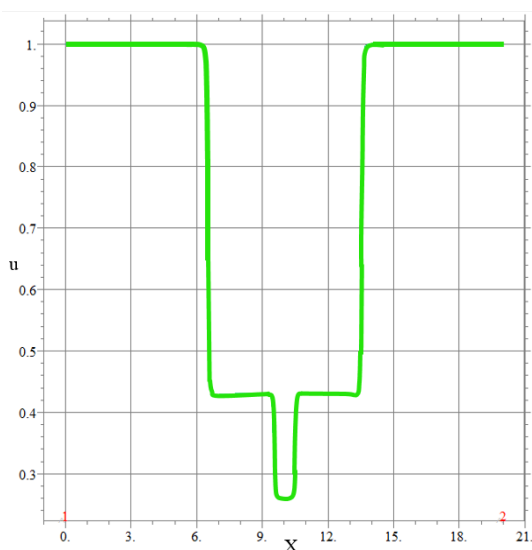


Рис. 6. Температура поверхности обтекателя после нагрева

Следует также отметить, что при кратковременном нагреве поверхности обтекателя краевые эффекты слабо выражены, а это означает возможность использование модели в формате 1-D с некоторым “эффективным” числом Био (то же самое, что с эффективным коэффициентом теплоотдачи) Например, для условий вычислительного эксперимента методом пассивной стратегии “эффективное” число Био составляет  $1,9\text{ Bi}$ . Физически это означает более интенсивный нагрев в зоне каверны отслаивания.

### Выводы

1. Теоретически обоснована возможность эффективного применения одностороннего теплового

сканирования многослойных полимерных авиационных обтекателей для определения каверн расслоения в режиме кратковременного конвективного нагрева на примере носового обтекателя МИГ-29.

2. Показан способ снижения размерности тепловой задача до формата 1-D введением “эффективного” коэффициента теплоотдачи.

### Литература

1. Вавилов, В.П. Тепловизоры и их применения / В.П. Вавилов, А.Г. Климов. – М.: Интелуниверсал, 2002. – 88 с.
2. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов / А.Г. Ромашин, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов, М.Ю. Рукин. – Харьков: ХАИ, 2003. – 239 с.
3. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков / И.Г. Гуртовник, В.И. Соколов, Н.Н. Трофимов, С.Г. Шалгунов – М.: Мир, 2009. – 368 с.
4. Распространение радиоволн / О.И. Яковлев, В.П. Якубов, В.П. Урядов, А.Г. Павельев.– М.: ЛЕНДАТ, 2009. – 496 с.
5. Ланге, Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций / Ю.В. Ланге. – М.:Машиностроение, 1991. – 272 с.
6. Nondestructive testing: Handbook. V.3. Infrared and Thermal Testing. – Columbus: ASNT, 2001. – 714p.
7. Хадсон, Р. Инфракрасные системы / Р. Хадсон. – М.: Мир, 1972. – 530с.
8. Вавилов, В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля : Справочник / В.П. Вавилов. – М.: Машиностроение, 1991. – 264 с.
9. Maldague X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing/ X. Maldague. – NY: John Wiley & Sons, Inc. 2001. – 684 p.
10. Аш, Ж. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. Кн.1. / Ж. Аш. – М.: Мир. 1992. – 480 с.

11. Нестерук, Д.А. Тепловой контроль и диагностика / Д.А. Нестерук, В.П. Вавилов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 104 с.

12. FelxPDE. Version 6.38. – PDE Solutions Inc., 2015. – 548 p.

Воронежский государственный технический университет  
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

## ON THE POSSIBILITY OF DEFINITION OF LOCAL MICROBONDENOUSES IN MULTILAYER POLYMERIC AIRCRAFT VEHICLES BY SINGLE-DEPTH THERMAL SCANNING

**A.V. Ryazhskikh<sup>1</sup>, N.P. Zaets<sup>2</sup>, I.A. Chizhov<sup>3</sup>, O.A. Semenikhin<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: ryazhskihav@bk.ru

<sup>2</sup>Researcher, Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: zaecnp@mail.ru

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: chizh\_31@mail.ru

<sup>4</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: semenihin72@yandex.ru

On the basis of the nonstationary heat equation in the 2D format, a model for determining the presence of cavern bundles in the fairings of aircraft is proposed, assuming that there is no temperature gradient in the unbound region except for the convective heat input zone and the insignificant thermal conductivity coefficient of the cavern environment. Using this model, the effectiveness of thermal scanning on the example of the nose fairing MIG-29 is justified. A detailed picture of the temperature field is obtained for a short duration of heating by numerical integration of the model equations with mixed boundary conditions of the second kind on non-heated surfaces of the scanning region and of the third kind on a surface convection heated by the finite element method using an adaptive grid on the FlexPDE6 platform. The presence of an acceptable temperature contrast on the surface of the fairing for registration even by low-sensitivity thermal imagers is confirmed. The advantage of the synthesized mathematical model is the one-parameter of the Bio number, which makes it possible to invariantly apply such an approach for various geometric and thermophysical characteristics for analysis and identification of local microbundles of multilayer polymeric fairings of aircraft for various purposes. With the help of computational experiments, the hypothesis of a non-diffusible heating zone over the alleged site of stratification of multilayer polymeric structures is confirmed. It is shown that the model can be reduced to the 1D format by introducing an "effective" Bio number, meaning more intense heating in the zone above the peeling cavern

Key words: thermal scanning, multilayer polymer layer, stratification, cavern, thermal conductivity

### References

1. Vavilov V.P., Klimov A.G. “Thermal imagers and their applications” (“Тепловизоры и их применения”), Moscow, Interuniversal, 2002, 88 p.
2. Romashin A.G., Gaydachuk V.E., Karpov J.S., Rukin M.Y. “Radio transparent aircraft fairings” (“Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов”), Kharkov, KHAI, 2003, 239 p.
3. Gurtovnik I.G., Sokolov V.I., Trofimov N.N., Shalgunov S.G. “Radio transparent fiberglass products” (“Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков”), Moscow, Mir, 2009, 368 p.
4. Yakovlev O.I., Yakubov V.P., Uryadov V.P., Pavelyev A.G. “Radio wave propagation” (“Распространение радиоволн”), Moscow, LENDAT, 2009, 496 p.
5. Lange Yu.V. “Acoustic low-frequency methods and means of nondestructive testing of multilayer structures” (“Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций”), Moscow, Mashinostroenie, 1991, 272 p.
6. Nondestructive testing: Handbook. V.3. Infrared and Thermal Testing. Columbus, ASNT, 2001, 714p.
7. Hudson R. “Infrared systems” (“Инфракрасные системы”), Moscow, Mir, 1972, 530 p.
8. Vavilov V.P. “Thermal methods of nondestructive testing” (“Тепловые методы неразрушающего контроля”), Moscow, Mechanical engineering, 1991, 264 p.
9. Maldague X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. – NY: John Wiley & Sons, Inc. 2001, 684 p.
10. Ash Zh. “Sensors of measuring systems” (“Датчики измерительных систем”), In 2 books. Book 1, Moscow, Mir. 1992, 480 p.
11. Nesteruk D.A., Vavilov V.P. “Thermal control and diagnostics” (“Тепловый контроль и диагностика”), Tomsk, TPU, 2007, 104 p.
12. FelxPDE. Version 6.38. – PDE Solutions Inc., 2015, 548 p.



**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АБСОЛЮТНОГО МАКСИМУМА ГАУССОВСКОГО СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА**

**В.П. Литвиненко, О.В. Чернояров, Л.А. Голпайегани**

В работе описаны методики получения общих выражений для функций распределения абсолютного максимума нестационарного гауссовского процесса. Рассматриваются дифференцируемые и недифференцируемые случайные процессы. Показано, что вид закона распределения зависит от аналитических свойств процесса, а именно, от существования его непрерывной производной. На основе полученных результатов записаны формулы для вероятностей превышения порога стационарными дифференцируемыми и недифференцируемыми гауссовскими случайными процессами. В результате решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова получены статистические характеристики гауссовского марковского или локально марковского случайного процесса. Установлено, что в ряде частных случаев предложенные асимптотические аппроксимации удовлетворительно описывают истинные распределения в широком диапазоне значений параметров случайного процесса. Полученные результаты подтверждаются методами статистического моделирования, с их помощью установлены границы применимости полученных оценок статистических характеристик. Предложенные подходы при соответствующем обобщении могут быть использованы для определения предельных характеристик негауссовских случайных процессов

Ключевые слова: гауссовский случайный процесс, функция распределения абсолютного максимума, вероятность пересечения барьера, выбросы случайного процесса, уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова

**Введение**

Задача определения предельных характеристик гауссовских случайных процессов имеет широкие приложения в статистической радиофизике и радиотехнике, теории надежности, анализе предельных отклонений с устойчивости технических систем и т.д. В известной литературе получен ряд конструктивных результатов, связанных с пересечением барьеров гауссовскими случайными процессами [1-4 и др.]. Показано, что вид функции распределения

$$F(h) = P\left[\sup_{t \in [0, T]} \xi(t) < h\right] \quad (1)$$

абсолютного максимума гауссовского случайного процесса  $\xi(t)$  зависит от существования его непрерывной производной.

**Распределение абсолютного максимума дифференцируемого гауссовского случайного процесса**

Рассмотрим вначале нестационарный гауссовский случайный процесс  $\xi(t)$  с математическим ожиданием  $m(t) = \langle \xi(t) \rangle$  и ковариационной функцией  $B(t_1, t_2) = \langle [\xi(t_1) - m(t_1)][\xi(t_2) - m(t_2)] \rangle$ , непрерывный в среднем квадратическом вместе с первой производной  $\dot{\xi}(t)$ .

Обозначим  $\Pi(h, t)$  – среднее число выбросов реализации  $\xi(t)$  за уровень  $h$  в элементарном интервале  $[t, t + dt]$ . Положим, что порог  $h$  достаточно велик,

$$h - m(t) \gg \sigma(t), \quad t \in [0, T],$$

где  $\sigma^2(t) = B(t, t)$  – дисперсия процесса  $\xi(t)$ . Тогда поток выбросов реализации  $\xi(t)$  за уровень  $h$  можно приближенно считать пуассоновским. К тому же выбросы на различных элементарных интервалах будут приближенно статистически независимы [4, 7]. Следовательно, вероятность превышения порога  $h$  приближенно равна

$$P\left[\sup_{t \in [0, T]} \xi(t) < h\right] \approx \exp[-\tilde{\Pi}(h)], \quad \tilde{\Pi}(h) = \int_0^T \Pi(h, t) dt. \quad (2)$$

Общая формула для среднего числа выбросов нестационарного гауссовского случайного процесса получена в [3]:

$$\Pi(h, t) = \left[ \sqrt{B_2(t)} / 2\pi\sigma^2(t) \right] \exp\left\{ - [h - m(t)]^2 / 2\sigma^2(t) \right\} \times \left\{ \exp[-M_1^2(t)/2] + \sqrt{2\pi} M_1(t) \Phi[M_1(t)] \right\},$$

$$B_2(t) = \sigma^2(t) \left[ \frac{\partial^2 B(t_1, t_2)}{\partial t_1 \partial t_2} \right]_t - \left[ \frac{\partial B(t_1, t_2)}{\partial t_2} \right]_t^2,$$

$$M_1(t) = \frac{1}{\sigma(t)\sqrt{B_2(t)}} \left\{ \sigma^2(t) \frac{dm(t)}{dt} + [h - m(t)] \left[ \frac{\partial B(t_1, t_2)}{\partial t_2} \right]_t \right\},$$

а  $\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \exp(-u^2/2) du / \sqrt{2\pi}$  – интеграл вероятности.

В общем случае функция в правой части (2) не является убывающей функцией  $h$ . Поэтому для произвольных  $h$  в качестве аппроксимации функции распределения абсолютного максимума процесса  $\xi(t)$  можно использовать выражение

$$F(h) \approx \begin{cases} \exp[-\tilde{\Pi}(h)], & h \geq h_{\min}, \\ 0, & h < h_{\min}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $h_{\min}$  – наименьшее значение  $h$ , для которого при любых  $\varepsilon > 0$  выполняется неравенство

Литвиненко Владимир Петрович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 271-44-57, e-mail: litvinvp@gmail.com  
Чернояров Олег Вячеславович – НИУ «МЭИ», д-р техн. наук, доцент, тел. 8-977-811-93-83, e-mail: o\_v\_ch@mail.ru  
Голпайегани Лейла Абдолмаджид - НИУ «МЭИ», аспирант, тел. 8-968-095-01-46

$$\tilde{\Gamma}(h) > \tilde{\Gamma}(h+\varepsilon).$$

Аппроксимация (4) функции распределения наибольших значений является приближенной, однако ее точность возрастает по мере увеличения  $h$  и  $T$  [4, 7]. При малых значениях  $h$  и  $T$  аппроксимация (4) может оказаться слишком грубой. Поскольку при  $T \rightarrow 0$  распределение наибольших значений процесса  $\xi(t)$  сходится к гауссовскому распределению, то аналогично [8] вместо (4) можно использовать также аппроксимацию вида

$$F(h) \approx \begin{cases} F_G(h) \exp[-\tilde{\Gamma}(h)], & h \geq h_{\min}, \\ F_G(h_{\min}) \exp[-\tilde{\Gamma}(h_{\min})], & h < h_{\min}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $F_G(h) = \Phi[(h - m(0))/\sigma(0)]$  – функция распределения гауссовской случайной величины с параметрами  $\sim N(m(0), \sigma^2(0))$ . Аппроксимация (5) в отличие от (4) асимптотически точна не только при  $T \rightarrow \infty$ , но и при  $T \rightarrow 0$ . При больших значениях  $h$  и  $T$  аппроксимации (4) и (5) практически совпадают.

Формулы (4), (5) очевидным образом обобщаются на случай порога  $h(t)$ , зависящего от времени.

Если гауссовский случайный процесс является стационарным, так что  $m(t) = m$ ,  $\sigma^2(t) = \sigma^2$ ,

$B(t_1, t_2) = B(t_2 - t_1)$ , то формула (5) существенно упрощается и принимает вид [8]

$$F(h) \approx \begin{cases} F_G(h) \exp\left[-\frac{\alpha}{2\pi} \exp\left(-\frac{(h-m)^2}{2\sigma^2}\right)\right], & h \geq m, \\ F_G(m) \exp\left(-\frac{\alpha}{2\pi}\right), & h < m. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь  $\alpha = T/\tau_c$ , а  $\tau_c = \left[\sigma/\sqrt{-d^2 B(\tau)/d\tau^2}\right]_{\tau=0}$  – величина, характеризующая время корреляции (эквивалентную ширину спектра) процесса  $\xi(t)$ .

Как показывают результаты статистического моделирования, формулы (5), (6) обладают удовлетворительной точностью при произвольных  $\alpha$  и  $h \geq m + \sigma$ .

### Распределение абсолютного максимума недифференцируемого гауссовского случайного процесса

Рассмотрим теперь недифференцируемый гауссовский случайный процесс  $\xi(t)$  с начальной плотностью вероятности

$$w(x;0) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m_0)^2}{2\sigma_0^2}\right]. \quad (7)$$

Здесь  $m_0 = m(0)$  и  $\sigma_0^2 = \sigma^2(0)$  – математическое ожидание и дисперсия процесса в момент времени  $t = 0$ . Ограничимся частным, но важным случаем, когда процесс  $\xi(t)$  является марковским случайным процессом с

постоянными коэффициентами сноса и диффузии  $K_1, K_2$ .

Представим (1) в виде

$$F(h) = P[\eta(t) > 0], \quad t \in [0, T],$$

где  $\eta(t) = h - \xi(t)$ . Тогда для вероятности (1) можно записать

$$F(h) = \int_0^\infty w_\eta(z; T) dz. \quad (8)$$

Здесь  $w_\eta(z; t)$  – одномерная плотность вероятности реализаций случайного процесса  $\eta(t)$ , ни разу не достигших границ  $z = 0$  и  $z = \infty$  на интервале  $[0, t]$ .

В силу предполагаемой марковости процесса  $\xi(t)$  процесс  $\eta(t)$  также будет являться марковским с коэффициентами сноса и диффузии

$$K_{1\eta} = -K_1, \quad K_{2\eta} = K_2 \quad (9)$$

и начальной плотностью вероятности, определяющейся согласно (7) как

$$w_\eta(z; 0) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z-h+m_0)^2}{2\sigma_0^2}\right]. \quad (10)$$

В силу марковских свойств процесса  $\eta(t)$  функция  $w_\eta(z; t)$  может быть найдена из решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК) [2]:

$$\frac{\partial w_\eta(z; t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} [K_{1\eta} w_\eta(z; t)] + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} [K_{2\eta} w_\eta(z; t)] \quad (11)$$

при начальном условии (10) и граничных условиях  $w_\eta(0; t) = w_\eta(\infty; t) = 0$ .

Для решения (11) приведем его к каноническому виду. Обозначая

$$w_\eta(z; t) = U_\eta(z; t) \exp\left(-\frac{K_{1\eta}^2}{2K_{2\eta}} t + \frac{K_{1\eta}}{K_{2\eta}} z\right) \quad (12)$$

и подставляя (12) в (11), получаем, что функция  $U_\eta(z; t)$  удовлетворяет уравнению

$$\partial U_\eta(z; t) / \partial t = (K_{2\eta}/2) \partial^2 U_\eta(z; t) / \partial z^2 \quad (13)$$

при начальном и граничных условиях

$$U_\eta(z; 0) = w_\eta(z; 0) \exp(-K_{1\eta} z / K_{2\eta}), \quad (14)$$

$$U_\eta(0; t) = U_\eta(\infty; t) = 0.$$

Согласно [2] решение уравнения (13) с учетом (14) имеет вид

$$U_\eta(z; t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi K_{2\eta} t}} \int_0^\infty w_\eta(z_1; 0) \exp\left(-\frac{K_{1\eta}}{K_{2\eta}} z_1\right) \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-z_1)^2}{2K_{2\eta} t}\right] - \exp\left[-\frac{(z+z_1)^2}{2K_{2\eta} t}\right] \right\} dz_1. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (12), получаем решение уравнения ФПК (11)

$$w_{\eta}(z; t) = \int_0^{\infty} w_{\eta}(z_1; 0) \exp\left[-\frac{K_{1\eta}^2}{2K_{2\eta}} t + \frac{K_{1\eta}}{K_{2\eta}} (z - z_1)\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z - z_1)^2}{2K_{2\eta} t}\right] - \exp\left[-\frac{(z + z_1)^2}{2K_{2\eta} t}\right] \right\} \frac{dz_1}{\sqrt{2\pi K_{2\eta} t}}. \quad (16)$$

Наконец, подставляя (16) в (8) с учетом (9) находим функцию распределения абсолютного максимума гауссовского марковского процесса с постоянными коэффициентами сноса и диффузии

$$F(h) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} w_{\eta}(z_1; 0) \exp\left[-\frac{K_1^2}{2K_2} T - \frac{K_1}{K_2} (z - z_1)\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z - z_1)^2}{2K_2 T}\right] - \exp\left[-\frac{(z + z_1)^2}{2K_2 T}\right] \right\} \frac{dz dz_1}{\sqrt{2\pi K_2 T}}. \quad (17)$$

Интегрирование в (17) по переменной  $z$  можно выполнить аналитически. В результате с использованием явного вида плотности вероятности  $w_{\eta}(z; 0)$  (10), имеем

$$F(h) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(z - h + m_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] \times \left[ \Phi\left(\frac{z - K_1 T}{\sqrt{K_2 T}}\right) - \exp\left(\frac{2K_1 z}{K_2}\right) \left(1 - \Phi\left(\frac{z + K_1 T}{\sqrt{K_2 T}}\right)\right) \right] dz.$$

Здесь индекс "1" у переменной интегрирования опущен. Аналогичная методика может быть использована для нахождения вероятности пересечения гауссовским марковским случайным процессом с произвольными коэффициентами сноса и диффузии наклонных барьеров, если при этом удастся разрешить уравнение (11).

Если гауссовский марковский или локально марковский [8] случайный процесс  $\xi(t)$  является стационарным (в том числе с непостоянным коэффициентом сноса), функция распределения (1) может быть найдена следующим образом. Согласно [9], для вероятности (1) имеем

$$P[\sup_{t \in [0, T]} \xi(t) < h] \approx \exp(-\rho T), \quad (18)$$

где

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2}{K_2} \int_{x_0}^h \frac{dx}{w_{st}(x)}, \quad (19)$$

а  $w_{st}(x)$  – стационарная плотность вероятности случайного процесса  $\xi(t)$ , определяемая из (7). Формула (18) получена в [9] для случая, когда  $K_2 T / 2\sigma_0^2 \gg 1$  и

$$w_{st}(h) < 1. \quad (20)$$

Очевидно, условие (20) выполняется, когда  $h \gg m_0$ .

Значение  $x_0$  в (19) выбирается в области максимальной вероятности значений процесса  $\xi(t)$ , так что можно положить  $x_0 = m_0$ . Тогда, используя для вы-

числения интеграла (19) асимптотическую формулу Лапласа [10], при  $h \rightarrow \infty$  получаем

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2\sigma_0^3}{K_2} \frac{\sqrt{2\pi}}{h - m_0} \exp\left[\frac{(h - m_0)^2}{2\sigma_0^2}\right] \left[1 + O(h^{-1})\right] \quad (21)$$

Значит, при больших  $h$  согласно (18), (21) для вероятности (1) можно записать

$$P[\sup_{t \in [0, T]} \xi(t) < h] \approx \exp[-\delta \varphi(h)], \quad (22)$$

Здесь

$$\varphi(h) = \frac{(h - m_0)}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(h - m_0)^2}{2\sigma_0^2}\right],$$

а  $\delta = K_2 T / 2\sigma_0^2$  и имеет такой же физический смысл, как величина  $\alpha$  в формуле (5). Как следует из вывода формулы (18) в [9], точность приближенной формулы (22) растет с увеличением  $\delta$  и  $h$ .

Поскольку правая часть (22) является неубывающей функцией лишь при  $h \geq h_{\min}$ , для функции распределения абсолютного максимума процесса  $\xi(t)$  используем аппроксимацию

$$F(h) = \begin{cases} \exp[-\delta \varphi(h)], & h \geq h_{\min}, \\ 0, & h < h_{\min}, \end{cases} \quad (23)$$

где  $h_{\min}$  – наименьшее значение  $h$ , для которого при любых  $\varepsilon > 0$  выполняется неравенство  $\varphi(h) > \varphi(h + \varepsilon)$ .

Нетрудно видеть, что  $h_{\min} = m_0 + \sigma_0$ .

При не очень больших значениях  $\delta$  и  $h$  формулу (23) можно несколько уточнить, подобно [8] положив

$$F(h) \approx \begin{cases} F_G(h) \exp[-\delta \varphi(h)], & h \geq h_{\min}, \\ F_G(h_{\min}) \exp[-\delta \varphi(h_{\min})], & h < h_{\min}, \end{cases} \quad (24)$$

где  $F_G(h)$  определяется так же, как в (6). В отличие от (23) аппроксимация (24) асимптотически точна как при  $\delta \rightarrow \infty$ , так и при  $\delta \rightarrow 0$ . При больших  $\delta$  и  $h$  аппроксимации (23) и (24) практически совпадают.

В ходе экспериментальной проверки было установлено, что формула (24) обладает удовлетворительной точностью при  $\delta \geq 5$  и  $h \geq h_{\min}$ .

### Заключение

Таким образом, представленные методики позволяют найти законы распределения абсолютного максимума нестационарных гауссовских случайных процессов, и могут быть при соответствующем обобщении использованы для определения предельных характеристик негауссовских случайных процессов. Вид закона распределения абсолютного максимума зависит от того, является ли вероятностный процесс дифференцируемым или недифференцируемым. Сопоставление с экспериментальными данными, полученными в ходе статистического моделирования для ряда частных случаев, показывает, что предложенные формулы хорошо описывают истинные распределения в широком диапазоне значений параметров случайных процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-49-00079).

#### Литература

1. Жиглявский, А.А. Обнаружение разладки случайных процессов в задачах радиотехники / А.А. Жиглявский, А.Е. Красковский. – Л.: ЛГУ, 1988. – 224 с.
2. Тихонов, В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М.: Сов. радио, 1977. – 488 с.
3. Тихонов, В.И. Выбросы случайных процессов / В.И. Тихонов. – М.: Наука, 1970. – 392 с.
4. Тихонов, В.И. Выбросы траекторий случайных процессов / В.И. Тихонов, В.И. Хименко. – М.: Наука, 1987. – 340 с.
5. Durbin, J. The first-passage density of a continuous Gaussian process to a general boundary / J. Durbin // *Journal of Applied Probability*. – 1985. – Vol. 22. № 1. – P. 99-122.

6. Abrahams, J.A. Survey of Recent Progress on Level-Crossing Problems for Random Process / J.A. Abrahams // *Communications and Networks. A Survey of Recent Advances*. – New York: Springer-Verlag, 1986. – P. 6-25.
7. Крамер, Г. Стационарные случайные процессы / Г. Крамер, М. Лидбеттер. – М.: Мир, 1969. – 400 с.
8. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович и др.; под ред. П.А. Бакута. – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.
9. Стратонович, Р.Л. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике / Р.Л. Стратонович. – М.: Сов. радио, 1961. – 560 с.
10. Федорюк, М.В. Метод перевала / М.В. Федорюк. – М.: Наука, 1977. – 368 с.

Воронежский государственный технический университет

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

## PROBABILITY CHARACTERISTICS OF THE ABSOLUTE MAXIMUM OF GAUSSIAN RANDOM PROCESS

V.P. Litvinenko<sup>1</sup>, O.V. Chernoyarov<sup>2</sup>, L.A. Golpayegani<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

e-mail: litvinvp@gmail.com

<sup>2</sup>Full Doctor, Associate Professor, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

e-mail: chernoyarovov@mpei.ru

<sup>3</sup>Graduate student, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation

e-mail: leila.golpaigany@gmail.com

In this paper, methods are described for obtaining general expressions for absolute maximum distribution functions of nonstationary Gaussian process. Differentiable and nondifferentiable random processes are considered. It is shown that the form of the distribution law depends on the analytical properties of the process, namely, on the existence of its continuous derivative. On the basis of the results obtained, formulas are written for the probabilities of non-exceeding the threshold by stationary differentiable and nondifferentiable Gaussian random processes. As a result of solution of the Fokker-Planck-Kolmogorov equation, the statistical characteristics of Gaussian Markov or locally Markov random process are obtained. It is established that in a number of particular cases the proposed asymptotic approximations describe satisfactorily the true distributions over a wide range of values of the parameters of the random process. The obtained results are confirmed by the methods of statistical modeling; with their help the boundaries of applicability of the obtained estimates of statistical characteristics are established. The proposed approaches, with appropriate generalization, can be used to determine the limiting characteristics of non-Gaussian random processes

Key words: Gaussian random process, distribution function of the absolute maximum, probability of barrier crossing, outliers of random process, Fokker-Planck-Kolmogorov equation

#### References

1. Zhiglyavskiy A.A., Kraskovskiy A.E. “Detection of abrupt changes in random processes for radio engineering tasks” (“Obnaruzhenie razladki sluchainykh protsessov v zadachakh radiotekhniki”), Leningrad: Leningrad State University, 1988, 224 p.
2. Tikhonov V.I., Mironov M.A. “Markov Processes” (“Markovskie protsessy”), Moscow, Sovetskoe Radio, 1977, 488 p.
3. Tikhonov V.I. “Outliers of random processes” (“Vybroso sluchaynykh protsessov”), Moscow: Nauka, 1970, 392 p.
4. Tikhonov V.I., Khimenko V.I. “Outliers of random process trajectories” (“Vybroso traektoriy sluchaynykh protsessov”), Moscow, Nauka, 1987, 340 p.
5. Durbin, J. “The first-passage density of a continuous Gaussian process to a general boundary”, *Journal of Applied Probability*, 1985, vol. 22, no. 1, pp. 99-122.
6. Abrahams J.A. “Survey of recent progress on level-crossing problems for random process”, *Communications and Networks. A Survey of Recent Advances*, New York, Springer-Verlag, 1986, pp. 6-25.
7. Cramer H., Leadbetter V. “Stationary and related stochastic processes”, New York, Wiley, 1967, 348 p.
8. Akimov P.S., Bakut P.A., Bogdanovich V.A. et al. “Signal detection theory” (“Teoriya obnaruzheniya signalov”), Moscow, Radio i Svyaz', 1984, 440 p.
9. Stratonovich R.L. “Selected problems of fluctuation theory in radio engineering” (“Izbrannye voprosy teorii fluktuatsii v radiotekhnike”), Moscow, Sovetskoe Radio, 1961, 560 p.
10. Fedoryuk M.V. “The saddle-point method” (“Metod perevala”), Moscow, Nauka, 1977, 368 p.

## АЛГОРИТМЫ ВЫБОРА ПЕРИМЕТРОВЫХ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ

А.Б. Антиликаторов, С.Ю. Белецкая, А.С. Кулишенко

Актуальность системного решения проблем и задач охранной деятельности особенно возросла в последние годы, что диктуется многими факторами. Практика охранной деятельности показывает, что необходим научно обоснованный подход к решению проблем и задач охраны объектов. Отдельные системы охраны периметра не могут полностью решить задачу обнаружения нарушителя. Чтобы перекрыть все вероятные пути движения нарушителя, на практике применяют несколько систем. Однако различные системы обладают разными значениями вероятности обнаружения и вероятности ложной тревоги, и это необходимо учитывать.

В данной работе рассматривается алгоритм обработки сигналов от отдельных систем охраны периметра. Данный алгоритм имеет более простой вид и удобнее для практической реализации, чем алгоритм упорядочивания комбинаций по величине отношений  $\Delta P_j / \Delta \bar{P}_j$ . Причем, он всегда оптимален, т.е. при заданной вероятности обнаружения обеспечивает минимально возможную вероятность ложной тревоги. Одновременно обеспечивается максимально возможная вероятность обнаружения при заданной вероятности ложных тревог

Ключевые слова: системы охраны периметра, комбинированные средства обнаружения, обработка сигналов

## Введение

Отдельные системы охраны периметра (СОП) могут решать задачу обнаружения нарушителя только в пределах ограниченной зоной обнаружения и характеристиками, оговоренными в нормативно-технической документации на СОП. Чтобы перекрыть все вероятные пути движения нарушителя на практике возможно использование нескольких СОП.

## Постановка задачи

Различные отдельные СОП обладают разными значениями вероятности обнаружения и вероятности ложной тревоги и это необходимо учитывать. Для решения данной проблемы предлагается использование алгоритмов, которые позволяют не только уменьшать вероятность ложной тревоги, но и обеспечивают заданную вероятность обнаружения.

Для решения поставленной задачи предлагается два алгоритма обработки сигналов от СОП. Первый основывается на возможных комбинациях сработавших систем, основа второго – присвоение весовых коэффициентов [1].

Рассмотрим первый алгоритм на примере трех систем охраны. Для каждой системы известны вероятности обнаружения ( $P_1, P_2, P_3$ ) и вероятности ложной тревоги ( $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3$ ). Произвольная комбинация при обнаружении нарушителя характерна только для систем, основанных на различных принципах действия и характеризующихся статистической независимостью возникновения сигналов тревоги с определенной вероятностью. Возможные варианты комбинаций представлены в табл. 1.

Таблица 1

Возможные комбинации из трех СО			
j	Комбинация	$\Delta P_j$	$\Delta \bar{P}_j$
1	111	$P_1 P_2 P_3$	$\bar{P}_1 \bar{P}_2 \bar{P}_3$
2	110	$P_1 P_2 (1 - P_3)$	$\bar{P}_1 \bar{P}_2 (1 - \bar{P}_3)$
3	101	$P_1 (P_2 - 1) P_3$	$\bar{P}_1 (\bar{P}_2 - 1) \bar{P}_3$
4	011	$(1 - P_1) P_2 P_3$	$(1 - \bar{P}_1) \bar{P}_2 \bar{P}_3$
5	100	$P_1 (1 - P_2) (1 - P_3)$	$\bar{P}_1 (1 - \bar{P}_2) (1 - \bar{P}_3)$
6	010	$(1 - P_1) P_2 (1 - P_3)$	$(1 - \bar{P}_1) \bar{P}_2 (1 - \bar{P}_3)$
7	001	$(1 - P_1) (1 - P_2) P_3$	$(1 - \bar{P}_1) (1 - \bar{P}_2) \bar{P}_3$
8	000	$(1 - P_1) (1 - P_2) (1 - P_3)$	$(1 - \bar{P}_1) (1 - \bar{P}_2) (1 - \bar{P}_3)$

Каждой комбинации соответствует вероятность срабатывания при обнаружении нарушителя  $\Delta P_j$  и при наличии помехового воздействия  $\Delta \bar{P}_j$ .

При использовании схемы логической обработки 2 из 3 вероятность срабатывания системы в случае обнаружения [1]:

$$P_{2/3} = \sum_{j=1}^4 \Delta P_j, \quad (1)$$

вероятность ложной тревоги:

$$\bar{P}_{2/3} = \sum_{j=1}^4 \Delta \bar{P}_j \quad (2)$$

Если же будет применена схема логической обработки ИЛИ (система срабатывает при любой

Антиликаторов Александр Борисович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: antilikatorov63@mail.ru  
Белецкая Светлана Юрьевна – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: su\_bel@mail.ru  
Кулишенко Александр Сергеевич – ВГТУ, студент, e-mail: akulishenkov@yandex.ru

комбинации, кроме всех нулей), то вероятность обнаружения определяется как [1]:

$$P_{или} = \sum_{j=1}^7 \Delta P_j, \quad (3)$$

а вероятность ложной тревоги:

$$\overline{P}_{или} = \sum_{j=1}^7 \Delta \overline{P}_j \quad (4)$$

При синтезе произвольной схемы логической обработки, в которой общий сигнал тревоги формируется при появлении любой комбинации из числа наперед заданных (например, только в случае появления комбинаций 3, 5 и 7), ее вероятность обнаружения и вероятность ложной тревоги составят:

$$P = \sum_{j=1}^3 \Delta P_j, \quad (5)$$

$$\overline{P} = \sum_{j=1}^3 \Delta \overline{P}_j, \quad (6)$$

где суммирование проводится по номерам тех комбинаций, которые приводят для исследуемой схемы логической обработки к формированию общего сигнала тревоги.

Оптимальная схема логической обработки комбинированной системы должна обеспечивать заданную вероятность обнаружения и обладать наименьшей вероятностью ложной тревоги [2]. Для синтеза данного алгоритма расставим в табл. 1 комбинации отношения  $\Delta P_j / \Delta \overline{P}_j$  в порядке убывания, после этого возьмем столько первых комбинаций, сколько обеспечивают заданную вероятность обнаружения.

Предложенную процедуру поясняет табл. 2 (вероятности обнаружения и ложных тревог трех систем:  $P_1=0,7$ ;  $P_2=0,7$ ;  $P_3=0,99$ ;  $\overline{P}_1=0,1$ ;  $\overline{P}_2=0,2$ ;  $\overline{P}_3=0,01$ ).

Таблица 2

Комбинации, упорядоченные по отношению $\Delta P_j / \Delta \overline{P}_j$				
j	Комбинация	$\Delta P_j$	$\Delta \overline{P}_j$	$\Delta P_j / \Delta \overline{P}_j$
1	111	0,4851	0,0002	2400
2	101	0,2079	0,0008	260
3	011	0,2079	0,0018	116
4	001	0,0891	0,0072	12
5	110	0,0049	0,0198	0,25
6	100	0,0021	0,0792	0,027
7	010	0,0021	0,1782	0,012
8	000	0,0009	0,7128	0,0013

Из таблицы видно, что при формировании общего сигнала тревоги целесообразнее опираться на срабатывание только третьей СОП (j=4), чем при срабатывании первой и второй (j=5).

Большое число вариантов построения решающего правила (по сравнению с традиционными: И, 2 из 3, ИЛИ) обеспечивает большую гибкость при выборе конкретного алгоритма, при этом все промежуточные градации лежат в наиболее важной области между крайними значениями характеристик схем логической обработки Ии ИЛИ.

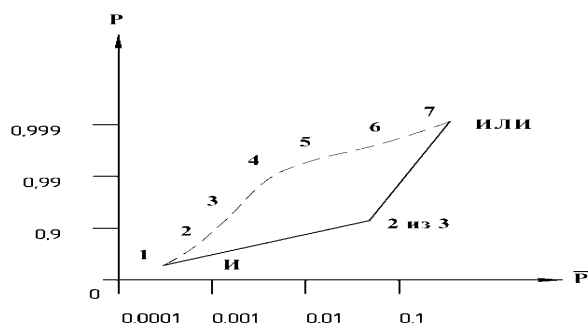


Рис. 1. Графики зависимости P от  $\overline{P}$

На рис. 1 показаны полученные из табл. 2 значения вероятности обнаружения P и вероятности ложных тревог  $\overline{P}$ , обеспечиваемые традиционными

схемами логической обработки И, 2 из 3, ИЛИ (соединены сплошной линией) и предлагаемыми (штриховая линия).

Из графика видно, что достигаемый положительный эффект обусловлен тем, что последовательный переход от точки 1 к 2, от 2 к 3 и т.д. всегда происходит по прямой с наибольшим тангенсом угла наклона (в нормальном масштабе), т.е. по пути наибольшего отношения приращения вероятности обнаружения к величине приращения вероятности ложной тревоги [2].

Теперь проанализируем алгоритм на основе присвоения каждой СОП весовых коэффициентов.

Пусть на одном рубеже располагается N систем охраны, на выходе каждой формируется сигнал, который принимает с определенной вероятностью значение тревоги  $u_i=1$  или  $u_i=0$  при ее отсутствии. Основными характеристиками данных сигналов являются плотности вероятностей распределений их появления при наличии нарушителя  $\omega_{si}(u_i)$  и при наличии помехового воздействия  $\omega_{pi}(u_i)$ .

Вероятность формирования сигнала  $u_i=1$  будет равна вероятности обнаружения  $P_i$ , поэтому:

$$\omega_{si}(u_i) = \begin{cases} P_i & \text{при } u_i = 1 \\ 1 - P_i & \text{при } u_i = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Аналогично плотность вероятности при наличии помехового воздействия:

$$\omega_{P_i}(u_i) = \begin{cases} \bar{P}_i & \text{при } u_i = 1 \\ 1 - \bar{P}_i & \text{при } u_i = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Запишем оптимальное по критерию Неймана-Пирсона решающее правило в следующем виде [3]:

$$\lg \frac{\omega_{S_i}(u_1, \dots, u_N)}{\omega_{P_i}(u_1, \dots, u_N)} > C, \quad (9)$$

где  $\omega_S(u_1, \dots, u_N)$  – совместная плотность вероятности сигналов от СО при проходе ля;  $\omega_P(u_1, \dots, u_N)$  – то же при наличии помехового воздействия;

$C$  – произвольная постоянная, значение которой определяет вероятность обнаружения алгоритма (9);

$u_1, \dots, u_N$  – анализируемая совокупность сигналов.

Решение о наличии нарушителя принимается при выполнении неравенства 9.

Заданная вероятность обнаружения устройства в целом  $P$  регулируется изменением величины  $C$ . Достижение заданной вероятности обнаружения с минимальной вероятностью ложной тревоги  $\bar{P}$  является оптимальностью решающего правила.

В случае, когда все системы охраны работают на различных физических принципах действия, то сигналы статистически независимы:

Тогда решающее правило записывается в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^N \lg \frac{\omega_{S_i}(u_i)}{\omega_{P_i}(u_i)} > C. \quad (10)$$

Введем новое обозначение  $C_1 = C - \sum_{i=1}^N \lg \frac{1-P_i}{1-\bar{P}_i}$  и вычтем из обеих частей неравенства постоянную величину  $\sum_{i=1}^N \lg \frac{1-P_i}{1-\bar{P}_i}$ . Получим:

$$\sum_{i=1}^N \lg \frac{\omega_{S_i}(u_i)(1-P_i)}{\omega_{P_i}(u_i)(1-\bar{P}_i)} > C_1. \quad (11)$$

Решающее правило принимает следующий окончательный вид:

$$\sum_{i=1}^N V_i(u_i) > C, \quad (12)$$

$$\text{где } V_i(u_i) \lg \frac{\omega_{S_i}(u_i)(1-P_i)}{\omega_{P_i}(u_i)(1-\bar{P}_i)} > C_1.$$

При выполнении неравенства (12) формируется общий сигнал тревоги.

Предлагаемый алгоритм построения комбинированных систем охраны заключается в формировании по сигналу тревоги от  $i$ -ой СОП сигнала заданной амплитуды  $q_i$  и длительности  $\tau$  (время памяти) с последующим суммированием сигналов и сравнением получаемой суммы с фиксированным пороговым уровнем, превышение которого приводит к формированию общего сигнала тревоги [1].

Значения  $q_i$  могут быть рассчитаны заранее по вероятности обнаружения  $P_i$ , и вероятности ложной тревоги  $\bar{P}_i$ . На рис. 2 приведены графики зависимостей веса  $i$ -ой СОП от его характеристик  $P_i$  и  $\bar{P}_i$ .

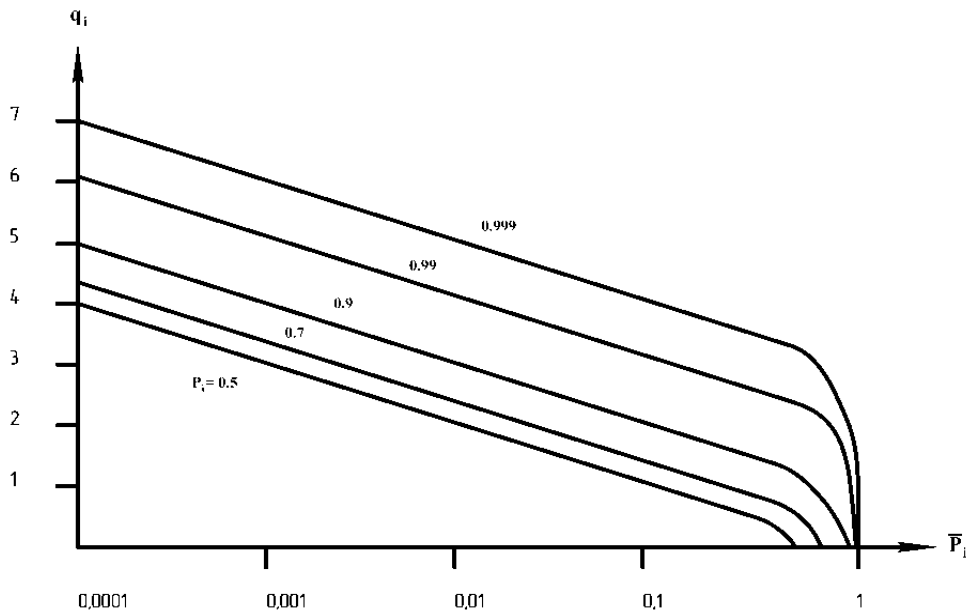


Рис. 2. Графики зависимостей  $q_i$  от  $P_i$  и  $\bar{P}_i$

Видно, что вес СОП  $q_i$  тем больше, чем больше его вероятность обнаружения и чем меньше его вероятность ложной тревоги.

### Заключение

Рассматриваемый алгоритм идентичен описанному ранее алгоритму упорядочивания комбинаций по величине отношений  $\Delta P_j / \Delta \bar{P}_j$ , однако имеет бо-

лее простой вид и удобнее для практической реализации. Причем, он всегда оптимален, т.е. при заданной вероятности обнаружения обеспечивает минимально возможную вероятность ложной тревоги. Одновременно обеспечивается максимально возможная вероятность обнаружения при заданной вероятности ложных тревог.

#### Литература

1. Магауенов Р.Г. Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения: учеб. пособие / Р.Г. Магауенов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 367с.
2. Периметровые ТСО: особенности выбора. [Электронный ресурс] // БНТИ 1999–2016 гг. URL: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=238&lvl=19.01.02>. (Дата обращения 28.10.2016).
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статической радиотехники / Б.Р. Левин. – М.: Советское радио, 1974-1976. – Кн. 1-3.

Воронежский государственный технический университет

## ALGORITHMS OF PERIMETRIC DETECTION AIDS SELECTION

**A.B. Antilikatorov<sup>1</sup>, S.Yu. Beletskaya<sup>2</sup>, A.S. Kulishenkov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [antilikatorov63@mail.ru](mailto:antilikatorov63@mail.ru)

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [su\\_bel@mail.ru](mailto:su_bel@mail.ru)

<sup>3</sup>Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [akulishenkov@yandex.ru](mailto:akulishenkov@yandex.ru)

The urgency of the system solution of problems and tasks of security activity has increased greatly in recent years, which is due to many factors. Security practice shows the need in a scientifically based approach to solving problems and tasks of different objects protection.

Individual perimeter security systems can not completely solve the problem of detecting an intruder. To cover all the possible ways of an intruder's movement in practice, several systems are used. However, different systems have different values of probability of detection and probability of false alarm, and this has to be taken into account.

In this paper, we consider an algorithm for processing signals from individual perimeter protection systems. This algorithm has a simpler form and is more convenient for practical implementation than the algorithm of combinations ordering by the ratio  $\Delta P_j / \Delta \bar{P}_j$ . Moreover, it is always optimal, i.e. with the given probability of detection, it provides the minimum possible probability of a false alarm. At the same time, with a given probability of false alarms, the maximum possible probability of detection is ensured

Key words: perimeter protection systems, combined detection aids, signal processing

#### References

1. Magauenov R.G. "Security alarm systems: fundamental theory and principles of construction: Manual" ("Sistemy okhrannoy signalizatsii: osnovy teorii i printsipy postroeniya. Uchebnoe posobie."), Moscow, Hotline – Telecom (Goryachaya liniya - Telekom), 2004, 367 p.
2. "Perimeter PT: peculiarities of choice" ("Perimetroye TSO: osobennosti vybora"), Science technology information bureau (BNTI), 1999-2016, available at: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=238&lvl=19.01.02>.
3. Levin B.R. "Theoretical foundations of static radio engineering" ("Teoreticheskie osnovy staticheskoi radiotekhniki"), Moscow, Sovetskoe Radio, 1974-1976, vol.1-3



## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ БИОПОТЕНЦИАЛОВ С ОРГАНИЗАЦИЕЙ СЛЕДЯЩЕЙ СВЯЗИ ПО ПИТАНИЮ

Д.В. Журавлёв, Ю.С. Балашов

Активное подавление помех, возникающих при регистрации биопотенциалов, возможно схемотехническими методами построения аналоговых входных узлов, а также путем специальной обработки уже оцифрованного сигнала внутри микропроцессора. В данной статье уделено внимание только схемотехническим методам борьбы с помехами.

Описаны принципы работы основного “ядра” усилителя биопотенциалов – дифференциального каскада. Изучение основных физических принципов работы усилительного элемента дифференциального каскада позволило выявить пути увеличения коэффициента подавления синфазных сигналов всей схемой усиления.

Исследованы варианты построения усилителя биопотенциалов с организацией двухполюсной следящей связи по питанию. Описаны преимущества и недостатки такой схемы.

Проведена разработка метода организации однополюсной следящей связи по питанию усилителя биопотенциалов, позволяющего устранить недостатки двухполюсной схемы. Анализ принципов работы дифференциального каскада позволил выявить зависимость изменения разбалансировки питающего напряжения (и, соответственно, сдвига напряжения смещения) на величину подавления синфазного сигнала. Доказано, что при появлении на входе усилителя биопотенциалов синфазного сигнала в дифференциальном каскаде его операционного усилителя будет происходить сдвиг напряжения смещения. Это явление удалось скомпенсировать с помощью дополнительно введенной обратной связи по питанию усилителя. Благодаря тому, что потенциал реального источника питания можно модулировать выходным током операционного усилителя, и наличие в нем внутреннего сопротивления была разработана методика построения усилителя биопотенциалов, позволяющая увеличить коэффициент подавления синфазных сигналов за счёт организации однополюсной следящей связи по питанию.

Проведено имитационное моделирование семи различных схем построения усилителей. По результатам моделирования установлено, что схема, построенная с применением разработанной методики, обладает наибольшим коэффициентом ослабления синфазных сигналов. Результаты имитационного моделирования проверены экспериментально.

Ключевые слова: синфазная помеха, обратная связь, дифференциальный каскад, усилитель биопотенциалов, коэффициент подавления

### Постановка задачи

В работе [1] было проведено исследование эффективности подавления синфазных сигналов следующими схемными решениями усилителей биопотенциалов (УБП):

- измерительный усилитель с установкой коэффициента усиления;
- измерительный усилитель со схемой защиты входа;
- схема с активным нейтральным электродом.

В процессе исследования выявлено значительное преимущество схемы с активным нейтральным электродом.

Дальнейшее увеличение эффективности подавления коэффициента синфазных сигналов возможно благодаря организации в усилителе следящей связи по питанию. Следящая связь по питанию представляет собой метод, при котором напряжение коллектора или стока отслеживается напряжением на базе или затворе транзистора. Применение этого метода к входному каскаду отдельного операционного усилителя (ОУ) влечет за собой повышение коэффициента

ослабления синфазных сигналов (КОСС) ( $K_C$ ), входного синфазного сопротивления и уменьшение входной синфазной емкости с входным током смещения.

На рис. 1 дифференциальная каскодная схема со следящей обратной связью образована входными транзисторами VT1, VT2 и вспомогательными транзисторами VT3, VT4, которые отслеживают напряжение на эмиттерах VT1, VT2 через эмиттерный повторитель VT5 и диод VD.

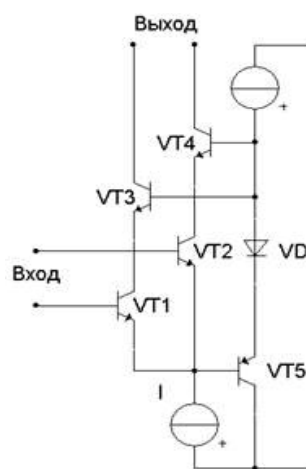


Рис. 1. Дифференциальная каскодная схема со следящей обратной связью

Журавлёв Дмитрий Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: [ddom1@yandex.ru](mailto:ddom1@yandex.ru), <http://Б-Б.su>  
 Балашов Юрий Степанович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: [faddey52@mail.ru](mailto:faddey52@mail.ru)

Реальный УБП обычно строят на нескольких ОУ. Следящую связь по питанию целесообразно организовать только для двух входных буферных усилителей и исследовать ее влияние на общую величину КОСС.

Учитывая вышеизложенное, проведем исследование влияния следящей связи по питанию не отдельного ОУ, а реального УБП состоящего из 3-х ОУ, соединенных по дифференциальной схеме включения.

#### Двухполюсная следящая связь по питанию.

На рис. 2 показана организация двухполюсной следящей связи по питанию в УБП. В этой схеме введен дополнительный маломощный расщепленный плавающий источник питания для входных ОУ U1 и U2. Для измерения

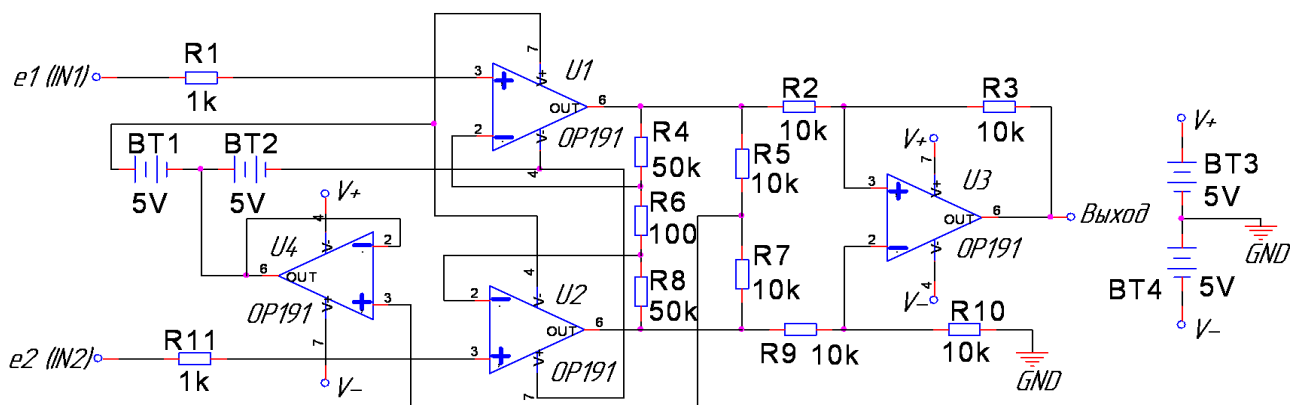


Рис. 2. Схема организации двухполюсной следящей связи по питанию в УБП

Поэтому целесообразна разработка метода организации следящей связи по питанию без использования дополнительного двухполярного источника питания.

#### Разработка метода организации однополюсной следящей связи по питанию.

Коэффициент ослабления синфазных сигналов  $K_C$  для схемы, представленной на рис. 2, составляет 128.568 дБ. Этот показатель является максимальным для всех схем, исследованных в работе [1]. Для повышения качества регистрируемого сигнала данную схему целесообразно использовать в приборах регистрации биопотенциалов. Однако наличие еще двух источников питания накладывает ограничения на использование этой схемы в малогабаритных микродатчиках-регистраторах.

Поэтому был разработан метод организации однополюсной следящей связи по питанию усилителя биопотенциалов, позволяющий устранить указанный недостаток представленной схемы. Далее рассмотрим ключевые этапы

уровня синфазного сигнала и управления общей точкой введенного источника питания в схема дополнена микросхемой ОУ U4.

Разработанная схема следящей связи по питанию позволяет дополнительно подавлять синфазный сигнал для входных ОУ U1 и U2.

Дополнительное подавление осуществляется благодаря отсутствию синфазных колебаний относительно питания усилителей U3 и U4, так как они питаются от введенного расщепленного источника питания.

Данная схема позволяет добиться дальнейшего увеличения  $K_C$ . Однако введение дополнительного двухполярного источника питания значительно усложняет использование УБП в малогабаритных микродатчиках-регистраторах.

разработки метода организации однополюсной следящей связи по питанию.

Разработанный усилитель позволяет добиться повышенного значения уровня  $K_C$  благодаря следующим особенностям. Благодаря организации следящей связи, напряжение питания усилительной схемы меняется пропорционально изменению синфазной помехи на входе усилителя. Поэтому на входах  $e1$  и  $e1$  усилительных каскадов U1 и U2 отсутствует синфазная помеха относительно питающего ОУ напряжения. Указанная закономерность возникает вследствие наличия связи между коэффициентом ослабления синфазных сигналов ОУ  $K_C$  и его источником питания. Данная связь выражается через коэффициент ослабления помех от источника питания (PSSR) (или коэффициент ослабления влияния нестабильности источника питания). Данный параметр для каждого ОУ свой. Для OP191 он равен 90 дБ. Данный коэффициент ослабления влияния нестабильности выражается, через отношение изменения пита-

ющего напряжения к изменению напряжения смещения ОУ:

$$PRSS = 20Lg \frac{\Delta u_{num}}{\Delta u_{см}}, \text{ дБ} \quad (1)$$

По формуле не трудно подсчитать что для усилителя OP191 изменение питающего напряжения всего на 1В вызовет изменение напряжения смещения на 32 мкВ. Изменение напряжения смещения произойдет в ту сторону (отрицательную или положительную), в какую произошло смещение напряжения питания.

Далее рассмотрим работу входного дифференциального каскада, как основного элемента ОУ. Это позволит детально изучить причину изменения  $K_C$ , как функции напряжения питания.

Представленный на рис. 3 дифференциальный каскад (ДК) имеет следующие составные части: токовое зеркало построенное на элементах VT1, VT3, являющееся «активной нагрузкой»; усилители на элементах VT2, VT4; генератор стабильного тока (ГСТ) (транзистор VT5).

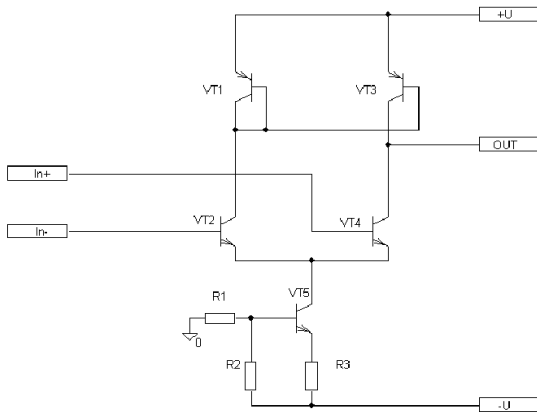


Рис. 3. Каскад дифференциального типа

Далее выразим  $K_C$  через коэффициенты усиления дифференциального сигнала ( $A_{диф}$ ) и синфазного сигнала ( $A_{сиф}$ ). Затем выразим эти коэффициенты в дифференциальном каскаде:

$$A_{диф} = \frac{dU_{вых}}{dU_{диф}} = -\frac{1}{2} [S * (R_k || R_{нагр})], \quad (2)$$

где  $S$  – крутизна каскада усиления;

$R_k || R_{нагр}$  – параллельно соединенные сопротивления в цепи коллектора ДК и входное сопротивление следующего каскада.

Крутизна каскада усиления определяется по формуле:

$$S = \frac{I_{E1} * I_{E2}}{\varphi_T * (I_{E1} + I_{E2})}, \quad (3)$$

где  $\varphi_T$  – температурный потенциал транзисторов  $\varphi_T = kT/q$ ;

$I_{E1}, I_{E2}$  – токи эмиттера первого и второго входных каскадов;

$$A_{сиф} = \frac{dU_{вых}}{dU_{сиф}} = -\frac{1}{2} \left( \frac{R_k}{r_{сгм}} \right), \quad (4)$$

где  $r_{сгм}$  – дифференциальное сопротивление на выходе генератора стабильного напряжения.

Окончательное выражение для  $K_C$  после подстановки коэффициентов:

$$K_C \approx \frac{I_E * r_{сгм}}{\varphi_T}. \quad (5)$$

Из полученного выражения видно, что если не учитывать другие свойственные дифференциальному каскаду параметры, коэффициент  $K_C$  будет зависеть от выбранного токового режима величины выходного сопротивления ГСТ в ДК.

При этом выходное дифференциальное сопротивление ГСТ можно найти из формулы:

$$r_{сгм} = -\frac{dU_k}{dI_k} = r_{CE} \times \left[ 1 + \frac{\beta * R_3}{R_1 || R_2 + r_{BE} + R_3} \right], \quad (6)$$

где  $r_{CE}$  и  $r_{BE}$  – объёмные сопротивления коллектор-эмиттер и база-эмиттер соответственно.

Объёмное сопротивление база-эмиттер определяется как:

$$r_{BE} = \beta \cdot \frac{\varphi_T}{I_k} \quad (7)$$

Чтобы увеличить дифференциальное сопротивление ГСТ  $r_{сгм}$  надо увеличивать рези-

стор R3 (рис. 3) в цепи эмиттера. При этом ток стабилизации будет уменьшаться. Также необходимо выбирать транзисторы с максимальным значением статистического коэффициента усиления по току. При увеличении резистора R3, за счет уменьшения крутизны усилительных элементов также будет происходить уменьшение  $A_{диф}$ .

Полученная выходная характеристика ГСТ показана на рис. 4. Используемые в схеме усилителя биопотенциалов ОУ ОР191 имеют ГСТ построенный на транзисторе биполярного типа. Он имеет низкое статическое сопротивление. Однако его дифференциальное сопротивление высоко. Если рассмотреть это на рис. 4, то можно увидеть, что дифференциальное сопротивление составляет

$$dU_{num}/dI_{ГСТ} = 2B/0,01mA = 0,2MOm, \text{ а статическое } U_0/I_0 = 4B/2mA = 2kOm.$$

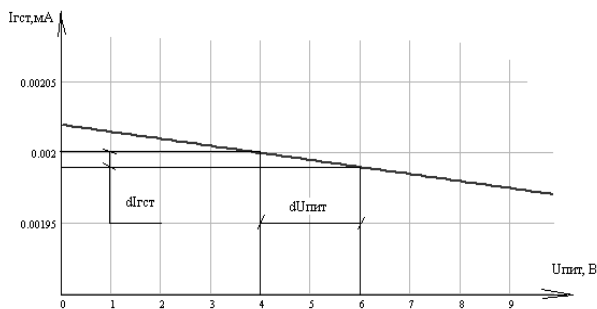


Рис. 4. Выходная характеристика ГСТ

Данные показатели означают то, что при изменении питающего напряжения следящего каскада на 2В, эмиттерный ток транзисторов VT2, VT4 будет изменяться на 0,5%. Соответственно произойдет смещение ДК из-за изменения токов. Причем смещение ДК будет происходить в направлении противоположном уже присутствующему сдвигу входного напряжения ДК, вызванному воздействием синфазной помехи. Далее из-за изменения коллекторных потенциалов VT2, VT4 произойдет еще большее смещение ДК.

Теоретически в идеализированном ДК  $K_C$  усилителя, построенного по дифференциальной схеме равняется бесконечности. В реальном усилителе значение  $K_C$  сильно зависит от повторяемости параметров дифференциальных каскадов. Такая повторяемость может быть достигнута принудительной подгонкой элементов усилительного каскада и при использовании определенной технологии изготовления

Если на вход усилителя подать синфазный сигнал, то в транзисторах VT2, VT4 коллекторные потенциалы будут смещаться на разные величины из-за не идеальности параметров этих транзисторов. Такое смещение возникает из-за разных напряжений  $U_{BE}$  (база-эмиттер) VT2 и  $U_{BE}$  VT4. Связь  $K_C$  с базовыми потенциалами по постоянному току выражает формула:

$$\frac{1}{K_{OCC}} = \frac{dU_{BEVT2}}{dU_{сиф.}} - \frac{dU_{BEVT4}}{dU_{сиф.}}. \quad (8)$$

В транзисторах VT2, VT4 возникает эффект Эрли, который выражается в модуляции толщины базы в зависимости от тока насыщения  $I_{нас}$  и коэффициента усиления по току  $\beta$  транзистора. Далее определим ток насыщения транзистора  $I_{нас}$  с коэффициентом усиления по току  $\beta$  через напряжение Эрли ( $U_A$ ).

$$I_{нас} = I_0 \left( 1 + \frac{U_{CB}}{U_A} \right), \quad (9)$$

$$\beta = \beta_0 \left( 1 + \frac{U_{CB}}{U_A} \right), \quad (10)$$

где  $I_{нас}$  — ток насыщения транзистора при  $U_{CB} = 0$ ;

$\beta_0$  — коэффициент усиления по току транзистора при  $U_{CB} = 0$ .

Дифференциальная проводимость коллектора [2] определяется в соответствии с выражением (9) при  $U_{CB} = 0$  по следующей формуле:

$$g_C = \frac{I_C}{(U_{CB} + U_A)} = \frac{I_{C0}}{U_A}, \quad (11)$$

где  $I_{C0}$  — ток коллектора.

Далее продифференцируем ток коллектора и получим выражение:

$$dI_C = \frac{dI_C}{dU_{BE}} dU_{BE} + \frac{dI_C}{dU_{BE}} dU_{CB} =, \quad (12)$$

$$= g_m dU_{BE} + g_C dU_{CB}$$

где  $g_C, g_m$  — коэффициенты обратные крутизне нормированной по току.

После этого получим выражение:

$$\frac{dU_{BE}}{dU_{CB}} = -\frac{g_C}{g_m} + \left(\frac{kT}{q}\right) * \left(\frac{dI_C}{I_C} dU_{CB}\right). \quad (13)$$

Далее можно преобразовать это выражение для обоих транзисторов учитывая  $U_{CB} + U_{сиф} = const$ . После преобразований получим:

$$\frac{1}{KOCC} = \frac{g_{C1}}{g_{m1}} - \frac{g_{C2}}{g_{m2}} + \frac{kT}{q} \left( \frac{\frac{dI_{C1}}{I_{C1}} dU_{сиф}}{-\frac{dI_{C2}}{I_{C2}} dU_{сиф}} \right). \quad (14)$$

Если предположить, что в следующих за ДК усиливающих каскадах сдвиг практически не происходит, то выражение можно записать в виде:

$$\frac{1}{KOCC} = \frac{kT}{q} \left( \frac{\frac{1}{U_{CB} + U_{A1}}}{-\frac{1}{U_{CB} + U_{A2}}} \right) \approx \approx \frac{\varphi_T \Delta U_A}{U_A^2} \quad (15)$$

где  $U_A = \frac{U_{A1} + U_{A2}}{2}$ ,  $\Delta U_A = \frac{U_{A1} - U_{A2}}{2}$ .

Анализируя полученное выражение можно сделать вывод о том, что:

1.  $K_C$  не зависит от уровней токов коллекторов и их положения в рабочей точке в транзисторах VT2, VT4.
2.  $K_C$  зависит только от разброса напряжений Эрли  $\Delta U_A$  в транзисторах VT2, VT4.

Вышеприведенные формулы показывают, что при появлении на входе усилителя биопотенциалов синфазного сигнала в дифференциальном каскаде его операционного усилителя будет происходить сдвиг напряжения смещения. Это приводит к сильному ухудшению подавления синфазных сигналов. Поэтому существует острая необходимость компенсации этого явления. Напряжение смещения можно скомпенсировать с помощью дополнительно введенной обратной связи по питанию усилителя.

Такая обратная связь была введена через общий для всего усилителя двухполюсный источник питания. При этом введение в схему усилителя дополнительных источников питания не требуется. Подаваемое на положительный полюс двухполюсного источника питания напряжение прямо пропорционально возникающему напряжению синфазной помехи.

График, отражающий характер изменения  $K_C$  при изменении напряжения питания показан на рис. 5.

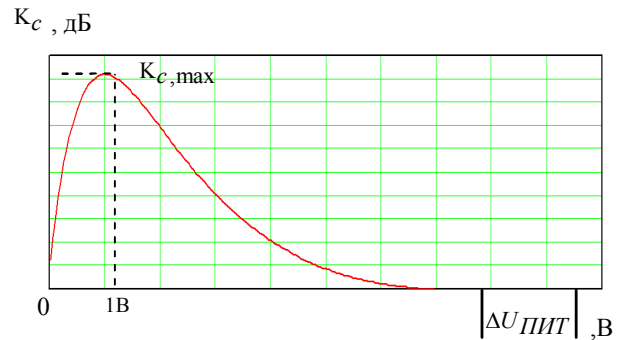


Рис. 5. Зависимость  $K_C$  от изменения напряжения питания

Основопологающим моментом разработанного метода организации однополюсной следящей связи по питанию является дополнительное введение обратной связи через положительный полюс общего двухполюсного источника питания.

Эта зависимость аппроксимируется выражением:

$$K_C(\Delta U) = e^{-5.94\Delta U} \Delta U \times \left( \begin{aligned} &8.0975 \sin(1.7\Delta U) \\ &+ 9.7515 \cos(1.7\Delta U) \end{aligned} \right) + e^{-5.94\Delta U} \times \left( \begin{aligned} &1.7868 \sin(5.62\Delta U) \\ &+ 0.2215 \cos(5.62\Delta U) \end{aligned} \right) \quad (16)$$

где  $\Delta U = 0 \dots U_{пит}$ .

Разработанная электрическая принципиальная схема УБП с организацией однополюсной следящей связи по питанию показана на рис. 6.

Схема УБП построенная по разработанной методике может использоваться в малогабаритных устройствах регистрации биопотенциалов

благодаря исключению дополнительного источника питания и, следовательно, возможностью высокой микроминиатюризации. При этом величина подавления  $K_C$  остается на высоком уровне и не уступает схемам, построенным с организацией двухполюсной обратной связи по питанию.

Для съема сигналов, возникающих на входных электродах в разработанную схему дополнительно введены буферные усилители (повторители напряжения) U6, U7.

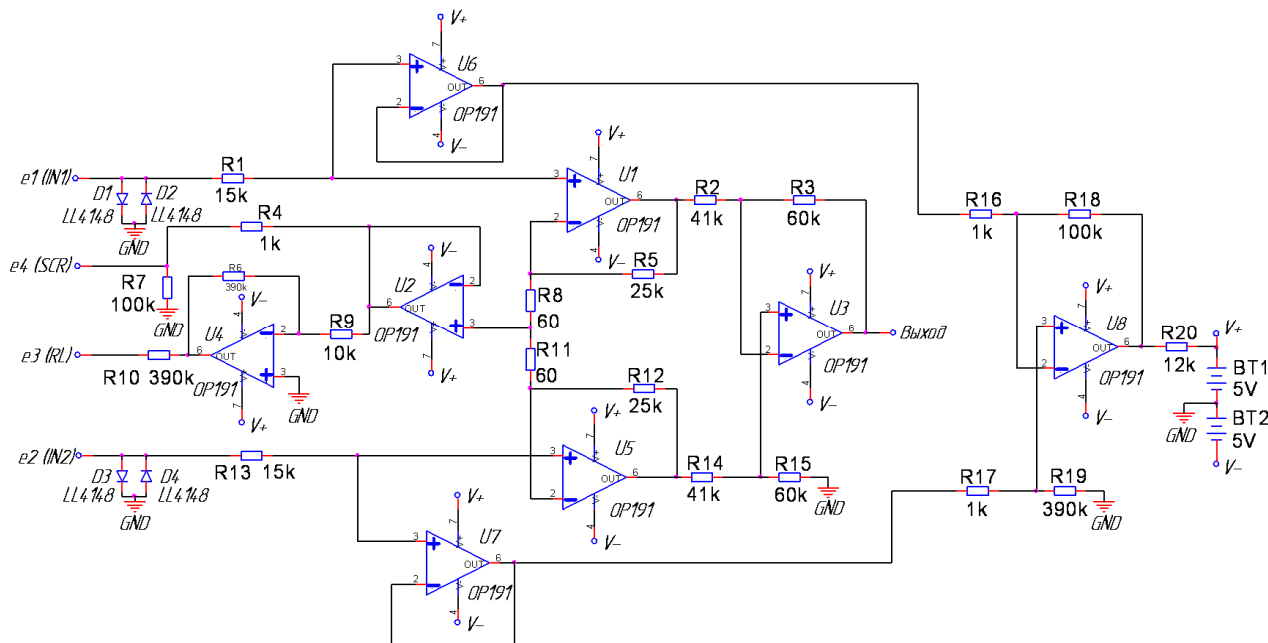


Рис. 6. Схема УБП с организацией однополюсной следящей связи по питанию

Они имеют единичный коэффициент усиления и обеспечивают высокое входное сопротивление схемы УБП. На рис. 7. показаны виды сигналов, полученные на выходах буферных усилителей.

**Анализ эффективности работы схемы УБП с организацией однополюсной следящей связи по питанию.**

На дифференциальный усилитель U8 поступает аддитивная смесь полезного и синфазного сигналов. При этом напряжение на выходе усилителя можно определить по формуле:

$$U_{\text{вых}} = U_2 \left[ \frac{R19}{R17 + R19} \right] \times \left[ \frac{(R16 + R18)}{R16} \right] - \left( \frac{R18}{R16} \right) \times U_1, \quad (17)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – напряжения, получаемые на первом и втором электродах.

Введенная обратная связь позволяет подать усиленный сигнал на положительный полюс общего двухполюсного источника питания. При этом обеспечивается следящая связь по питанию

усилителя, что приводит к значительному увеличению  $K_C$ .

Далее подставим измеренные значения в формулу (17):

$$U_{\text{вых}} = 0,362 \times \left( \frac{390000}{390000 + 1000} \right) \times \left( \frac{1000 + 100000}{1000} \right) - \left( \frac{100000}{1000} \right) \times 0,356 = 0,76$$

На рис. 8 показан общий сигнал, получаемый на выходе усилителя (сигнал усилен в 600 раз) и сигнал который подавался на положительный полюс источника питания (сигнал усилен в 100 раз). На рис. 9 показан спектр сигнала, подаваемого на положительный полюс двухполюсного источника питания.

Благодаря применению предложенной методики построения было достигнуто увеличение  $K_C$  до 130.698 дБ. Значительное увеличение  $K_C$  объясняется следующими факторами.



Потенциал реального источника питания можно модулировать выходным током операционного усилителя, благодаря наличию в нем внутреннего сопротивления. При этом величина тока протекающего от источника напряжения на общий проводник схемы через выходные цепи ОУ зависит от величины напряжения на выходе ОУ. Следовательно, появляется разбалансировка между полюсами двухполюсного источника питания. Такая разбалансировка аналогична изменению нулевого уровня выходного ОУ. В свою очередь увеличение уровня выходного полезного сигнала относительно уровня помеховой составляющей достигается за счет изменения нулевого уровня ОУ в такт входному полезному сигналу. Данное обстоятельство приводит к увеличению коэффициента подавления синфазных сигналов.

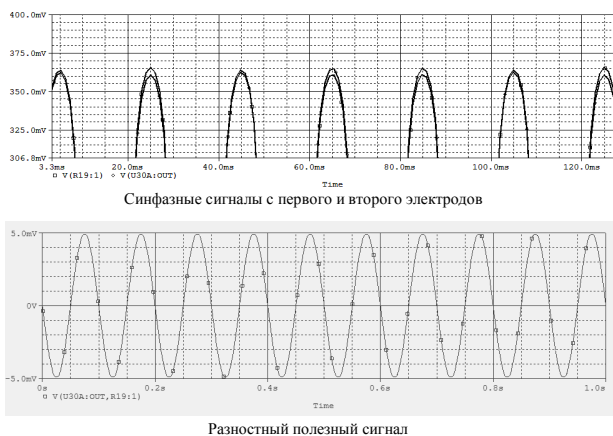


Рис. 7. Виды сигналов на выходе буферных усилителей

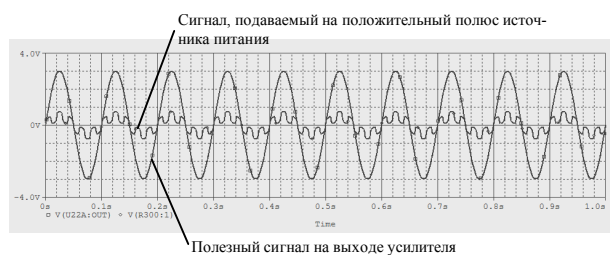


Рис. 8. Сравнение выходных сигналов

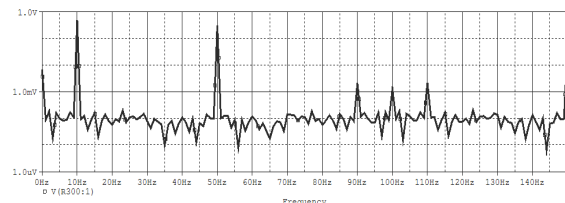


Рис. 9. Спектр сигнала обратной связи

В ходе работы были проанализированы результаты подавления синфазных сигналов семью разными вариантами схем УБП.

Схемы 1-5 вариантов построены с применением различных операционных и инструмен-

тальных усилителей. Схема варианта 6 реализована с применением двухполюсной следящей связи по питанию. Схема варианта 7 реализована с применением разработанной методики однополюсной следящей связи по питанию.

На рис. 10 показаны результаты подавления синфазных сигналов для схем УБП различных вариантов.



Рис. 10. Результаты подавления синфазных сигналов различными вариантами схем

Для сравнения полученных экспериментальных характеристик с расчетными все семь вариантов усилителей были собраны на макетной плате, специально для этого спроектированной.

В эксперименте были использованы стандартные радиоэлектронные лабораторные приборы и средства измерения.

Входные сигналы были сформированы с помощью генератора сигналов низкочастотного ГЗ-112/1 (погрешность установки частоты при относительной влажности 80% и температуре

30°C не превышает  $\pm \left( 2 + \frac{200}{f_n} \right) \%$  для диапазо-

на частот от 10 до 1000 Гц, где  $f_n$  – установленное по шкале значение частоты в герцах; изменение напряжения на выходе генератора, обусловленное изменением напряжения питания на  $\pm 10\%$  для сети частотой 50 Гц не превышает  $\pm 1\%$ ).

Для измерения входных сигналов, поступающих на усилители, и выходного сигнала с усилителей использован микровольтметр селективный В6-14 (Аналог: SPM-11 W Holt), имеющий широкий диапазон измерения (до 130 дБ) и высокую избирательность. Его технические характеристики следующие: измеряемое напряжение (1мкВ–3В) {(0,130) дБ/мкВ на частоте 15Гц, 200 кГц}; ширина полосы ния тракта пром. частоты на уровне -3 дБ – 8Гц (на частоте 15 Гц, 200 кГц); 30 Гц (на частоте 300 Гц, 200 кГц); 100 Гц (на частоте 1 кГц, 200 кГц); Средний уровень шумов: 6 дБ/мкВ [1].

Пассивные и активные электрорадиоэлементы были использованы такие же, что и при моделировании схем УБП.

Результаты проведенных измерений показали значительную схожесть экспериментальных и расчетных данных. Это позволило сделать вывод об объективности расчетных данных и целесообразности применения разработанной методики.

Разработанная методика построения входных узлов устройств регистрации биопотенциалов позволяет значительно увеличить коэффициент подавления синфазных сигналов. Это достигается путём введения дополнительных усилительных каскадов, организующих подачу синфазного и полезного разностного сигналов на соответствующие помехоподавляющие узлы схемы.

Данная методика отличается тем, что дополнительное увеличение коэффициента подав-

Воронежский государственный технический университет

## DIFFERENTIAL BIOELECTRIC-POTENTIAL AMPLIFIER WITH ORGANIZATION OF POWER SERVO FEEDBACK

D.V. Zhuravlyev<sup>1</sup>, Yu.S. Balashov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: ddom1@yandex.ru

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: faddey52@mail.ru

Active suppression of noise arising during registration of biopotentials is possible with circuitry methods for constructing analog input junctions, and also by special processing of the already digitized signal inside the microprocessor. In this article, attention is given only to circuitry methods of controlling noise.

The principles of functioning of the main "core" of a biopotential amplifier - bipolar circuit- are described. Study of the basic physical operation principles of a bipolar circuit amplifying element has made it possible to identify the ways of increasing the common-mode signal suppression coefficient by the entire amplification circuit.

The variants of constructing a biopotentials amplifier with organization of power bipolar servo feedback are investigated. Advantages and disadvantages of the scheme are described.

Development of a method for organizing a power single-pole servo feedback of a biopotential amplifier is made, which makes it possible to eliminate the drawbacks of a bipolar scheme. The analysis of the principles of operation of the bipolar circuit made it possible to determine the dependence of the change in the unbalance of the supply voltage (and, correspondingly, the shift of the bias voltage) on the magnitude of the suppression of the. It is proved that when the common-mode signal appears at the input of the biopotential amplifier, a displacement of the bias voltage will occur in the bipolar circuit of its operational amplifier. This phenomenon could be compensated for by means of an additional feedback on the power of the amplifier. Due to the fact that the potential of a real power source can be modulated by the output current of an operational amplifier and the presence of internal resistance in it, a technique for constructing a biopotential amplifier has been developed, which makes it possible to increase the common-mode suppression factor due to the organization of a power single-pole servo feedback.

Simulation of seven different circuits for the construction of amplifiers was carried out. Based on the results of the simulation, it has been established that the circuit constructed using the developed technique has the largest signals coefficient. The results of simulation are verified experimentally

Key words: common-mode noise, feedback, bipolar circuit, bioelectric-potential amplifier, suppression factor

### References

1. Zhuravlyev D.V., Balashov Yu.S., Kostin A.A., Reznikov K.M. "Remote monitoring system of the functional parameters of a man: Monography" ("Sistemy distantsionnogo kontrolya funktsional'nykh parametrov cheloveka: Monografiya"), Voronezh, VSTU, 2009, 220 p.
2. Akhutin V.M., Nemirko A.P., Pershin N.N., Pozharov A.V., Popchitelev E.P., Romanov S.V. "Biotechnical systems: theory and design: Manual" ("Biotekhnicheskie sistemy: Teoriya i proektirovanie: Ucheb. posobie"), Leningrad, Leningrad University Publ., 1981, 220 p.



## МАЛОГАБАРИТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОГО ЛАБИРИНТА

А.С. Бадаев

Предложена оригинальная методика расчета акустической трансмиссионной линии (акустического лабиринта), основанная на методе электромеханических аналогий и представлении трансмиссионной линии в виде её электрического аналога – длинной линии с произвольной нагрузкой. Показано, что оптимальная длина трансмиссионной линии равна четверти длины волны, излучаемой динамической головкой на частоте своего резонанса в воздухе, а площадь поперечного сечения – эффективной площади диффузора головки. При этом входное сопротивление трансмиссионной линии максимально и имеет чисто активный характер, подобно параллельному колебательному контуру, настроенному в резонанс. На этой частоте выходное отверстие акустического лабиринта интенсивно излучает энергию в окружающее пространство, в то же время амплитуда колебаний диффузора динамической головки при этом минимальна, вследствие чего значительно снижаются искажения в низкочастотной области. Нежелательные резонансы на частотах выше основного резонанса подавляются с помощью звукопоглощающего материала на внутренних стенах лабиринта. Представлена конструкция двухполосных малогабаритных акустических систем типа «акустический лабиринт» с повышенным уровнем характеристической чувствительности, рассчитанная по предложенной методике. Приведены их основные параметры и характеристики. В конструкции использованы разделительные фильтры первого порядка в низко-, среднечастотной областях и третьего порядка в области высоких частот, частота раздела составляет 2,4 кГц. Анализ результатов измерений показывает высокую стабильность частотной зависимости модуля полного сопротивления во всем диапазоне воспроизводимых частот, что значительно упрощает подбор усилителя низкой частоты. АЧХ разработанных акустических систем обладает неплохой равномерностью, отмечено незначительное увеличение неравномерности ( $\pm 4$  дБ) на частотах выше 1,5 кГц. Дальнейшая работа по подбору высокочастотного излучателя, выбора частоты раздела и порядков разделительных фильтров позволит улучшить АЧХ в этой частотной области

Ключевые слова: акустические системы, трансмиссионные линии, акустический лабиринт

### Введение

Акустическая трансмиссионная линия (ТЛ) представляет собой трубу с поперечным сечением  $S$  и длиной  $l \gg \sqrt{S}$ , с одной стороны которой установлена динамическая головка (ДГ), другая сторона открыта [1]. Для уменьшения габаритных размеров акустических систем (АС) на основе ТЛ часто применяют свернутые трубы, которые рассчитываются как и обычные. Такие АС получили название акустического лабиринта (АЛ). В некоторых работах, например [2], обсуждается разница между акустическими оформлениями «ТЛ» и «АЛ», нам представляется, что это вопрос терминологии. ДГ не может эффективно работать в области низких частот (НЧ) без акустического оформления (т.е. корпуса), разделяющего излучения передней и задней стороны диффузора ДГ, которые складываются в противофазе, резко уменьшая звуковое давление в области НЧ. АЛ является одним из немногих акустических оформлений, в которых задняя сторона диффузора, нагруженная на грамотно рассчитанную и настроенную трубу, не мешает, а помогает излучению передней стороны. АЛ является таким акустическим устройством, которое не может быть описано эквивалентной схемой с сосредоточенными параметрами, как описываются другие АС [3]. Здесь становится важным не только объем, но и линейные размеры устройства.

### Методика расчета

На сегодняшний день не существует общепринятой методики аналитического либо машинного расчета трансмиссионной линии. Рекомендованные длины линий колеблются от четверти волны  $\lambda/4$ , излучаемой ДГ на частоте своего резонанса в воздухе, (и даже от  $\lambda/8$  при плотном заполнении трубы звукопоглотителем) до полуволны. Нет единого мнения о площади поперечного сечения и законе изменения этого сечения вдоль длины трубы. Существуют трубы постоянного и переменного сечения, возрастающего и убывающего по линейным и нелинейным законам. Доводка ТЛ осуществляется на слух и, как показывает опыт прослушиваний, далеко не всегда удачно.

Как было отмечено выше, ТЛ является системой с распределенными параметрами, поэтому электрическим аналогом трубы является длинная линия с произвольной нагрузкой.

В работе [1] с использованием метода электромеханических аналогий было показано, что механическое волновое сопротивление длиной трубы

$$Z_{M.B.} = \rho c S \quad (1)$$

где  $c$  – скорость звука;  $\rho$  – плотность воздуха;  $S$  – площадь поперечного сечения трубы.

В Отсутствии отражений от конца трубы, что получается при согласовании нагрузки трубы и волнового сопротивления ( $Z_H = Z_{M.B.}$ ), входное механическое сопротивление трубы будет определяться акустическим сопротивлением плоской бегущей волны, т.е.

---

Бадаев Андрей Станиславович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: faddey52@mail.ru

$$Z_{BX} = \rho c S . \quad (2)$$

При наличии отражений от концов труба будет резонировать на определенных частотах, которые определяются её длиной и условиями отражения от ее концов, как и в случае электрических длинных линий.

В нашем случае труба нагружена на  $Z_H$ , которое определяется, прежде всего, свойствами среды, в ряде случаев оно зависит от частоты колебаний и от формы фронта волны. В общем виде оно комплексное:

$$Z_H = R_H + jX_H, \quad (3)$$

Входное сопротивление электрической длинной линии без потерь, нагруженная на произвольную нагрузку:

$$Z_{BX} = Z_B \frac{Z_H + jZ_B \operatorname{tg} \beta x}{Z_B + jZ_H \operatorname{tg} \beta x}, \quad (4)$$

где  $\beta = \omega/c = 2\pi f/c = 2\pi/\lambda$  [рад/м];  $\omega$  – круговая частота;  $c$  – скорость волны;  $\lambda$  – длина волны;  $x$  – координата;  $f$  – циклическая частота;  $Z_B$  – волновое сопротивление линии.

Подставим формулу (4) в выражение (3) и умножим числитель и знаменатель дроби на сопряженное комплексное число знаменателя. Это позволит разделить активную  $R_{BX}$  и реактивную  $X_{BX}$  составляющие входного сопротивления линии. После преобразования получим:

$$R_{BX} = \frac{Z_B^2 R_H}{Z_B^2 \cos^2 \beta x + (R_H^2 + X_H^2) \sin^2 \beta x - Z_B X_H \sin 2\beta x}, \quad (5)$$

$$X_{BX} = \frac{(Z_B^2 - R_H^2 - X_H^2) \sin \beta x \cos \beta x + Z_B X_H \cos 2\beta x}{Z_B^2 \cos^2 \beta x + (R_H^2 + X_H^2) \sin^2 \beta x - Z_B X_H \sin 2\beta x}.$$

При длине линии, равной четверти волны, получим:

$$R_{BX} = \frac{Z_B^2 R_H}{R_H^2 + X_H^2}; \quad X_{BX} = \frac{Z_B X_H}{R_H^2 + X_H^2}. \quad (6)$$

$$\text{Если } x = \lambda/2, R_{BX} = R_H; X_{BX} = X_H. \quad (7)$$

Соответственно для входного сопротивления ТЛ с учетом (1) имеем:

При  $x = \lambda/4$ ,

$$R_{BX} = \frac{(\rho c S)^2 R_H}{R_H^2 + X_H^2}; \quad X_{BX} = -\frac{\rho c S X_H}{R_H^2 + X_H^2}. \quad (8)$$

Колеблющийся столб воздуха у выходного отверстия трубы подобно поршневой диафрагме на низких частотах излучает сферическую волну. Акустическое сопротивление среды при прохождении сферической волны содержит активную и реактивную составляющие:

$$R_H = \rho c S \frac{\omega^2 r^2}{c^2 + \omega^2 r^2}; \quad X_H = \rho c S \frac{\omega r c}{c^2 + \omega^2 r^2}, \quad (9)$$

где  $r$  – расстояние от центра сферической волны.

Подставляя (9) в (8), получим:

$$\text{При } x = \lambda/4, R_{BX} = \rho c S; X_{BX} = c/\omega r = \lambda/2\pi r \quad (10)$$

При длине трубы, равной четверти длины волны, излучаемой динамической головкой, активная часть входного сопротивления имеет максимум. Реактивная часть  $Z_{BX}$  стремится к нулю при увеличении  $r$  и росте частоты колебаний, т.е. её можно пренебречь без внесения заметной ошибки. Таким образом, входное сопротивление четвертьволновой трубы на частоте  $f = c/4l$  максимально и имеет чисто активный характер, при этом она ведет себя, как параллельный электрический контур, настроенный в резонанс. Частота  $f$  равна собственной резонансной частоте головки в воздухе  $f_0$ . Это свидетельствует о том, что на этой частоте ТЛ интенсивно излучает энергию в окружающее пространство. Амплитуда колебаний диффузора динамической головки при этом минимальна, излучает в основном труба ТЛ, а диффузор подкачивает в этот процесс энергию. Вследствие этого резко снижаются искажения в низкочастотной области, вызываемые отклонением от линейного поведения упругого подвеса диффузора и центрирующей шайбы, а также выходом звуковой катушки головки из однородного магнитного поля. Поведение ТЛ на резонансной частоте напоминает фазоинвертор. Выше резонанса фазоинверторное отверстие оказывает на процессы все более и более ограниченное действие, труба же продолжает излучать на частотах  $3c/4l, 5c/4l, 7c/4l$  и т.д. В акустических системах (АС) типа ТЛ эти резонансы нежелательны, поскольку приводят к появлению провалов на АЧХ, поэтому с ними борются с помощью демпфирования внутренних стенок звукопоглощающими материалами. Наличие звукопоглотителя необходимо учитывать, так как выше приведенные расчеты относились к идеальным линиям без потерь.

### Конструкция и характеристики разработанных АС

На основе изложенной методики была рассчитана и изготовлена АС типа «акустический лабиринт» на основе динамических головок фирмы «Wifa» (Дания). Схема АС представлена на рис.1. Головка НЧ-СЧ M17SG-09-08 имеет следующие характеристики: номинальное сопротивление – 8 Ом; номинальная мощность – 50 Вт; диапазон частот – 40-5000 Гц; чувствительность (1 Вт, 1 м) – 88 дБ; полная добротность – 0,4; эквивалентный объем – 40 л; резонансная частота – 45 Гц; площадь диффузора – 160 см<sup>2</sup>, ВЧ-головка D19SD-05-08: номинальное сопротивление – 8 Ом; номинальная мощность – 100 Вт; резонансная частота – 1600 Гц; чувствительность (1 Вт, 1 м) – 90 дБ. Схема

разделительных фильтров представлена на рис. 2 [4].

Частота раздела составляет 2,4 кГц. В конструкции фильтров применены полипропиленовые конденсаторы «Solen» (Франция), катушки индуктивности без сердечников.

Длина сложенной трубы – 1,8 м, площадь поперечного сечения выбрана равной эффективной площади диффузора НЧ-СЧ ДГ  $S = S_0 = 140 \text{ см}^2$ . Внутренние стенки АС покрыты звукопоглощающим материалом. Корпус АС выполнен из MDF-плиты, толщиной 18 мм (материала с высоким декрементом затухания), перегородки, формирующие лабиринт, из того же материала толщиной 12 мм. Для согласования механического сопротивления подвижной системы НЧ-СЧ ДГ и входного сопротивления трубы лабиринта использована, так называемая, «предрупорная камера» подобно рупорным системам [5]. Основные технические характеристики АС следующие: номинальная мощность – 60 Вт, паспортная мощность – 100 Вт; номинальное сопротивление – 8 Ом; диапазон воспроизводимых частот при неравномерности – 6 Дб -40 Гц ÷ 25000 Гц; чувствительность – 90 дБ; габариты – 52×24×32 см; масса – 9 кг. Частотная зависимость модуля полного сопротивления и АЧХ АС представлена на рис. 3 и 4.

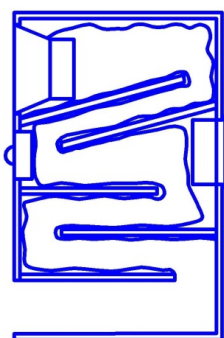


Рис. 1. Схема АС на основе акустического лабиринта

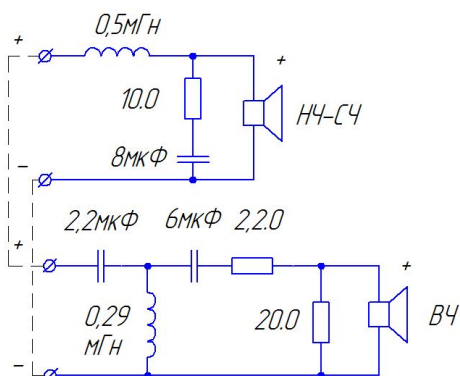


Рис. 2. Схема разделительных фильтров

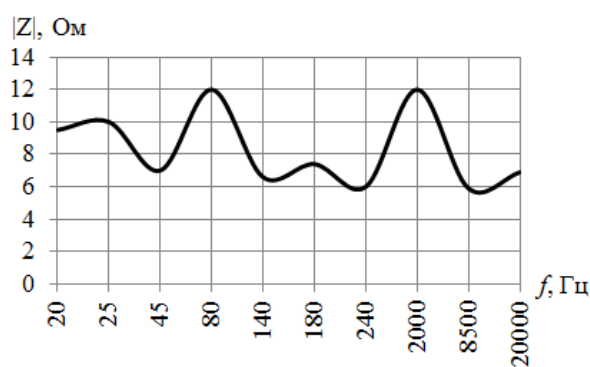


Рис. 3. Частотная зависимость модуля полного сопротивления АС

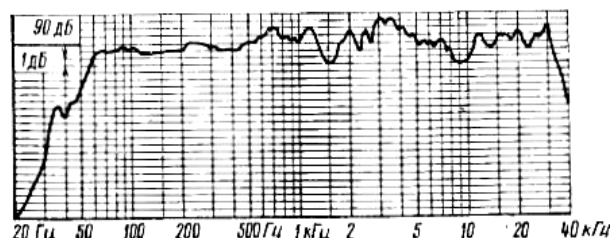


Рис. 4. АЧХ звукового давления АС

На задней стенке корпуса АС расположена крышка с установленными на ней специальными клеммами, позволяющими подключать акустические кабели большого сечения. На этой крышке смонтированы разделительные фильтры. Корпус АС отделан шпоном ценных пород дерева. Съемная декоративная рамка, предохраняющая ДГ, обтянута специальной тканью, обладающей высокой акустической прозрачностью.

#### Выводы

Разработанные малогабаритные двухполосные АС типа «акустический лабиринт» демонстрируют весьма высокие характеристики и хорошее качество звучания в своей категории. Судя по результатам измерений, частотная характеристика модуля полного сопротивления отличается высокой стабильностью во всем диапазоне воспроизводимых частот. Это значительно упрощает подбор усилителя низкой частоты. АС успешно работали с транзисторными и ламповыми усилителями, в том числе с одноктактными, работающими в классе А и обладающими невысокой выходной мощностью (5-6 Вт). АЧХ разработанных АС обладает неплохой равномерностью, можно отметить незначительные увеличения неравномерности ( $\pm 4 \text{ дБ}$ ) на частотах выше полутора килогерц. Дальнейшая работа по подбору ВЧ-излучателя, выбора частоты раздела и порядков разделительных фильтров позволит улучшить АЧХ в этой частотной области.

Сравнительный анализ характеристик и тестового прослушивания промышленных напольных трехполосных АС с диаметром НЧ ДГ 20-25 см и объемом 50-60 дм<sup>3</sup> (соответственно другой ценовой категории) с разработанными АС показывает конкурентоспособность последних. Таким образом, АС на основе акустического лабиринта являются весьма перспективными.

## Литература

1. Бадаев, А.С. Акустическая трансмиссионная линия / А.С. Бадаев // Проектирование радиоэлектронных и лазерных устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ГОУ ВПО « Воронежский государственный технический университет», 2007. – С. 139–145.
2. Алдошина, И.А. Справочник / И.А. Алдошина, К.К. Никитин // Аудиомагазин. 1999. №4. С. 135-138.
3. Электроакустика и звуковое вещание: учеб. пособие для вузов / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов и др.; под ред. Ю.А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком, Радио и связь, 2007.-872с.
4. Бадаев, А.С. Разделительные фильтры для высококачественной двухполосной акустической системы / А.С. Бадаев // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 2006. С. 268-273.
5. Бадаев, А.С. Высококачественная рупорная акустическая система / А.С. Бадаев, Д.В. Гукин// Проектирование радиоэлектронных и лазерных устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011.- С.70-88.

Воронежский государственный технический университет

## COMPACT ACOUSTIC SYSTEMS ON THE BASIS OF ACOUSTIC LABYRINTH

**A.S. Badaev**

PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [faddey52@mail.ru](mailto:faddey52@mail.ru)

An original method for calculating an acoustic transmission line (acoustic labyrinth) is proposed, based on the method of electromechanical analogies and the representation of a transmission line in the form of its electrical analogue - a long line with an arbitrary load. It is shown that the optimal length of a transmission line is equal to a quarter of the wavelength radiated by the dynamic speaker at the frequency of its resonance in air, and the cross-sectional area is the effective area of the loudspeaker diaphragm. In this case, the input resistance of the transmission line is maximal and has a purely active character, like a parallel oscillatory circuit tuned to resonance. At this frequency, the output of the acoustic labyrinth emits energy intensively into the surrounding space, while the amplitude of the oscillations of the loudspeaker diaphragm is minimal, so that the distortions in the low-frequency range are significantly reduced. Unwanted resonances at frequencies above the main resonance are suppressed by sound absorbing material on the inner walls of the labyrinth. The design of double-band compact acoustic systems in the form of "acoustic labyrinth" with an increased level of characteristic sensitivity, calculated by the proposed method is presented. Their main parameters and characteristics are given. The design uses first-order separation filters in the low- and mid-frequency ranges and third-order in the high-frequency range, the separation frequency is 2.4 kHz. The analysis of the measurement results shows a high stability of the frequency dependence of the impedance module over the entire range of reproduced frequencies, which simplifies greatly the selection of the low-frequency amplifier. The frequency response of the developed acoustic systems has good uniformity; a slight increase in the unevenness ( $\pm 4$  dB) at frequencies above 1.5 kHz is noted. Further work on selecting a high-frequency radiator, selecting the frequency of separation and the order of the separation filters will allow to improve the frequency response in this frequency range

Key words: acoustic systems, transmission lines, acoustic labyrinth

## References

1. Badaev A.S. "Acoustic transmission line", *Designing of radio-electronic and laser devices and systems: intercollegiate collection of scientific works (Proektirovanie radioelektronnykh i lazernykh ustroystv i sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, VSTU, 2007, pp. 139-145.
2. Aldoshina I.A., Nikitin K.K. "Reference book", Audio shop (Audiomagazin), 1999, no.4, pp. 135-138.
3. Aldoshina I.A., Vologdin E.I., Efimov A.P. "Electroacoustics and sound broadcasting. Manual" ("Elektroakustika i zvukovoe veshchaniye: ucheb. posobie dlya vuzov"), Moscow, Hot Line - Telecom, Radio and communication (Goryachaya liniya – Telekom, Radio i svyaz'), 2007, 872 p.
4. Badaev A.S. "Separating filters for high-quality double-band acoustic system", *Problems of ensuring reliability and quality of devices and systems: intercollegiate collection of scientific works (Problemy obespecheniya nadezhnosti i kachestva priborov ustroystv i sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, VSTU, 2006, pp. 268-273.
5. Badaev A.S., Gukin D.V. "High-quality horn acoustic system", *Designing of radio-electronic and laser devices and systems: intercollegiate collection of scientific works (Proektirovanie radioelektronnykh i lazernykh ustroystv i sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, VSTU, 2011, pp.70-88.

## РАЗРАБОТКА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССИВНОЙ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ

А.Б. Антиликаторов, С.А. Антипов, Р.А. Дуров

Пеленгаторные устройства имеют ряд требований, таких как дальность действия, помехоустойчивость, надежность, экономичность, но самыми важными и проблемными требованиями являются высокая точность приема сигнала и чувствительность. Точность и чувствительность пеленгования в большей степени определяют технические возможности пеленгаторной аппаратуры. Эти два параметра взаимосвязаны, чем выше чувствительность пеленгатора, тем выше точность пеленга.

Для повышения точности пеленгования предлагается использовать в комплексе пассивную приемную антенну, обладающую высокими параметрами по чувствительности, линейности и динамическому диапазону. Кроме того, применение такой антенны обеспечивает направленный радиоприем от источника радиоизлучения.

В статье представлена разработка приемной антенны, входящей в состав пеленгаторной системы. Проведено моделирование исследуемой антенны. В ходе расчетов осуществлялось изменение рабочих частот и рассматривались показатели эффективности самой антенны, такие как активная и реактивная составляющие входного сопротивления антенны

Ключевые слова: пеленгаторная система, конструкция антенны, фидер, импеданс антенны

### Введение

Пеленгаторные устройства имеют ряд требований, таких как дальность действия, помехоустойчивость, надежность, экономичность, но самыми важными и проблемными требованиями являются высокая точность приема сигнала и чувствительность.

Для повышения точности пеленгования предлагается использовать в комплексе пассивную приемную антенну, исследование эффективности которой на разных частотах необходимо провести. Кроме того, применение такой системы обеспечивает направленный радиоприем от источника радиоизлучения

### Постановка задачи

При разработке пассивной приемной антенны входящей в состав пеленгаторной системы (ПАПМ), необходимо исходить из следующих требований:

- антенна должна иметь малые габариты и вес;
- иметь как можно меньше пристыковываемых деталей;
- быстро и просто устанавливаться в рабочее состояние.

На основании выдвинутых требований для повышения мобильности, антенну желательно транспортировать прикрепленной снаружи кузова, а фидера размещать на катушках внутри кузова.

Такое конструктивное решение позволяет при развертывании антенной системы осуществлять подключение фидера, вытаскивая его из катушки.

Конструктивно антенна состоит из:

- стойки, высотой 1,2 м с тремя опорными точками, которые обеспечивают крепление к грунту;
- согласующего устройства, являющегося идентичным для всех антенных элементов антенно-фидерной системы;
- разъемного вибратора длиной 4 м;
- защитного кабельного дросселя, устанавливаемого в 4,5 м от антенны [1].

Предложенный вариант можно реализовать, используя конструкцию, приведенную на рис. 1.

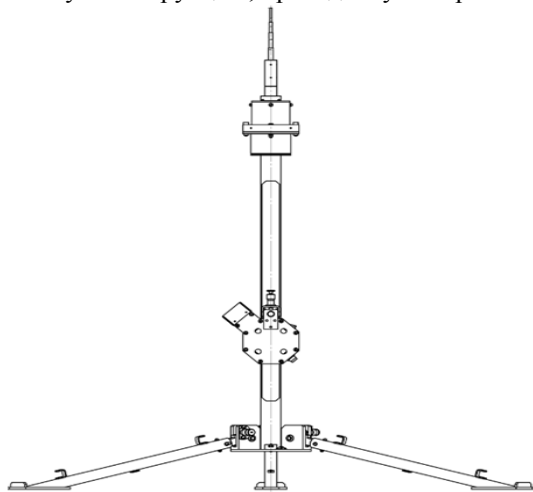


Рис. 1. Конструктивное исполнение антенны

На следующем этапе разработки было проведено моделирование предлагаемой антенны с использованием программы «ММАНА».

В ходе расчетов осуществлялось изменение рабочих частот и рассматривались показатели эффективности самой антенны, такие как активная и реактивная составляющие входного сопротивления антенны.

Результаты макетирования приведены на графике (рис. 2).

Антиликаторов Александр Борисович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: antilikatorov63@mail.ru  
 Антипов Сергей Анатольевич – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: antp54@mail.ru  
 Дуров Роман Александрович – ВГТУ, студент, e-mail: roman.durov@mail.ru

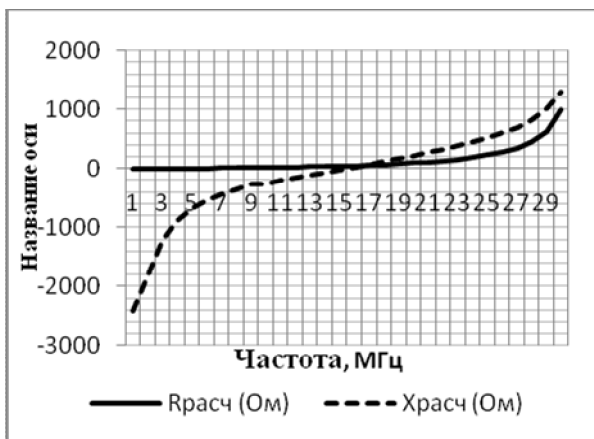


Рис. 2. Импеданс антенны ПАПМ-штырь

Для экспериментальной проверки варианта антенны в полевых условиях был изготовлен макет антенны ПАПМ-штырь.

Для измерения эффективности антенны-макета использовались:

- измерительная антенна FMA11;
- селективный милливольтметр SMV11;
- выносной излучатель сигналов ДГС-2 [2].

В ходе эксперимента выносной излучатель устанавливался на расстоянии 150-170 м от антенны макета. В 7-8 м от нее устанавливалась измерительная антенна, как показано на рис. 3.

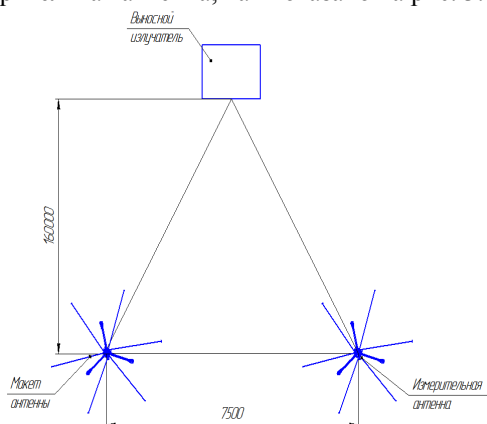


Рис. 3. Расстановка оборудования в ходе эксперимента

Сигнал выносного излучателя принимался измеряемой антенной и определялся его уровень  $U_a$  (дБ·мкВ) [3].

После этого, измерительной антенной определялось напряженность электрической составляющей электромагнитного поля излучателя  $E_{II}$  (дБ·мкВ/м) в месте расположения измеряемой антенны. Полученные исходные данные позволяют рассчитать эффективность антенны по формуле (1):

$$P_{эфф} = U_a - E_{II} \quad (1)$$

Учитывая, что расчетное значение эффективности получалось в дБ, для его перевода в метры использовалось выражение (2) [4]:

$$P_{эфф} = 10 P_{эфф}/20 \quad (2)$$

На рис. 4 приведен график изменения эффективности антенны ПАПМ-штырь по результатам эксперимента расчетов и измерений в диапазоне частот.

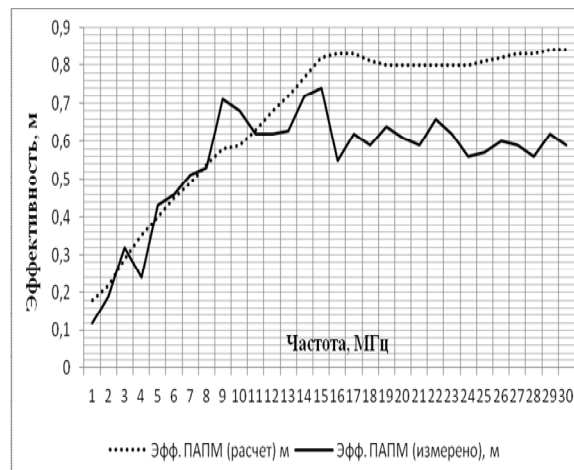


Рис. 4. Эффективность антенны ПАПМ-штырь расчетная и измеренная

Ввиду малой эффективности антенны ПАПМ-штырь на нижних частотах была предпринята попытка ее модернизации без значительного увеличения высоты. Поэтому было принято решение расположить в верхней части антенны «зонтик» - 3 дополнительных вибратора по 0,8 м каждый.

По приведенной выше методике был исследован вариант антенны с «зонтиком» на верхней части вибратора. Результаты расчета эффективности приведены на рис. 5, где видно, что показатели эффективности на нижних частотах возросли [5].

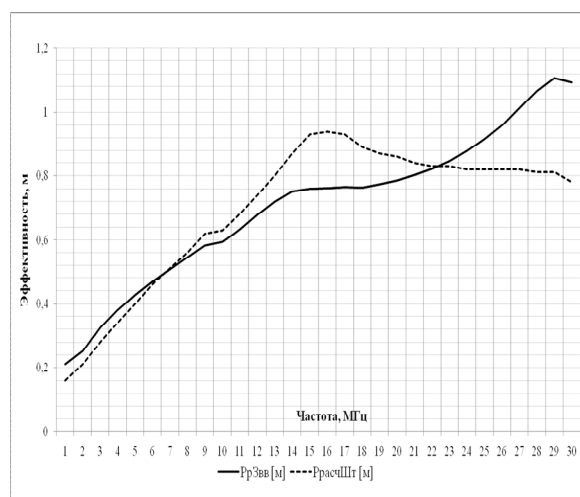


Рис. 5. Эффективности ПАПМ с «зонтиком» сверху



### Заключение

В ходе проведенного макетирования и экспериментального расчета можно сделать следующие выводы:

-расчет и измерения практически совпадают с точностью до КПД согласующе-симметрирующего устройства;

-аномальные отклонения эффективности измеренной на частотах 3, 4, 9, 14 и 15 МГц объясняются наличием отражений сигнала от местных переизлучателей.

В заключение можно сказать, что графики эффективности исследуемой антенны практически совпадают, что при расчете, что при макетировании. Следовательно, отпадает необходимость макетирования других вариантов антенн, и использовать в пеленгаторной системе предлагаемую модель антенны.

### Литература

1. Распространение радиоволн и антенны: метод. пособие/ под общ. Ред. доц. П.В. Стефаненко. - Донецк: Военная кафедра ДонГТУ, 1998.-36 с.
2. Гончаренко И.В. Антенны КВ и УКВ. Ч. 1: Компьютерное моделирование MMANA/ И.В. Гончаренко. 2004.-128 с.
3. Зырянов Ю.А. Антенны: учеб. пособие / Ю.А. Зырянов, П.А. Федюнин, О.И. Белоусов. 2016.-416 с.
4. Григоров И.Н. Антенны. Настройка и согласование/ И.Н. Григоров. 2015.-217 с.
5. Инденбом М.В. Антенные решетки подвижных обзорных РЛС. Теория, расчет, конструкции/ М.В. Инденбом. 2015.-416 с.

Воронежский государственный технический университет

## PASSIVE RECEIVING ANTENNA DEVELOPMENT AND EFFECTIVENESS

**A.B. Antilikatorov<sup>1</sup>, C.A. Antipov<sup>2</sup>, R.A. Durov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [antilikatorov63@mail.ru](mailto:antilikatorov63@mail.ru)

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [antp54@mail.ru](mailto:antp54@mail.ru)

<sup>3</sup>Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [roman.durov@mail.ru](mailto:roman.durov@mail.ru)

Direction finding devices have a number of requirements, such as range, noise immunity, reliability, efficiency, but the most important and problematic requirements are high accuracy of signal reception and sensitivity. Accuracy and sensitivity of direction finding predetermine technical capabilities of direction finding equipment. These two parameters are interrelated, the higher the direction finder sensitivity, the higher the bearing accuracy.

To improve the accuracy of direction finding it is proposed to use a passive receiving antenna in the complex, which has high parameters for sensitivity, linearity and dynamic range. In addition, using such an antenna provides a directional radio reception from a source of radio emission.

The article presents the development of a receiving antenna, which is part of the direction-finding system. Simulation of the antenna under study is carried out. During the calculations, the operating frequencies are changed and the efficiency indexes of the antenna itself are considered, such as the active and reactive components of the antenna input impedance

Key words: finding system, antenna design, feeder, antenna impedance

### References

1. Stefanenko P.V. "Radio wave propagation and antennas. Manual" ("Rasprostranenie radiovoln i anteny: Metodicheskoe posobie"), Donetsk, Donbass State Technical University, 1998, 36 p.
2. Goncharenko I.V. "Antennas SB and USB. Part 1. Computer simulation MMANA" ("Antenny KV i UKV. Chast' 1. Komp'yuternoe modelirovanie MMANA"), 2004, 128 p.
3. Zyryanov Yu.A., Fedyunin P.A., Belousov O.I. "Antennas: manual" ("Antenny: uchebnoe posobie"), 2016, 416 p.
4. Grigorov I.N. "Antenna. Set up and coordination" ("Antenny. Nastroyka i soglasovanie"), 2015, 217 p.
5. Indenbom M.V. "Antenna arrays of mobile surveillance radars. Theory, calculation, design" ("Antennye reshyetki podviznykh obzornykh RLS. Teoriya, raschet, konstruktsii"), 2015, 416 p.

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ СКАНИРОВАНИЯ БЛИЖНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

М.А. Ромашенко, А.А. Пряхин

Предложена методика анализа данных сканирования ближнего электромагнитного поля, используемая для обработки данных с аппаратно-программного комплекса сканирования ближнего электромагнитного поля и позволяющая обеспечить графическую интерпретацию электрической и магнитной составляющих ближнего электромагнитного поля, что облегчает поиск локальных областей, в которых возможны потенциальные проблемы в части обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости. В ходе работы выполнено создание и моделирование объекта исследования в специализируемом ПО, в качестве которого была использована модифицированная конструкция дипольной антенны на печатной плате. С использованием аппаратно-программного комплекса сканирования ближнего электромагнитного поля, анализатора спектра и разработанной ранее программы, предназначенной для работы в составе программно-аппаратного комплекса управления и сбора данных, была получена информация для обработки. Сведения о напряженности электромагнитного поля в ближней зоне излучения тестируемого устройства обработаны с помощью предложенной методики и построены градиентные карты распределения электрической и магнитной составляющих ближнего электромагнитного поля. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования распределения ближнего электромагнитного поля и данных натурального эксперимента, подтверждающее адекватность предложенной методики

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, ближнее электромагнитное поле, сканер ближнего электромагнитного поля

Необходимость использования электронных средств и все большее их внедрение в различные сферы деятельности человека ставит на высокий уровень задачу постоянного улучшения качества процесса разработки электронных изделий, начиная с постановки технического задания. Повышение качества процесса не заканчивается этапом реализации, существует необходимость учитывать возможные проблемы в области электромагнитной совместимости (ЭМС) на всех стадиях проектирования и эксплуатации электронных изделий.

Электронные устройства должны соответствовать нормам и стандартам ЭМС, для этого проводят испытания электронных приборов по параметрам электромагнитной совместимости. Испытания зачастую проводят в безэховых или «полубезэховых» камерах, что является материально затратной задачей. Это, в свою очередь, влечет за собой увеличение себестоимости готовой продукции. Таким образом, одним из перспективных походов к решению этой проблемы является сканер ближнего электромагнитного поля [1,2].

Ранее при выполнении научно-исследовательских работ по разработке сканера ближнего электромагнитного поля, был сформулирован набор задач для дальнейшей

проработки данной тематики. Разработка относится к измерительной аппаратуре, представляет собой систему, которая включает: сканирующую подсистему, анализатор спектра и персональный компьютер. При помощи специализированного программного обеспечения и алгоритмов обработки данных сканер может визуализировать информацию о электрической и магнитной составляющих поля и представить ее в упрощенном виде инженерам. В ходе выполнения работы была разработана программа управления, но вопрос обработки данных остался открытым [3].

Предлагаемая методика анализа данных сканирования ближнего электромагнитного поля, представленная на рис. 1.

В начале испытания выполняется замер электромагнитных помех, на этом этапе определяется пригодность лабораторных условий для дальнейшего проведения испытания. Необходимым и достаточным действием является замер в 9 точках при тройной смене ортогональных составляющих X, Y, и Z, как для магнитной, так и для электрической составляющих ближнего электромагнитного поля. Далее устанавливается тестируемое устройство и фиксируется его начальное положение. В зависимости от этого положения задаются начальные координаты в управляющую программу. Следующим действием является определение области сканирования по осям oX, oY, oZ, зависящей от размеров тестируемого устройства и требуемого полупространства.

---

Ромашенко Михаил Александрович - ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, e-mail: kivr@vorstu.ru  
Пряхин Александр Александрович – ВГТУ, магистр, e-mail: rizym@mail.ru



Далее включается питающая станция, задающая воздействие на тестируемое

устройство и управляющая им. Происходит имитация режимов работы, без подключения к

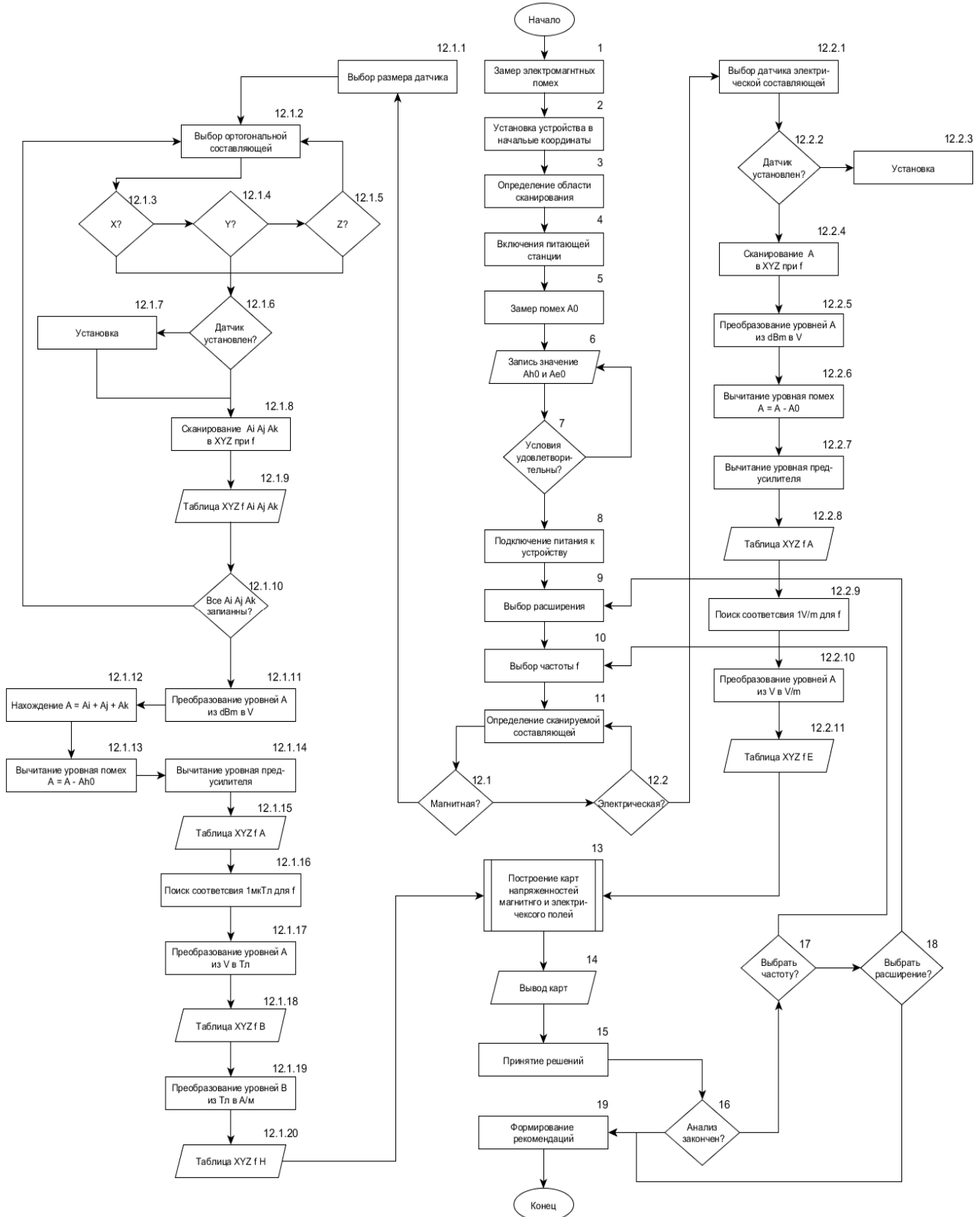


Рис. 1. Блок-схема предлагаемой методики анализа данных сканирования ближнего электромагнитного поля

тестируемому устройству. Далее производится замер электромагнитных помех для магнитной и электрической составляющих ближнего

электромагнитного поля. Рассчитывается их усредненные значения, производится запись данных в  $A_{h0}$  и  $A_{e0}$  соответственно. Если

условия для дальнейшего проведения измерения удовлетворительны, то принимается решение продолжить исследование, иначе нужно вернуться к предыдущему пункту. После необходимо подключить питающую станцию к тестируемому устройству и задать необходимые режимы. Вслед за этим выбирается расширение сканирования, этот параметр влияет на качество и время сканирования. Далее выполняется выбор частотного интервала для сканирования, если интервал не известен, то находят частоты, так называемых локальных пиков, где эмиссия от тестируемого объекта максимальна. Затем определяется сканируемая магнитная или электрическая составляющая ближнего электромагнитного поля. Если составляющая магнитная, то осуществляется переход к действию 12.1.1, если составляющая электрическая, тогда переходят к действию 12.2.1.

Выполняется операция 12.1.1 - выбор датчика магнитной составляющей ближнего электромагнитного поля, определяется согласно выбранному частотному интервалу. Выбирается ортогональная составляющая магнитного поля. Ставится тройное условие для охвата всех составляющих. Проверяется выбор ортогональной составляющей магнитного поля X или ортогональной составляющей магнитного поля Y, или ортогональной составляющей магнитного поля Z. После этого проверяется, установлен ли датчик, если нет, то производится установка датчика. Далее выполняется сканирование Ai или Aj, или Ak во всех точках, согласно выбранному расширению и области сканирования XYZ при частотном интервале f. После производится запись в таблицу Ai или Aj, или Ak соответственно для каждой точки области XYZ. Если все данные о ортогональных составляющих магнитного поля: Ai, Aj и Ak записаны, то выполняется преобразование уровней магнитной составляющей из дБм в В, если нет, то переходят к действию 12.1.2. Далее рассчитывается Ah по формуле:

$$Ah = \sqrt{Ai^2 + Aj^2 + Ak^2},$$

где Ai, Aj и Ak - ортогональные составляющие магнитного поля соответственно для оX, оY, оZ. После вычитаются уровни помех Ah = Ah - Ah0, вычитаем уровень предусилителя Ah = Ah - Ahy. Далее значения записываются в таблицу

уровней Ah соответственно для каждой точки выбранной области сканирования.

Ниже приведен пример заполнения таблицы значений Ah на высоте пробника относительно тестируемого устройства z = 10 мм. Ширина Y = 40 мм, длина X = 90 мм.

X \ Y	0	10	20	30	40
0	21,0	23,0	24,0	23,0	22,0
10	23,0	26,0	26,0	26,0	25,0
20	24,0	26,5	26,7	27,0	26,0
30	25,0	27,0	27,0	27,0	26,0
40	25,0	24,7	27,0	27,0	26,0
50	25,0	27,0	28,0	27,0	26,0
60	24,7	27,0	27,5	27,0	25,0
70	24,0	26,0	26,0	24,0	22,0
80	21,0	24,0	21,5	15,0	12,0
90	15,0	13,0	10,0	6,0	1,0

Далее выполняется поиск соответствий значению 1мкТл при частоте сканирования f для выбранного датчика. После производится преобразование уровней Ah из В в Тл. Эти данные, записываются в таблицу уровней магнитной индукции В, соответственно во всех точках, согласно выбранному расширению, области сканирования, при ранее выбранном частотном интервале. После этого осуществляется преобразование уровней В из Тл в А/м. Далее данные записываются в таблицу уровней напряжённости магнитного поля Н, выполняется переход к действию 13.

Выполняется операция 12.2.1 - выбор датчика электрической составляющей. Проверяется, установлен ли датчик, если нет, то производится установка датчика. Далее выполняются сканирование во всех точках, согласно выбранному расширению, области сканирования при частотном интервале f. После производится запись полученных данных в таблицу Ae, соответственно для каждой точки области XYZ. Выполняется преобразование уровней электрической составляющей из дБм в В. Далее вычитаются уровни помех Ae = Ae - Ae0, после вычитается уровень предусилителя Ae = Ae - Aey. Данные записываются в таблицу уровней Ae для всех точек области XYZ. Затем осуществляется поиск соответствий значению 1В/м при частоте сканирования f для выбранного датчика. Далее выполняется преобразование уровней

электрической составляющей из В в В/м. Данные записываются в таблицу уровней E для каждой точки области сканирования при частотном интервале  $f$ . Выполняется переход к действию 13. Когда получены исходные данные для построения карт напряженностей магнитного и электрического полей, строятся градиентные карты распределения, пример представлен на рис. 2.

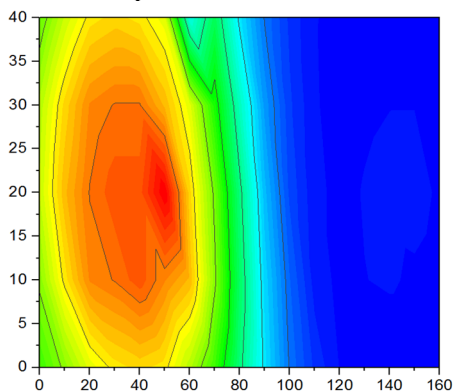


Рис. 2. Карта распределения электрической составляющей ближнего электромагнитного поля от тестируемого устройства

Далее производится вывод карт магнитной и электрической составляющих ближнего электромагнитного поля, для принятия решений. Если анализ закончен, то выполняется переход к действию 19 – формированию рекомендаций, если нет, то пользователю предлагается выбор смены частотного интервала для построения карт и расширения сканирования для регулировки параметра время/качество.

Практическое применение и оценка методики сканирования ближнего электромагнитного поля были проведены с использованием аппаратно-программного комплекса сканирования ближнего электромагнитного поля. На рис. 3 представлено сравнение реальной платы колебательного контура, модифицированного полуволнового вибратора и результатов моделирования в специализированном ПО.

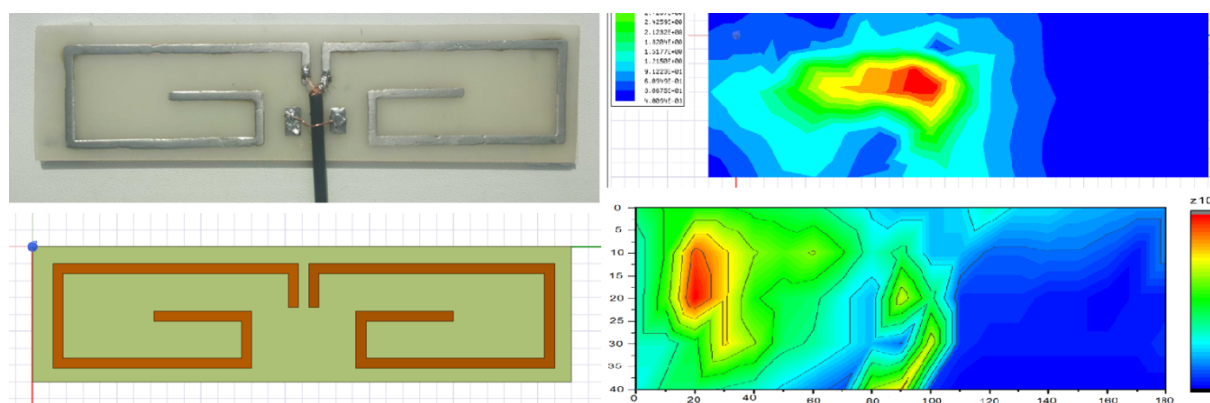


Рис. 3. Практическое применение предложенной методики

Распределение напряженностей на градиентных картах имеет общие черты как при моделировании, так и при реальном измерении. При этом необходимо учитывать факт того, что погрешность измерения вносит свои изменения в полученную картину. Исходя из увиденного, можно сделать вывод, что реальная картина ближнего электромагнитного поля отличается от результатов моделирования, влияния вносят физические различия между реальным объектом исследования и цифровой моделью. Так как плата представляла собой модифицированный полуволновой вибратор, то при моделировании возможно учитывать некоторые свойства, но, когда устройство представляет собой электронное изделие с множеством элементов и сотнями проводников,

современным программным комплексам невозможно учитывать влияния всех элементов, проводников и факторов, как внешних, так и внутренних, ввиду использования заложенных эмпирических правил.

#### Литература

1. Ромащенко, М.А. Методы оптимального проектирования конструкций радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости и помехоустойчивости: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ромащенко Михаил Александрович. - Воронеж, 2014. – 36с.
2. Макаров, О.Ю. Методы обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости и помехоустойчивости в конструкциях электронных средств / О.Ю. Макаров, А.В. Муратов, М.А. Ромащенко. –

Воронежский государственный технический университет

## METHODOLOGY FOR SCANNING DATA ANALYSIS OF NEAR ELECTROMAGNETIC FIELD

**M.A. Romashchenko<sup>1</sup>, A.A. Pryakhin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Full Doctor, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [kipr@vorstu.ru](mailto:kipr@vorstu.ru)

<sup>2</sup>MA, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [rizym@mail.ru](mailto:rizym@mail.ru)

Methodology for analyzing near-electromagnetic field scanning data is proposed, which is used to process data from a near electromagnetic field scanning hardware and software complex and allows to provide graphic interpretation of the electric and magnetic components of the near electromagnetic field, which facilitates the search for local areas in which there can be potential problems in terms of providing intra-instrument electromagnetic compatibility. In the course of the work, the creation and modeling of the object of research in specialized software was performed, which represents a modified structure of a dipole antenna on a printed circuit board. Information for processing was obtained using the hardware-software complex for scanning near electromagnetic field, the spectrum analyzer and the previously developed program designed to work as part of the hardware-software control and data acquisition complex. Information on the intensity of the electromagnetic field in the near-field radiation zone of the device under test is processed according to the proposed methodology and gradient charts of distribution of the electric and magnetic components of the near electromagnetic field are comprised. The results of computer simulation of the distribution of the near electromagnetic field and data from the full-scale experiment are compared, confirming the adequacy of the proposed methodology

Key words: electromagnetic compatibility, near electromagnetic field, near electromagnetic field scanner

### References

1. Romashchenko M.A. “Methods of optimal construction of radio electronic aids with regard to electromagnetic compatibility and interference immunity. Dr. tech. sci. diss.” (“Metody optimal'nogo proektirovaniya konstruksiy radioelektronnykh sredstv s uchetom elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti. Diss. dokt. tekhn. nauk”), Voronezh, 2014, 36 p.
2. Makarov O.U., Muratov A.V., Romashchenko M.A. “Methods of ensuring intra-instrument electromagnetic compatibility and interference immunity in electronic aids. Monograph.” (“Metody obespecheniya vnutriapparaturnoy elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti v konstruksiyakh elektronnykh sredstv. Monografiya.”), Voronezh, VSTU, 2013, 234 p.
3. “OPAC EMC Laboratory”, available at: <http://www.emc-problem.net>.

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА ЦАП НА ИСТОЧНИКАХ ТОКА

А.В. Строгонов, С.В. Жигульский, В.С. Пожидаев

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) – это устройство для преобразования цифрового кода в аналоговый сигнал. В настоящее время для приборов проводных и беспроводных широкополосных систем связи, радарных и спутниковых подсистем требуются быстродействующие и достаточно точные цифро-аналоговые преобразователи с малой нелинейностью. Для получения необходимых характеристик ЦАП проводят производственную калибровку, но калибровка весов многозарядных ЦАП на производстве не решает проблему его нелинейности, так как при дальнейшей эксплуатации происходит ухудшение его точностных характеристик. Как следствие, автоматическая калибровка стала неотъемлемой частью ЦАП, к которому предъявляются повышенные требования по быстродействию и разрешающей способности. Недостатки производственной калибровки не позволяют в современных условиях развития КМОП технологии получить ЦАП с высокой частотой преобразования и разрядностью больше 16 бит. В статье приведен способ автоматической калибровки линейности ЦАП, учитывающий недостатки существующих методов. Рассматриваемый метод основан на использовании подканальной области  $p$ -канального транзистора, выступающего в роли источника тока, в качестве второго затвора. Предложенное решение улучшает линейность ЦАП путем повышения точности источников тока при последовательном сравнении его весов

Ключевые слова: КМОП, ЦАП на источниках тока, самокалибровка, линейность

### Введение

При создании высокоточных систем сбора данных используют ЦАП с разрядностью не менее 16 бит и частотой преобразования больше 500 МГц. Изготовление такого ЦАП требует больших усилий при проектировании, поскольку современные КМОП технологии не могут обеспечить достаточную согласованность элементов. Также необходимостью введения в схему высокоточного ЦАП механизма автокалибровки служит то, что при эксплуатации происходит ухудшение её точностных параметров. Основными причинами ухудшения параметров являются эффекты старения полупроводниковой структуры и влияние космической радиации [1,2]. Большая часть литературы по автокалибровке посвящена ЦАП, построенным на основе термометрического кода. А бинарные системы рассматриваются лишь в рамках конденсаторных ЦАП. Целью данной работы является разработка метода автокалибровки бинарного ЦАП на источниках тока.

### Архитектура бинарного ЦАП

На рис. 1 показан бинарный ЦАП на двоично-взвешенных источниках тока. В транзисторной матрице ЦАП в роли источников тока выступают изолированные  $p$ -канальные транзисторы. Такое решение позволяет получить высокое выходное сопротивление у источника тока, что является необходимым условием для корректной работы ЦАП. Изоляция подложки транзистора осуществляется посредством закрытого  $p$ - $n$ -перехода  $p$ - $Si$  и  $n$ -

кармана, в котором располагается  $p$ -канальный транзистор.

Данная архитектура отличается от классического решения одним дополнительным весовым источником тока  $I_0$ , соответствующим младшему значащему разряду (МЗР). Он необходим, так как служит эталоном при сравнении с младшим весом ЦАП.

Каждый последующий вес ЦАП больше предыдущего в 2 раза. Но в процессе изготовления из-за технологических разбросов геометрических размеров и электрофизических характеристик транзисторов нарушается двоичное взвешивание токов, заложенное при проектировании. Это так же является причиной необходимости автоматической калибровки ЦАП.

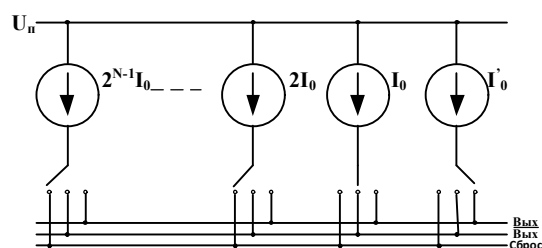


Рис. 1. Блок схема N-разрядного ЦАП на источниках тока

### Автоматическая калибровка ЦАП

Самым распространенным и простым методом калибровки является метод с использованием массивов калибровочных транзисторов для каждого веса. Но такой метод при разрядности ЦАП больше 16 требует достаточно большие площади на кристалле и усложняет аппаратную реализацию процедуры калибровки [3].

Более эффективным является техническое решение, основанное на использовании подканальной области  $p$ -канального транзистора – источника

Строгонов Андрей Владимирович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: andreistrogonov@mail.ru  
Жигульский Серафим Вячеславович – ОАО “СКТБ ЭС”, аспирант, e-mail: jiguks@yandex.ru  
Пожидаев Вадим Сергеевич – ОАО “СКТБ ЭС”, аспирант, e-mail: vadim.s.pozhidaev@gmail.com

тока. На рис. 2 представлена базовая ячейка токового ЦАП. К подложке рМОП транзистора M0 подключается выход устройства выборки и хранения (УВХ), на котором хранится корректирующее напряжение  $U_k$ . Транзисторы M1, M2 и M3 выступают в роли ключей ЦАП.

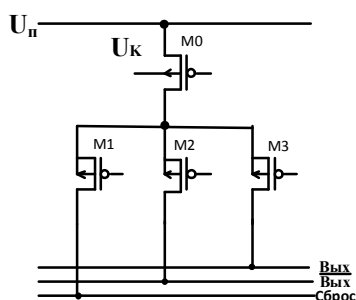


Рис. 2. Базовая ячейка токового ЦАП на рМОП транзисторах

Блок-схема предлагаемого метода представлена на рис. 3. Процедура калибровки заключается в последовательном сравнении суммы предыдущих весов ЦАП с последующим. Для этого в схему ЦАП добавлен ещё один источник тока, соответствующий МЗР.

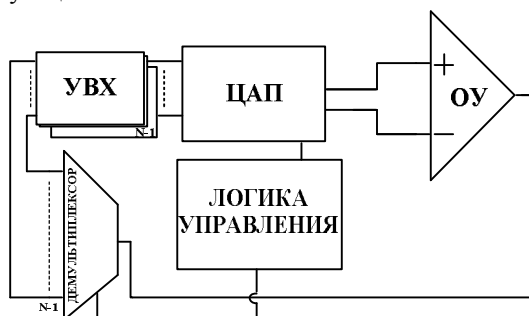


Рис. 3. Блок-схема, иллюстрирующая технику калибровки весовых токов

Для корректной работы схемы, а именно операции сравнения операционным усилителем, на выходы ЦАП включены преобразователи тока в напряжения. Первым сравниваются дополнительный вес и МЗР, далее их сумма сравнивается со вторым весом и т.д. Элементом сравнения служит операционный усилитель (ОУ), в обратной связи которого находится подложка источника тока, подключенная к выходу ОУ посредством аналогового демультиплексора. Во время сравнения аналоговый демультиплексор подключает выход ОУ к УВХ, соответствующего разряда, и в него записывает корректирующее напряжение. Перевод схемы из режима преобразования в режим калибровки и последовательного переключения весов реализуется цифровой логикой управления. Необходимо отме-

тить, что время, необходимое для подгонки любого веса, намного меньше переключения цифровой логики. Таким образом, исключается возможная ошибка, вызванная не завершённой подгонкой одного из весов. Важной задачей в предложенном методе калибровки является выбор рабочего диапазона источников тока ЦАП и операционного усилителя, принимающего решение о подгонке источника тока в ту или иную сторону. Напряжение на подложке транзистора, соответствующего дополнительному весу ЦАП, определяет начальное значение, возле которого будут варьироваться напряжения на подложке остальных весов. Его же, в свою очередь, необходимо задавать из условия линейности операционного усилителя и желаемого значения тока младшего бита.

## Выводы

Разработанный метод калибровки ЦАП позволит создавать системы цифровой обработки аналоговых сигналов с высокими показателями точности и быстродействия и предназначенным для использования в аппаратуре радио и проводной связи, систем радиолокации, систем обработки видеозаписей и т.д. Этот метод эффективнее классических решений, поскольку не требует больших площадей на кристалле и достаточно прост в реализации. Но в результате работы схемы самокалибровки появляется смещение нуля. Не смотря на то, что это смещение имеет линейный характер, оно может послужить причиной ошибки преобразования. Поэтому в калибровку ЦАП ещё необходимо включить схему коррекции смещения.

## Литература

1. Эннс В.И. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем: краткий справочник разработчика / В.И. Эннс, Ю.М. Кобзев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 454 с.
2. Rudy J. Van de Plassche CMOS Integrated Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Converters / J. Rudy // Springer. 2003. 640 p.
3. Кононов В.С. Автоматическая калибровка многоразрядных КМОП-КНИ-ЦАП на источниках тока / В.С. Кононов. Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2016. -Т.12. -№2. -С. 72.
4. Кестер, У. Аналого-цифровое преобразование: монография / У. Кестер; пер. с англ. Е.Б. Володина. – М.: Техносфера, 2007. – С.1016
5. B. Razavi. Deign of Analog CMOS Integrated Circuits / B. Razavi. Tata McGraw-Hill, Delhi, 2002. 686 p.

## AUTOMATIC CALIBRATION OF DAC IN CURRENT SOURCES

A.V. Strogonov<sup>1</sup>, S.V. Zhigul'skiy<sup>2</sup>, V.S. Pozhidaev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: andreistrogonov@mail.ru

<sup>2</sup>Graduate student, Specialized Design-Technological Bureau Of Electronic Systems, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: jguls@yandex.ru

<sup>3</sup>Graduate student, Specialized Design-Technological Bureau Of Electronic Systems, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: vadim.s.pozhidaev@gmail.com

A digital-to-analog converter (DAC) is a device for converting a digital code into an analog signal. At present, for devices of wireline and wireless broadband communication systems, radar and satellite subsystems, high-speed and sufficiently accurate digital-to-analog converters with a small nonlinearity are required. To obtain the necessary characteristics of DACs, production calibration is performed; but calibration of the weights of multi-bit DACs in production does not solve the problem of their non-linearity, since in the further operation their accuracy deteriorates. As a result, automatic calibration has become an integral part of DACs, which is subject to increased requirements for speed and resolution. Shortcomings of production calibration do not allow, in the current conditions of CMOS technology development, to obtain a DAC with a high conversion frequency and a bit capacity of more than 16 bits. The article presents a method for automatic calibration of DAC linearity, taking into account the drawbacks of existing methods. The method under consideration is based on the use of a subchannel region of a p-channel transistor acting as a current source, as a second gate finger. The proposed solution improves the linearity of DACs by increasing the accuracy of current sources with a consistent comparison of its weights

Key words: CMOS, current-steering DAC, self-calibration, linearity

### References

1. Enns V.I., Kobzev Yu.M. "Analog CMOS design. Engineer's handbook" ("Proektirovanie analogovykh KMOP-mikroskhem: kratkiy spravochnik razrabotchika"), Moscow, Hotline – Telecom (Goryachaya liniya – Telekom), 2005, 454 p.
2. Rudy J. van de Plassche "CMOS integrated analog-to-digital and digital-to-analog converters", Springer, 2003, 640 p.
3. Kononov V.S. "Automatic calibration of multi-bit CMOS-SOI-DAC in current sources", Voronezh, *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2016, vol.12, no.2, pp. 72.
4. Kester W. "Analog digital conversion" (Rus. ed. Volodina E.B. "Analogo-tsifrovoye preobrazovanie", Moscow, Tekhnosfera, 2007, 1016 p.)
5. Razavi B. "Design of analog CMOS integrated circuits", Tata McGraw-Hill, Delhi, 2002, 686 p.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ SPICE-МОДЕЛЕЙ РЕЗИСТОРНЫХ БЛОКОВ Б19К С ПОЗИЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

Д.В. Озеркин, С.А. Русановский, В.О. Бондаренко

Развитие и совершенствование методов разработки и моделирования бортовой космической радиоаппаратуры требует от существующей номенклатуры электрорадиоизделий представления их в качестве электронных моделей или SPICE-моделей. В номенклатуре электрорадиоизделий, разрешенных к применению в бортовой космической радиоаппаратуре, достаточно распространены резисторные блоки с планарными выводами семейства Б19К. В статье рассмотрены вопросы автоматизации процесса по формированию SPICE-моделей резисторных блоков Б19К. Показано, что семейство резисторных блоков Б19К отличается не только разнообразием электрических схем, но и индивидуальным характером температурных зависимостей сопротивлений резистивных элементов. Приводятся объяснения со ссылками на предшествующие исследования, поясняющие причины негативного влияния на стабильность параметров резисторных блоков. Эти причины приводят к множеству конкретных реализаций SPICE-моделей. Авторами предложена методология создания SPICE-моделей резисторных блоков, основанная на группировке температурных зависимостей по критерию сходственности и подобия. Для генерации SPICE-моделей резисторных блоков авторами разработана программа «Б19К», реализованная на скриптовом языке высокого уровня TCL/Tk. Механизм TCL/Tk Scripting дает неограниченные возможности для взаимодействия как с пользовательским интерфейсом схемного редактора OrCAD Capture, так и с базой данных проектов в OrCAD. Проведен тестовый сравнительный анализ «прототип-модель» на примере одного из образцов резисторного блока Б19К

Ключевые слова: температурная стабильность, температурный коэффициент сопротивления, резисторный блок, SPICE модель, OrCAD

**Введение.** Толсто пленочные резисторы являются основными компонентами, используемыми в гибридной схемотехнологии. Одна из важных характеристик толсто пленочного резистора – температурный коэффициент сопротивления (ТКС). ТКС зависит, прежде всего, от особенностей микроструктуры резистора и от механизма переноса заряда. В свою очередь известно [1], что микроструктура толсто пленочного резистора есть функция параметров материалов (объемная доля, размер проводящих и диэлектрических частиц) и условий обработки (время, температура обжига и др.). Сложность микроструктуры толсто пленочных резисторов и многообразие их конструктивно-технологического воплощения приводят к необходимости комплексных теоретических и экспериментальных исследований.

В отечественной и зарубежной печати существуют многочисленные научные исследования, посвященные моделированию толсто пленочных резистивных структур. Так, в отечественном диссертационном исследовании Ю.Н. Антонова [2] разработана методология и системы математического моделирования и проектирования лазерной подгонки резистивных элементов для настройки механизма регулирования для технологического процесса изготовления гибридных интегральных схем. В американском диссертационном исследовании (S. Vasudevan) были изучены механизмы переноса носителей заряда в толсто пленочных структурах [1]. В частно-

сти, автор исследовал влияние размеров частиц рутениевой пасты на температурную стабильность сопротивления резистивных элементов.

Помимо диссертационных исследований вопросы моделирования физико-технологических процессов, происходящих в толсто пленочных резисторах, затрагивались также в монографиях и статьях. В статье А.К.Караева [3] проведен расчет температурного поля в зоне непосредственного контакта частиц проводящей фазы при отсутствии тонкого диэлектрического слоя между контактирующими частицами проводящей фазы в толсто пленочных резисторах для разных режимов движения электронов в контактной области. Технологические вопросы разработки толсто пленочных резистивных структур затронуты в работах К.И. Домкина и В.Г. Недорезова [4], В.В. Кондрашова и О.С. Середина [5], А. Dziejic [6]. Параметрическая оптимизация топологии толсто пленочных резисторов с точки зрения нормального теплового режима отражена в работе С.Н.Григорьева [7]. Альтернатива параметрическому моделированию в виде метода «искусственной нейронной сети» предложена в работе авторов В.Г. Hoskins и М.Р. Haskard [8].

Отдельное направление в исследовании толсто пленочных структур – стабильное функционирование резисторов в СВЧ диапазоне. Так, в работе М.Г. Рубановича и В.А. Хрусталева [9] предложен декомпозиционный метод моделирования электромагнитных процессов в планарных пленочных резисторах. Конечно-элементное моделирование тепловых полей в СВЧ-резисторах, выполненных по пленочной технологии рассмотрено в работе авторов М.Э. Рояк, Ю.Г. Соловейчик, В.П. Разинкин [10].

В номенклатуре ЭРИ, разрешенных к применению в бортовой космической радиоаппаратуре, достаточно распространены резисторные блоки с

Озеркин Денис Витальевич – ТУСУР, канд. техн. наук, доцент, e-mail: ozerkin.denis@yandex.ru

Русановский Сергей Александрович – АО «НПЦ «Полюс», канд. техн. наук, генеральный директор, e-mail: rusa10@yandex.ru

Бондаренко Виталий Олегович – ТУСУР, студент, e-mail: vip.sva1996@mail.ru



планарными выводами семейства Б19К (рис. 1). Блоки Б19К мощностью рассеяния до 1 Вт предназначены для работы в электрических цепях постоянного, переменного токов и в импульсных режимах. В зависимости от конструкции и электрической принципиальной схемы блоки изготавливают одного типа, трех видов и тридцати четырех вариантов [11].

В отечественной печати уделяется достаточное внимание исследованию резисторных блоков Б19. Так, например, в работе [12] рассмотрены вопросы влияния различных видов подгонки величины сопротивления и последующих технологических операций на стабильность сопротивления толстопленочных резистивных блоков типа Б19М. Приводятся сведения о том, что изготовление резисторных блоков включает в себя 34 технологические операции: начиная от очистки подложки и заканчивая выходным контролем ОТК. Авторы в своем экспериментальном исследовании показывают, что такие высо-

котемпературные технологические операции как лужение плат (245-265 °С) и припайка решетки (420-440 °С) негативно влияют на стабильность параметров резисторных блоков. В частности, имеет место существенный дрейф сопротивления.

Настоящим коллективом авторов в [13] были продолжены экспериментальные исследования, начатые группой В.Н.Леухина в [12]. На примере шести образцов резисторных блоков Б19К показано (рис. 2), что каждый экземпляр имеет свой индивидуальный «почерк» температурной зависимости сопротивления. В пределах одного резисторного блока можно наблюдать: зависимости с отрицательными трендами (рис. 2, в), зависимости с положительными трендами (рис. 2, б, з, д, е), разнонаправленные тренды (рис. 2, а).

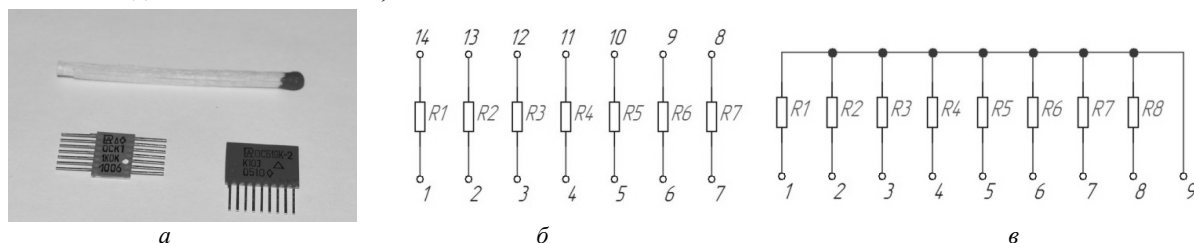


Рис. 1. Резисторные сборки с планарными выводами семейства Б19К конструктивное исполнение – а; электрическая схема Б19К1-1-1 кОм – б; электрическая схема Б19К2-100 Ом – в

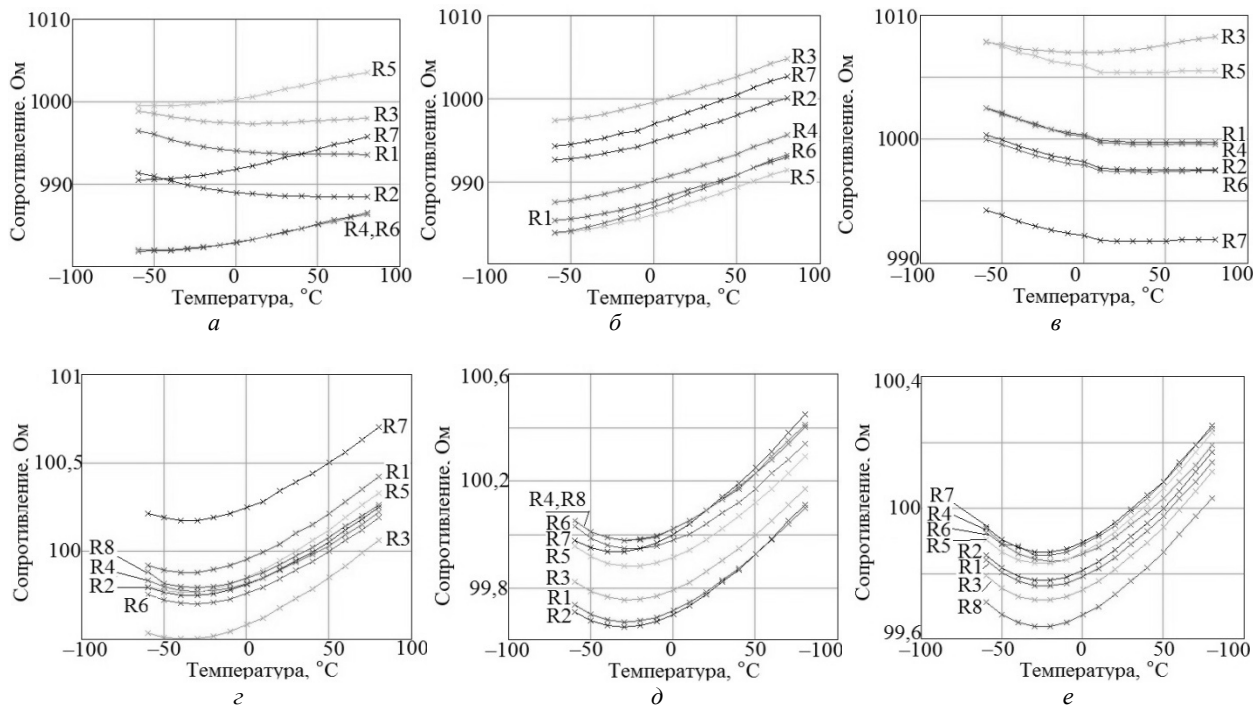


Рис. 2. Зависимость температурного коэффициента сопротивления сборок Б19К образец 1 – а; образец 2 – б; образец 3 – в (все три Б19К1-1-1 кОм); образец 4 – г; образец 5 – д; образец 6 – е (все три Б19К2-100 Ом)

Таким образом, наличие в семействе резисторных блоков Б19К тридцати четырех вариантов исполнения приводит к множеству математических

моделей с точки зрения температурной стабильности. Конкретная реализация математической модели резисторного блока будет зависеть от схемы включе-

ния, номинала сопротивления резистивных элементов, погрешности сопротивления, температурных коэффициентов сопротивления (рис. 3).

**Постановка задачи.** Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать цель настоящей работы – сокращение материальных и временных ресурсов при создании математических моделей резисторных блоков Б19К за счет автоматизированного формирования описания по исходным данным. Для достиже-

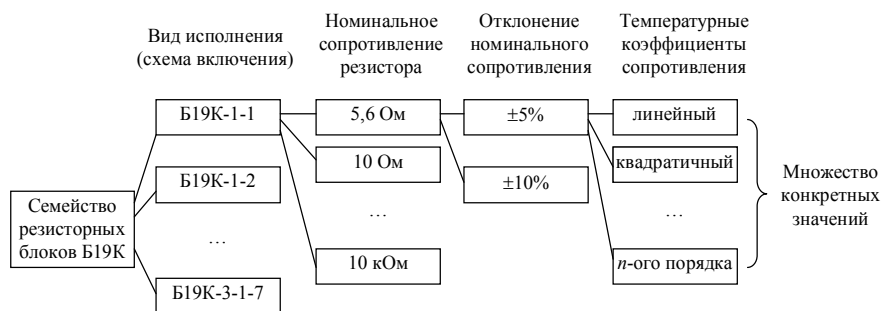


Рис. 3. Структурное ветвление семейства резисторных блоков Б19К в зависимости от исходных данных

В области автоматизации схемотехнического проектирования наибольшее распространение получили варианты программы SPICE [14], поддерживаемые многими известными производителями программного и аппаратного обеспечения. В настоящее время программа SPICE стала индустриальным стандартом симуляции электрических схем. Одна из наиболее выдающихся коммерческих версий SPICE является вариант PSPICE, правообладателем которой является Cadence Design Systems [15]. Наличие академической лицензии Cadence Allegro / OrCAD в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) послужило предпосылкой для выбора программной среды поддержки формата SPICE.

Формат SPICE предполагает базовое представление резистора в виде [16]:

$Rxxx <узел1> <узел2> [имя модели] <значение>$ ,

где  $xxx$  – произвольная алфавитно-цифровая последовательность общей длиной не более 7 символов, которая пишется слитно с символом R и вместе с ним образует имя компонента;  $узел1, узел2$  – номера узлов подключения к электрической цепи;  $имя модели$  – имя математической модели в формате SPICE;  $значение$  – номинальное значение сопротивления;

Непосредственная математическая модель резистора в формате SPICE выглядит как:

$.MODEL <имя модели> RES (R=<значение> + DEV=<значение>\% TC1=<значение> + TC2=<значение>),$

где  $.MODEL$  – директива описания математической модели; RES – признак математической модели резистора; R – масштабный коэффициент; DEV – коррелированный технологический разброс номинала сопротивления; TC1, TC2 – линейный и квадратичный температурные коэффициенты сопротивления.

Кроме указанных параметров формат SPICE допускает также указание для математической модели резистора масштабного коэффициента спектраль-

ной сформулированной цели необходимо решить следующие задачи:

- выбор формата представления математических моделей резисторных блоков Б19К и средств его поддержки;
- разработка средства автоматизации для формирования моделей;
- тестовый сравнительный анализ «прототип-модель» на примере конкретного образца резисторного блока.

ной плотности шума, экспоненциального температурного коэффициента сопротивления, некоррелированного технологического разброса номинала сопротивления, различных видов температуры прототипа [16].

Произвольное количество одиночных резисторов можно объединить в функциональную группу и получить описание макромодели резисторного блока с помощью парных директив  $.SUBCKT... .ENDS$ :

$.SUBCKT <имя макромодели> <узлы подключения> Rxxx <узел1> <узел2> [имя модели] <значение> ...$

$Rzzz <узел(n-1)> <узелn> [имя модели] <значение>$

$.MODEL <имя модели> RES (R=<значение>$

$+ DEV=<значение>\% TC1=<значение>$

$+ TC2=<значение>$

$.ENDS$

Следовательно, задача формирования SPICE-модели резисторного блока Б19К с позиции температурной стабильности заключается в создании текстового описания удовлетворяющего условиям:

1. Топологически верная схема соединения резисторов внутри блока;
2. Параметры математической модели R, DEV, TC1, TC2 соответствуют физическим параметрам конкретного образца резисторного блока.

Утилита PSpice Model Editor, входящая в состав программного комплекса Cadence OrCAD, по физическим параметрам рассчитывает параметры математических моделей 11 видов ЭПИ [15]. Однако среди этого перечня типов математических моделей возможность создания резистора или резисторного блока отсутствует.

Современные версии Cadence OrCAD позволяют конечному пользователю решить отмеченную проблему с помощью встроенного в программный комплекс языка программирования скриптов (макросов) TCL/Tk Scripting [17]. Механизм TCL/Tk Scripting дает неограниченные возможности для взаимодействия как с пользовательским интерфейсом

схемного редактора Capture, так и с базой данных проекта (рис. 4). Новые функциональные возможности позволяют пользователям выполнять команды TCL/Tk, а также настраиваемые сценарии через окно командной строки или через экранные формы. Основные функциональные возможности TCL/Tk включают процедуры и команды для манипулирова-

ния данными, управляющие конструкции, математические выражения, подпрограммы ввода-вывода, системные вызовы, обработку реестра, проектирование экранных форм и многое другое.

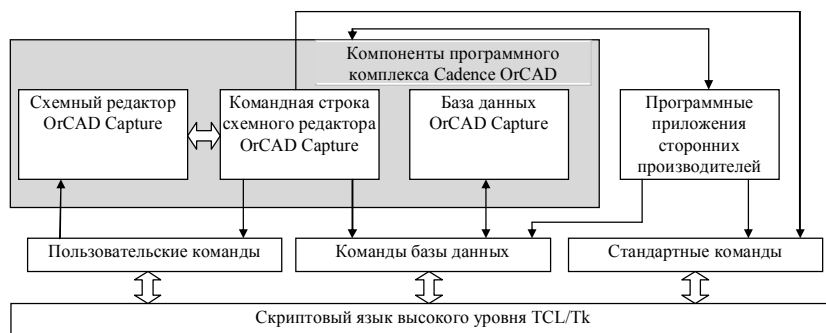


Рис. 4. Механизм среды программирования TCL/Tk Scripting

В работе [13] нами была предложена методология создания SPICE-моделей резисторных блоков, основанная на следующих основных этапах:

1. Экспериментальное исследование температурной зависимости сопротивления каждого резистивного элемента резисторного блока.
2. Группировка температурных зависимостей по критерию сходственности и подобия.
3. Усреднение группированных температурных зависимостей.
4. Установление линейных и нелинейных ТКС.

Суть методологии. Представим ТКС первого резистивного элемента  $i$ -ого образца как функцию от температуры в виде  $y_{i1} = f(T)$ . Из экспериментальных зависимостей следует (рис. 2, б-е), что ТКС всех резистивных элементов  $i$ -ого образца будут:

$$\begin{cases} y_{i1} = f(T); \\ y_{i2} = f(T) + a_2; \\ y_{i3} = f(T) + a_3; \\ \dots \\ y_{in} = f(T) + a_n; \end{cases}$$

где  $n$  – количество резистивных элементов в образце;  $a$  – коэффициент параллельного переноса.

Следовательно, достаточно найти параметры нелинейности только для одной функции  $f(T)$  в пределах каждого резисторного блока, а коэффициент  $a$  определять технологическим разбросом сопротивления DEV относительно номинального значения. Аналогично можно поступить с образцом, имеющим разнонаправленные тренды ТКС (рис. 2, а), если независимо рассматривать две группы ТКС – с отрицательным и с положительным трендом.

**Решение задачи.** Предложенная нами методология послужила основанием для автоматизации процесса формирования SPICE-моделей резисторных блоков Б19К (рис. 5).

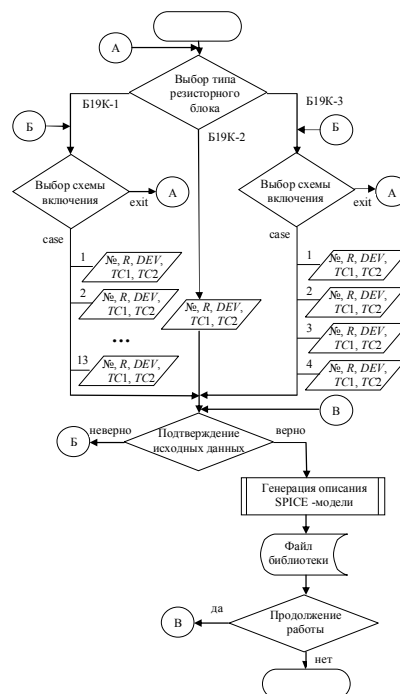


Рис. 5. Блок-схема автоматизированного процесса по формированию SPICE-моделей резисторных блоков семейства Б19К

Начало процесса предполагает выбор типа резисторного блока среди трех возможных подмножеств: Б19К-1; Б19К-2; Б19К-3. Каждое подмножество имеет различное число вариантов электрических схем включения резистивных элементов:

- 13 вариантов для Б19К-1;
- 1 вариант для Б19К-2;
- 4 варианта для Б19К-3.

После выбора схемы включения происходит переход к вводу параметров математической модели:

- порядковый номер SPICE-модели резисторного блока №;
- номинальное сопротивление резистивных элементов  $R$ ;
- коррелированный технологический разброс номинала сопротивления  $DEV$ ;

- линейный температурный коэффициент сопротивления  $TC1$ ;
- квадратичный температурный коэффициент сопротивления  $TC2$ .

После подтверждения исходных данных происходит автоматическая генерация SPICE-модели резисторного блока. Текстовое описание формируется в виде файла библиотеки. Для удобства использования предусматриваются три точки возврата: А, Б, В.

Автоматизированный процесс на рис. 5 по формированию SPICE-моделей резисторных блоков реализован на скриптовом языке высокого уровня TCL/Tk в виде программы «Б19К». Работа с программой состоит во взаимодействии пользователя с тремя экранными формами. На главной экранной форме (рис. 6а) три графических кнопки выбора, представляющие собой изображение типов резисторных блоков семейства Б19К. Нажатие на графическую кнопку приводит к появлению второй экранной формы (рис. 6б), в которой происходит конкретизация электрической схемы включения контекстно для выбранного типа блока. Каждое изображение электрической схемы также представляет собой графическую кнопку. Выбор электрической схемы приводит к появлению третьей экранной формы (рис. 6в) – диалоговому окну для ввода параметров математической модели. Конечным результатом работы является генерация файла библиотеки \*.lib с текстовым описанием SPICE-модели резисторного блока. Описание соответствует предварительно выбранной электрической схеме и содержит введенные параметры математической модели. Полученный файл библиотеки \*.lib можно использовать с любым SPICE-подобным симулятором электронных схем.

Тестовый сравнительный анализ «прототип-модель» проведен на примере образца №6 (рис. 2е) резисторного блока Б19К2-100 Ом. Согласно предложенной методологии [13] экспериментальные значения температурной зависимости сопротивления резистивных элементов образца преобразованы в усредненный эквивалент (рис. 7).

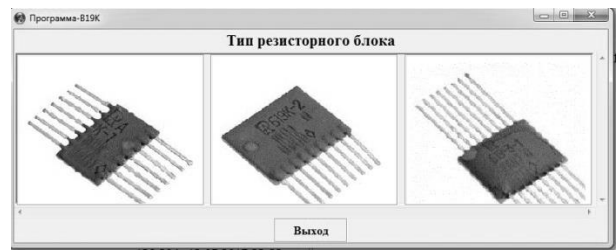
Аппроксимация усредненной температурной зависимости полиномом второго порядка приводит к уравнению:

$$R(T) = b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2 = 99,821 + 1,72 \cdot 10^{-3} \cdot T + 3,55 \cdot 10^{-5} \cdot T^2.$$

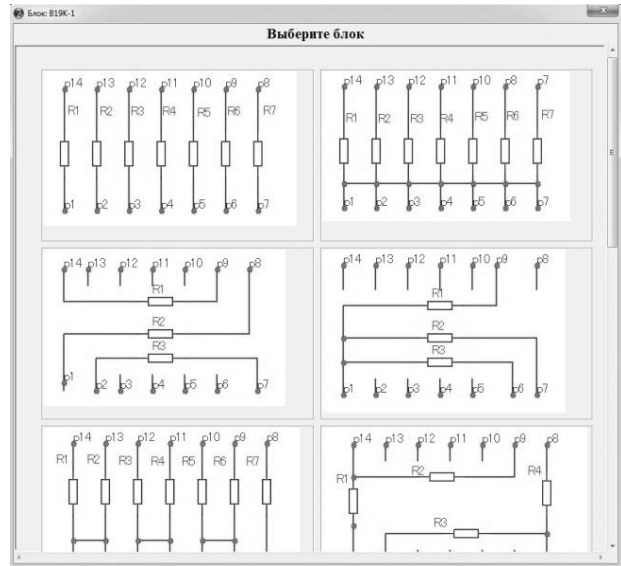
Для соответствия с форматом представления SPICE-модели резистора линейный и квадратичный температурные коэффициенты сопротивления  $TC1$  и  $TC2$  вычисляются в относительном виде:

$$TC1 = \frac{b_1}{b_0} = \frac{1,72 \cdot 10^{-3}}{99,821} = 17,229 \cdot 10^{-6} C^{-1};$$

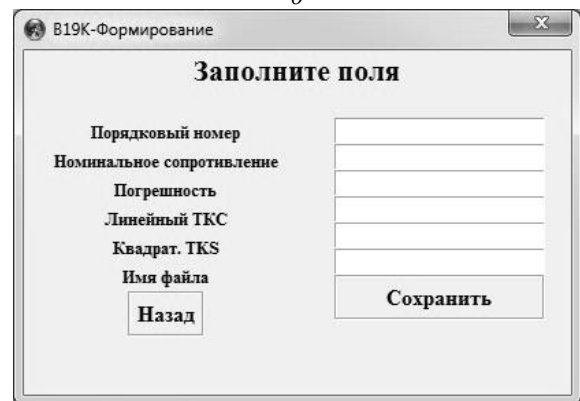
$$TC2 = \frac{b_2}{b_0} = \frac{3,55 \cdot 10^{-5}}{99,821} = 355,591 \cdot 10^{-9} C^{-1}.$$



а



б



в

Рис. 6. Экранные формы программы «Б19К»  
главная экранная форма – а;  
экранная форма выбора схемы включения – б;  
экранная форма ввода исходных данных – в

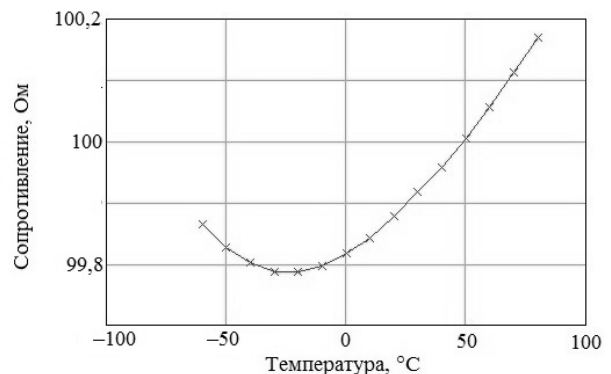
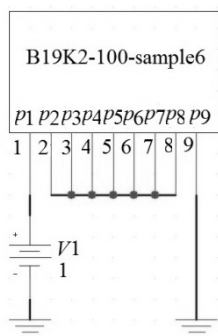


Рис. 7. Усредненная температурная зависимость сопротивления для образца №6 резисторной сборки Б19К2-100 Ом

Коррелированный технологический разброс номинала сопротивления  $DEV$  для выбранного образца составляет 5% (справочные данные из [11]).

Сформированный программой файл \*.lib с описанием SPICE-модели резисторного блока позволяет перейти к схмотехническому моделированию в программном комплексе Cadence OrCAD. Визуальное представление резисторного блока – это условное графическое обозначение (рис. 8а) в схемном редакторе OrCAD Capture. Условному графическому обозначению ставится в соответствие текстовое описание макромодели резисторного блока (рис. 8б).



а

```
.subckt b19k2-100-sample6 1 2 3 4 5 6 7 8 9
R1 1 9 TCR 100
R2 2 9 TCR 100
R3 3 9 TCR 100
R4 4 9 TCR 100
R5 5 9 TCR 100
R6 6 9 TCR 100
R7 7 9 TCR 100
R8 8 9 TCR 100
.model TCR RES (R=1 DEV=5% TC1=17.229E-6 TC2=355.591E-9)
.ends
```

б

Рис. 8. Представление резисторного блока схема включения резисторного блока – а; текстовое описание резисторного блока – б

Напряжение 1 В подано на резистивный элемент R1 (вывод №1 резисторного блока), остальные резистивные элементы соединены между собой.

Условия схмотехнического моделирования в OrCAD:

- температура окружающей среды  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ;

- диапазон варьирования источника напряжения  $U_{\text{ВХ}} = 0 \dots 10 \text{ В}$ ;

- шаг варьирования источника напряжения  $\Delta U_{\text{ВХ}} = 0,1 \text{ В}$ ;

- диапазон изменения температуры  $T = -60 \dots +80^\circ\text{C}$ ;

- шаг изменения температуры  $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ .

Для сравнения на одной координатной плоскости (рис. 9) представлены: ранее полученная усредненная экспериментальная зависимость  $R_{\text{ЭКС}} = f(T)$  и импортированная из постпроцессора Cadence PSpice зависимость по результатам моделирования  $R_{\text{МОД}} = f(T)$ .

Среднеквадратическое отклонение зависимостей 1 и 2 составляет  $\sigma = 0,011 \text{ Ом}$ . Полученное зна-

чение  $\sigma$  следует считать приемлемым, поскольку относительная погрешность составляет:

$$\delta = \frac{\sigma}{R} \cdot 100\% = \frac{0,011}{100} \cdot 100 = 0,011\% .$$

Дальнейшее повышение степени полинома аппроксимации не требуется. Сформированная SPICE-модель резисторного блока B19K2-100 Ом адекватно отражает поведение образца №6 с точки зрения температурной стабильности.

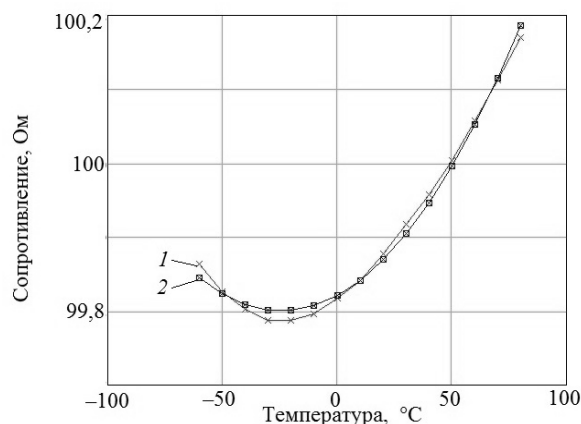


Рис. 9. Сравнение температурных зависимостей сопротивления усредненная экспериментальная зависимость – 1; результат моделирования в OrCAD – 2

**Заключение.** Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы:

1. Для сокращения материальных и временных ресурсов при формировании SPICE-моделей резисторных блоков Б19К целесообразно применение средств автоматизации для генерации текстовых описаний.

2. Предложенная в [13] методология моделирования температурной стабильности резисторных блоков апробирована с помощью оригинального программного продукта «Б19К». Сравнительный анализ «прототип-модель» для испытуемого образца №6 показал погрешность в описании температурной зависимости сопротивления в 0,011%.

3. Рассмотренный подход по автоматизированному формированию SPICE-моделей может быть распространен на другие семейства резисторных блоков отечественного и зарубежного производства.

#### Литература

1. Vasudevan S. Charge transport mechanism in thick film resistors: Ph.D dissertation. – Purdue University, 1990. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=5892144>, свободный (дата обращения: 02.07.2017).
2. Антонов Ю.Н. Математическое моделирование лазерной подгонки пленочных резисторов: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.13.18; [Место защиты: Ульяновский гос. техн. ун-т]. – М., 2009. – 38 с.
3. Караев А.К. Температурная зависимость сопротивления толстопленочных резисторов с учетом сегрегации

частиц проводящей фазы /А.К. Караев// Конструкции из композиционных материалов. – 2006. – №4. – С. 212–215.

4. Домкин К.И. Оптимизация разработки керметных резисторов с помощью моделирования / К.И. Домкин, В.Г. Недорезов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – №1. – С. 64–68.

5. Кондрашов В.В. Имитационное моделирование процесса автоматической лазерной подгонки пленочных резисторов / В.В. Кондрашов, О.С. Середин // Proceedings of the International scientific and technical Conference «Beam technologies & laser application». – СПб.: ФГАОУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2016. – С. 35–42.

6. Dziedzic A. Carbon / Polyesterimide thick-film resistive composite – experimental characterization and theoretical analysis of physicochemical, electrical and stability properties/A. Dziedzic // Microelectronics reliability. – 2007. – Vol. 47. – №2–3. P. 354–362.

7. Григорьев С.Н. Расчет и моделирование теплоотводящей зоны и параметрическая оптимизация топологии пленочного резистора /С.Н. Григорьев // Машиностроитель. – 2015. – №6. – С. 32–41.

8. Hoskins B.G. Artificial neural network techniques for the estimation of thick-film resistance / B.G. Hoskins, M.R. Haskard // Microelectronics journal. – 1995. – Vol. 26. – №1. – P. 9–16.

9. Рубанович М.Г. Декомпозиционный метод моделирования электромагнитных процессов в планарных пленочных резисторах / М.Г. Рубанович, В.А. Хрусталева, П.Г. Богомолов // Научные труды SWorld. – 2014. – Т. 9. – №1. – С. 30–34.

10. Рояк М.Э. Конечно-элементное моделирование тепловых полей в СВЧ-резисторах, выполненных по пленочной технологии / М.Э. Рояк, Ю.Г. Соловейчик, В.П. Разинкин // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – №1. – С. 32–36.

11. Резисторы. Группы 6010, 6020, 6060. РД 11 0856.3–93 / Сборник справочных листов. – СПб.: РНИИ «Электронстандарт», 1994. – 224 с.

12. Леухин В.Н. Анализ влияния технологических операций на выходные показатели качества резистивных сборок / В.Н. Леухин, А.В. Андрейкин, А.А. Нагаев // Вестник МарГТУ. – 2008. – №2. – С. 56–62.

13. Озеркин Д.В. Методология моделирования температурной стабильности резисторных блоков B19K в SPICE-подобных симуляторах / Д.В. Озеркин, С.А. Русановский // Доклады ТУСУР. – 2017. – №2. – С. 63–70.

14. Nagel L.W. SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) / L.W. Nagel, D.O. Pederson. – Berkeley: University of California, 1973. – 65 p.

15. OrCAD Capture Tutorial [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.orcad.com/resources/orcad-tutorials>, свободный (дата обращения 30.04.2017).

16. PSpice Tutorials [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.uta.edu/ee/hw/pspice/>, свободный (дата обращения 30.04.2017).

17. OrCAD Capture TCL/Tk Extensions. Application Notes. Revision: 1.2 [Электронный ресурс]. –

Режим доступа: [https://www.ema-eda.com/sites/ema/files/resources/files/OrCAD\\_Capture\\_TclTk\\_Extensions.pdf](https://www.ema-eda.com/sites/ema/files/resources/files/OrCAD_Capture_TclTk_Extensions.pdf), свободный (дата обращения 21.05.2017).

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
АО «Научно-производственный центр «Полус», г. Томск

## DESIGN AUTOMATIZATION OF B19K RESISTANCE BLOCK SPICE-MODELS FROM THE POSITION OF TEMPERATURE STABILITY

**D.V. Ozerkin<sup>1</sup>, S.A. Rusanovskiy<sup>2</sup>, V.O. Bondarenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

e-mail: [ozerkindenis@yandex.ru](mailto:ozerkindenis@yandex.ru)

<sup>2</sup>PhD, general manager of JSC “Scientific Production Center “Polus”, Tomsk, Russian Federation

e-mail: [rusa10@yandex.ru](mailto:rusa10@yandex.ru)

<sup>3</sup>Student, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

e-mail: [vip.sva1996@mail.ru](mailto:vip.sva1996@mail.ru)

Development and improvement of methods for designing and modeling of on-board space radio equipment requires the existing nomenclature of electronic products to be electronic models or SPICE-models. Resistor blocks with planar terminals of the B19K series are quite common in the nomenclature of electronic products allowed for use in the on-board space radio equipment. The article deals with the automation of the process of forming B19K resistor block SPICE-models. It is shown that the series of resistors B19K differs not only in variety of electrical circuits, but also in individual character of the temperature dependences of resistances of the resistive elements. Explanations are given with references to the previous studies explaining the reasons for negative effect of the parameters of the resistor blocks on the stability. These reasons lead to a number of specific implementations of SPICE-models. The authors propose a methodology for creating resistor block SPICE-models, based on grouping the temperature dependences by the criterion of analogy and similarity. To generate resistor block SPICE-models, the authors developed the program "B19K", implemented in high-level TCL / Tk scripting language. The TCL / Tk Scripting procedure provides unlimited possibilities for interaction with both the user interface of the OrCAD Capture schematic editor and the database of projects in OrCAD. A test comparative analysis of the "prototype-model" has been carried out with one of the samples of the resistor block B19K

Key words: temperature stability, temperature resistance coefficient, resistor block, SPICE model, OrCAD

## References

1. Vasudevan S. Charge transport mechanism in thick film resistors: PhD dissertation, Purdue University, 1990, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=5892144>
2. Antonov Yu.N. “Mathematical modeling of laser fitting of film resistors. Dr. tech. sci. diss.” (“Matematicheskoye modelirovaniye lazernoy podgonki plenochnykh rezistorov. Diss. dokt. tekhn. nauk”), Moscow, 2009, 38 p.
3. Karaev A.K. “Temperature dependence of the resistance of thick-film resistors taking into account the segregation of particles of the conducting phase”, *Composite materials constructions*, 2006, no.4, pp. 212–215.
4. Domkin K.I., Nedorezov V.G. “Optimization of development of cermet resistors by means of modeling”, *Reliability and quality of complex systems*, 2013, no.1, pp. 64–68.
5. Kondrashov V.V., Seredin O.S. “Simulation modeling of the process of automatic laser adaptation of film resistors”, *Proc. of the International scientific and technical Conference «Beam technologies & laser application»*, Saint-Petersburg, 2016, pp. 35–42.
6. Dziedzic A. “Carbon/polyesterimide thick-film resistive composite – experimental characterization and theoretical analysis of physicochemical, electrical and stability properties”, *Microelectronics reliability*, 2007, vol. 47, no. 2–3, pp. 354–362.
7. Grigor'ev S.N. “Calculation and modeling of the heat-conducting area and film resistor topology parametric optimization”, *Mechanician*, 2015, no.6, pp. 32–41.
8. Hoskins B.G., Haskard M.R. “Artificial neural network techniques for the estimation of thick-film resistance”, *Microelectronics journal*, 1995, vol. 26, no.1, pp. 9–16.
9. Rubanovich M.G., Khrustalev V.A., Bogomolov P.G. “Decomposition method of modeling electromagnetic processes in planar film resistors”, *Proc. of SWorld*, 2014, vol. 9, no.1, pp. 30–34.
10. Royak M.E., Soloveychik YU.G., Razinkin V.P. “Finite-element modeling of thermal fields in microwave resistors, made using film technology”, *Science bulletin of NSTU*, 2003, no.1, pp. 32–36.
11. “Resistors. Manual.” (“Rezistory. Gruppy 6010, 6020, 6060. RD 11 0856.3–93. Sbornik spravochnykh listov”), Saint-Petersburg, RNII «Elektronstandart», 1994, 224 p.
12. Leukhin V.N., Andreykin A.V., Nagaev A.A. “Analysis of the impact of technological operations on output quality indicators of resistive assemblies”, *Vestnik of Mari State University*, 2008, no. 2, pp. 56–62.
13. Ozerkin D.V., Rusanovskiy S.A. “Methodology for simulating the temperature stability of B19K resistor blocks in SPICE-like simulators”, *Proceedings of TUSUR University*, 2017, no.2, pp. 63–70.
14. Nagel L.W., Pederson D.O. “SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)”, Berkeley, University of California, 1973, 65 p.
15. “OrCAD Capture Tutorial”, available at: <http://www.orcad.com/resources/orcad-tutorials>
16. “PSPICE Tutorials”, available at: <http://www.uta.edu/ee/hw/pspice/>
17. “OrCAD Capture TCL/Tk Extensions. Application Notes. Revision: 1.2, available at: [https://www.ema-edu.com/sites/ema/files/resources/files/OrCAD\\_Capture\\_TclTk\\_Extensions.pdf](https://www.ema-edu.com/sites/ema/files/resources/files/OrCAD_Capture_TclTk_Extensions.pdf)

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА АНОДНОГО РАСТВОРЕНИЯ НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, В.В. Григораш

Эффективность электрохимического формообразования определяется его выходными технологическими показателями – производительностью, точностью обработки, качеством обработанной поверхности. При этом обрабатываемость металла электрохимическим методом рассматривается как функция свойств металла заготовки, электролита, режимных параметров процесса анодного растворения. В статье рассмотрено влияние режимных параметров анодного растворения на основные показатели процесса.

Производительность процесса или скорость анодного растворения металла, в конечном счете, определяется значениями анодной плотности тока и анодного выхода по току. Показаны пути повышения интенсификации производительности процесса: вибрация электродов, наложение на электроды ультразвукового поля, применение абразивонесущего электролита, комбинирование различных методов обработки, правильный выбор состава электролита и основных технологических параметров процесса.

Точность электрохимического формообразования определяется локализирующей способностью системы металл-электролит, которая зависит от состава электролита, величины межэлектродного зазора, конструкции электрода-инструмента, режима электролиза. Локализирующая способность системы может быть повышена путем использования в качестве рабочей среды газожидкостной смеси или кислородосодержащих электролитов, изоляции нерабочих участков поверхности электрода-инструмента, поддержания малых межэлектродных зазоров и использования импульсного тока.

Шероховатость поверхности уменьшается с уменьшением величины межэлектродного зазора, увеличением скорости подачи электрода-инструмента, с усилением пассивирующего действия электролита, повышением степени локализации процесса анодного растворения металла. При обработке импульсным током шероховатость поверхности снижается с увеличением амплитудной плотности тока. При выполнении большинства операций электрохимического формообразования шероховатость поверхности находится в пределах  $R_a = 2,5-0,32$  мкм

Ключевые слова: электрохимическая обработка, режимы, технологические показатели

Эффективность и качество любого способа обработки металлов, в том числе и электрохимического формообразования, определяются его выходными технологическими показателями – производительностью и точностью обработки, качеством обработанной поверхности [1].

В производственных условиях при обработке объемно-фасонных поверхностей площадью от 100 до 800 см<sup>2</sup> при работе в непрерывном режиме удельная скорость съема металла составляет 50-200 м<sup>3</sup>/А·ч. Это соответствует скорости подачи электрода инструмента 1-5 мм/мин при точности формообразования 0,1-0,5 мм и шероховатости поверхности, соответствующей  $R_a = 2,5-0,32$  мкм. При работе в импульсно-циклических режимах скорость съема металла снижается до 6-8 раз, но при этом повышается точность формообразования и несколько повышается качество обработанной поверхности [2].

Обрабатываемость металла электрохимическим методом рассматривается,

как правило, как функция свойств металла заготовки, электролита, режимных параметров процесса анодного растворения [3]. Рассмотрим влияние режимных параметров анодного растворения на основные показатели процесса.

### 1. Производительность

На рис. 1 схематично представлены зависимости производительности процесса традиционного электрохимического формообразования от основных параметров электролита и режима электролиза.

Производительность процесса или скорость анодного растворения металла, в конечном счете, определяется значениями анодной плотности тока и анодного выхода по току. Поэтому все способы, так или иначе способствующие их повышению, приводят к увеличению производительности

Самым простым и в то же время самым эффективным способом интенсификации анодного растворения металла и повышения выхода по току является правильный выбор состава электролита и основных технологических параметров процесса. При проектировании технологического процесса электрохимической размерной обработки для выбора электролита и параметров электролиза наиболее целесообразно пользоваться

Болдырев Александр Иванович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: aiboldyrev@mail.ru

Болдырев Александр Александрович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

Григораш Владимир Васильевич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: svarka@vgasu.vtn.ru



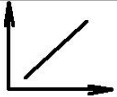




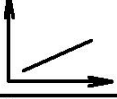
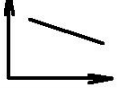
<i>Параметр процесса</i>	<i>Производительность</i>
<i>Напряжение на электродах</i>	
<i>Плотность тока</i>	
<i>Подача электрода-инструмента</i>	
<i>Концентрация электролита</i>	
<i>Температура электролита</i>	
<i>Электропроводность электролита</i>	
<i>Скорость течения электролита</i>	

Рис. 1. Зависимости производительности процесса электрохимического формообразования от основных параметров электролита и режима электролиза

методикой стандартного эксперимента [4]. Это тем более целесообразно, что при этом учитываются взаимосвязь и взаимовлияние параметров электролита и режима электролиза.

В литературе нередко указывается на целесообразность введения в электрохимическую систему электрод-инструмент-электролит-электрод-заготовка дополнительных факторов, таких как вибрация электродов, наложения на электроды ультразвукового поля, применения абразивонесущего электролита [1]. Однако это справедливо лишь в определенных областях применительно к каждому конкретному случаю.

Наложение на электроды механических колебаний действительно способствует лучшей эвакуации из рабочей зоны продуктов реакции и тем самым облегчает процесс анодного растворения металла и способствует повышению выхода по току. Однако этот способ не может быть использован при обработке полостей сложной конфигурации при малых зазорах. Область его применения ограничена формообразованием полостей сравнительно несложной конфигурации при не

очень высоких требованиях к точности обработки.

Сущность воздействия ультразвукового поля на процесс анодного растворения металла заключается в сильном перемешивающем действии, качественно отличном от обычного механического перемешивания. Благодаря этому сильно снижается концентрационная поляризация и увеличивается допустимое значение плотности тока. При этом создаются условия, способствующие повышению производительности процесса. Кроме того ультразвуковое поле оказывает влияние на энергетическую активность реагирующих частиц, способствует их диспергированию. В промышленной электротехнологии успешно применяется комбинированная ультразвуковая и электрохимическая обработка для формообразования твердосплавных фильер и деталей штампов небольших размеров. Это качественно отличная комбинированная обработка, где разрушение металла происходит не по электрохимическому, а по другому механизму [5]. Область применения такой комбинированной обработки ограничивается твердосплавными деталями небольших размеров.

Применение абразивонесущего электролита дает положительный эффект при комбинированной ультразвуковой-электрохимической обработке или анодно-абразивной обработке, но совершенно неприемлемо в условиях электрохимического формообразования, когда зазоры между электродами составляют десятые или сотые доли миллиметра [6].

Значительное увеличение производительности процесса достигается путем совмещения анодного растворения металла с эрозионным разрушением металла [7], такой электроэрозионнохимический процесс основан на избирательном локальном разряде в местах с наименьшей электрической прочностью и анодном растворении металла по всей поверхности заготовки, находящейся под рабочей поверхностью электрода-инструмента. Линейная скорость обработки достигает 3-5 мм/мин для твердых сплавов марки ВК, 10-15 мм/мин – для нержавеющей и жаропрочных сплавов, 30-40 мм/мин – для легированных сталей. Однако область применения этого процесса ограничена в основном черновыми операциями.

Интенсификация процесса анодного растворения металла может быть также достигнута путем уменьшения величины межэлектродного зазора. При этом повышается

напряженность электрического поля и, соответственно, эффективная плотность тока. Однако беспредельно уменьшать величину межэлектродного зазора нельзя, т.к. с уменьшением величины зазора растет вероятность возникновения короткого замыкания и затрудняется прокачка электролита через межэлектродный промежуток. На практике возможность обработки при малых зазорах реализуется двумя путями: использования в качестве рабочей жидкости газожидкостной смеси и перехода на импульсно-циклические режимы.

Использование газожидкостной смеси дает положительный эффект, особенно при обработке полостей сложной конфигурации. При достаточно высокой производительности достигается и высокая точность обработки, и высокое качество поверхностного слоя.

Производительность процесса электрохимической размерной обработки в импульсно-циклическом режиме значительно ниже, чем в условиях непрерывной обработки. Однако, если процесс осуществляется с максимально возможной энергоемкостью, то производительность импульсной обработки может быть повышена до значений, близких к получению в условиях непрерывной обработки за счет увеличения энергии импульсов (при амплитудной плотности тока в импульсе 500-23500 А/см<sup>2</sup> и напряжении 200-300 В). Интегральное количество электричества достигает таких же величин, как и при постоянном токе, при плотности тока 30-100 А/см<sup>2</sup> [2]. Это представляет интерес для производителей с точки зрения развития технологии электрохимической размерной обработки в импульсно-циклическом режиме.

## 2. Точность обработки

На рис. 2 схематично представлены зависимости точности процесса традиционного электрохимического формообразования от основных параметров электролита и режима электролиза.

Точность формообразования зависит от целого ряда факторов, которые находятся в сложной взаимозависимости.

Известно, что основной предпосылкой при выборе электролита является возможность анодного растворения в нем данного металла. Однако при этом следует иметь в виду, что чем резче проявляется зависимость выхода по току от плотности тока и концентрации электролита, тем выше точность обработки.

<i>Параметр процесса</i>	<i>Точность обработки</i>
<i>Напряжение на электродах</i>	
<i>Плотность тока</i>	
<i>Подача электрода-инструмента</i>	
<i>Концентрация электролита</i>	
<i>Температура электролита</i>	
<i>Электропроводность электролита</i>	
<i>Скорость течения электролита</i>	

Рис. 2. Зависимости точности процесса электрохимического формообразования от основных параметров электролита и режима электролиза

Точность электрохимического формообразования определяется локализирующей способностью системы металл-электролит, которая зависит от состава электролита, величины межэлектродного зазора, конструкции электрода-инструмента, режима электролиза [8]. Локализирующая способность системы может быть повышена путем использования в качестве рабочей среды газожидкостной смеси или кислородосодержащих электролитов, изоляции нерабочих участков поверхности электрода-инструмента, поддержания малых межэлектродных зазоров и использования импульсного тока.

Использование газожидкостных смесей в качестве рабочей среды – самый простой и в то же время достаточно эффективный способ повышения точности электрохимической обработки полостей сложной конфигурации [9].

При использовании кислородосодержащих электролитов растворение металла происходит в транспассивной области. Зависимость выхода по току от плотности тока проявляется довольно резко и точность обработки достигается более высокая, чем, например, в растворах нейтральных хлоридов. Это хорошо

известно на примере электролитов на основе нитратов или хлоратов.

При уменьшении межэлектродного зазора возникают две проблемы: возрастает вероятность короткого замыкания электродов и затрудняется прокачка электролита через рабочую зону.

Для предотвращения короткого замыкания и искрений между электродами созданы специальные блоки защиты. Работа этих блоков основана на использовании сигнала, характеризующего предельно допустимое состояние межэлектродного промежутка при данном режиме обработки (при данном напряжении и расходе электролита). Этот же сигнал используется для оптимизации процесса при работе на постоянном токе с непрерывной подачей электрода-инструмента.

Уменьшать величину межэлектродного зазора, как было показано выше, можно лишь до определенного предела. Вследствие интенсификации процесса анодного растворения металла и сопутствующих ему процессов газо- и шламообразования становится необходимым разделение во времени фаз удаления металла с обрабатываемой поверхности и эвакуации из рабочей зоны продуктов реакции. Это можно осуществить только при переходе от непрерывного режима обработки к импульсно-циклическому, с использованием импульсного тока и различных законов движения электрод-инструмента. Таким образом, в межэлектродном промежутке искусственно создаются условия электролиза, близкие к идеальным.

Возможна аналогия между качеством схемы формообразования и используемой системой автоматического управления. Совершенство системы автоматического управления определяется объемом и качеством информации о течении процесса в межэлектродном промежутке, набором различных управляющих воздействий и алгоритмом управления. Поэтому до сих пор на первом плане стоит задача создания и совершенствования адаптивных систем управления процессом электрохимического формообразования. Эта задача осложнена специфическими трудностями получения достоверной информации о текущих координатах анодной поверхности, фактической величине межэлектродного зазора, о свойствах рабочей среды в объеме межэлектродного промежутка и т.д.

Точность электрохимического формообразования может быть также

повышена путем снижения на заключительном этапе обработки напряжения на электродах. При этом можно уменьшить величину межэлектродного зазора, рассеяние линий тока в электролите уменьшится и обработку можно вести при меньших скоростях течения электролита. Что позволяет избежать возникновения в рабочей зоне участков кавитации электролита. Известно [10], что максимальная степень локализации процесса анодного растворения металла достигается, если процесс ведется при потенциалах, близких к потенциалу анодной активации. Однако растворение при этом протекает нестабильно (видимо в результате конкуренции процессов анодной активации и пассивации поверхности металла). Это проявляется в снижении скорости растворения после резкого увеличения анодного тока, вызванного активацией поверхности (рис. 3). Приемлемая скорость растворения металла сохраняется лишь в течение небольшого периода времени. Между этими импульсами нужно депассивировать поверхность металла. Для этого можно использовать активирующий импульс тока. Но для того, чтобы активирующий импульс не вызвал заметного снижения степени локализации процесса, количество электричества в нем должно быть много меньше количества электричества в рабочем импульсе. На рис. 4 показана типичная для такого случая форма импульса напряжения и тока.

### **3. Шероховатость поверхности**

На рис. 5 схематично представлены зависимости влияния основных параметров электролита и режима электролиза на шероховатость поверхности, получаемой в процессе традиционного электрохимического формообразования.

Шероховатость поверхности, как известно, является одним из основных технологических показателей метода и режима обработки, в значительной мере определяющей работоспособность детали, ее эксплуатационные характеристики.

В отличие от всех иных известных методов обработки металлов, при электрохимической размерной обработке с повышением производительности, как правило, снижается и шероховатость поверхности. Это объясняется специфическими особенностями самого процесса электрохимического

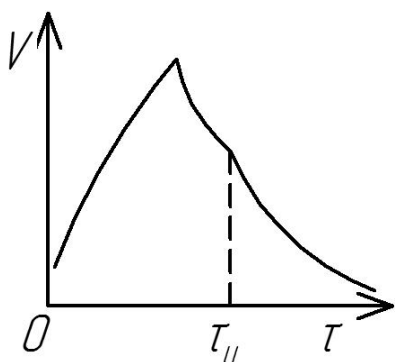


Рис. 3. Изменение скорости растворения металла при активации анодной поверхности

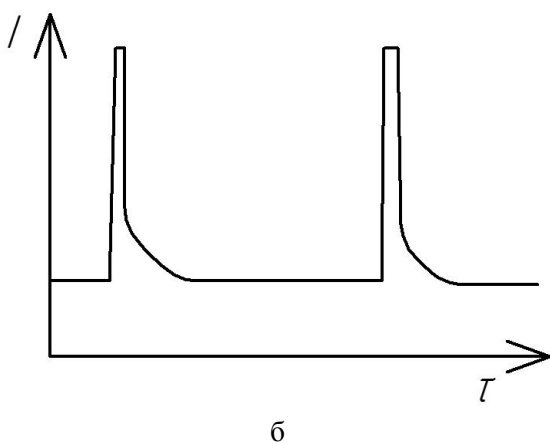
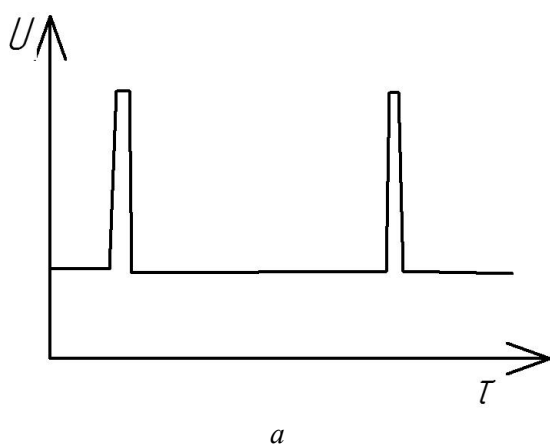


Рис. 4. Типичная форма напряжения (а) и тока (б) для активирующего импульса

формообразования: необходимым условием повышения производительности является повышение плотности тока, а с увеличением плотности тока скорости растворения различных структурных составляющих металла заготовки нивелируются, и качество поверхности улучшается [4].

Шероховатость поверхности уменьшается с уменьшением величины межэлектродного зазора, увеличением скорости подачи электрода-инструмента, с усилением

Параметр процесса	Шероховатость поверхности
Напряжение на электродах	
Плотность тока	
Подача электрода-инструмента	
Концентрация электролита	
Температура электролита	
Электропроводность электролита	
Скорость течения электролита	

Рис. 5. Зависимости влияния основных параметров электролита и режима электролиза на шероховатость поверхности

пассивирующего действия электролита, повышением степени локализации процесса анодного растворения металла. При обработке импульсным током шероховатость поверхности снижается с увеличением амплитудной плотности тока.

При выполнении большинства операций электрохимического формообразования шероховатость поверхности находится в пределах  $R_a = 2,5-0,32$  мкм. Последующая финишная обработка (чаще всего механическая) обеспечивает снижение шероховатости поверхности, как правило, на 1-2 класса [11].

Поэтому, исходя из нынешнего уровня знаний о механизме процесса, технологии и средствах технологического оснащения, представляется весьма возможным полностью исключить из технологического процесса изготовления деталей финишную механическую обработку и лишь путем изменения режима электролиза на заключительном этапе обработки добиться высокого качества поверхности при требуемой точности обработки.

## Выводы

1. Достигнутые технологические показатели процесса электрохимического формообразования не являются предельными и отражают лишь сегодняшний уровень развития технологии и средств технологического оснащения.

2. Дальнейшее совершенствование процесса электрохимического формообразования возможно лишь при создании таких условий осуществления процесса, которые обеспечат достижение максимальной производительности при требуемой точности обработки и высоком качестве обработанной поверхности. Очевидно, что эта задача не может быть решена однозначно для всех металлов и всех типоразмеров деталей, встречающихся в производстве. Для каждой группы металлов, для каждого типоразмера деталей должно быть найдено оптимальное решение с использованием указанных путей.

## Литература

1. Технология электрических методов обработки: учебн. пособие / В.П. Смоленцев, А.В. Кузовкин, А.И. Болдырев и др. Воронеж: ВГУ, 2001. 310 с.
2. Житников В.П. Импульсная электрохимическая размерная обработка / В.П. Житников, А.Н. Зайцев. М.: Машиностроение, 2008. 413 с.
3. Теория электрических и физико-химических методов обработки. Обработка материалов с применением инструмента: учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев и др.; под ред. В.П. Смоленцева. Воронеж: ВГТУ, 2008. Ч. 1. 248 с.
4. Справочник по электрохимии / под ред. А.М. Сухотина. М.: Химия, 1981. 488 с.
5. Формализация напряженно-деформированного состояния детали с подвижной границей в условиях электрического и комбинированного формообразования / А.И. Болдырев, С.В. Усов, А.А. Болдырев и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2014.- Т. 10. -№ 1. -С. 16-19.
6. Смоленцев В.П. Расчет режимов обработки полостей несвязанными гранулами / В.П. Смоленцев, А.В. Кузовкин, А.И. Болдырев // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1997. № 1. С. 58-61.
7. Комбинированные методы обработки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, А.В. Кузовкин и др.; под ред. В.П. Смоленцева. Воронеж: ВГТУ, 1996. 168 с.
8. Экспериментальные исследования технологических возможностей электрохимического формообразования / А.И. Болдырев, С.В. Усов, А.А. Болдырев и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2014. -Т. 10. -№ 3.1. -С. 120-122.
9. Болдырев А.А. Приготовление рабочих сред для электрохимической обработки / А.А. Болдырев, А.И. Болдырев // Сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. Липецк: ЛГТУ, 2015. С. 48-51.
10. Багоцкий В.С. Основы электрохимии / В.С. Багоцкий. М.: Химия, 1988. 520 с/
11. Болдырев А.И. Экспериментальные исследования состояния поверхностного слоя после электрохимикомеханической обработки / А.И. Болдырев // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2010. -Т. 6. -№ 10. -С. 15-20.

Воронежский государственный технический университет

## INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS IN ANODIC DISSOLUTION PROCESS ON QUALITY ASSURANCE OF ELECTROCHEMICAL SHAPING

A.I. Boldyrev<sup>1</sup>, A.A. Boldyrev<sup>2</sup>, V.V. Grigorash<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: aiboldyrev@mail.ru

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: svarka@vgasu.vrn.ru

Efficiency of electrochemical shaping is determined by its output technological parameters: productivity, accuracy of processing, quality of the treated surface. Electrochemical machinability is considered as a function of the properties of the metal of a workpiece, electrolyte, and the regime parameters of the anodic dissolution process. The influence of regime parameters of anodic dissolution on the main parameters of the process is considered in the article.

Productivity of the process or the rate of anodic dissolution of a metal is ultimately determined by the values of the anode current density and the anode current output. The ways of increasing the intensification of the process productivity are shown: vibration of the electrodes, superposition of ultrasonic field on the electrodes, application of abrasive-bearing electrolyte, combination of various processing methods, correct choice of the electrolyte composition and the main technological parameters of the process.

The accuracy of electrochemical shaping is determined by the localizing ability of the metal-electrolyte system, which depends on the composition of the electrolyte, the size of the interelectrode gap, the electrode-tool design, and the electrolysis regime. The localization capacity of the system can be increased by using a gas-liquid mixture or oxygen-containing electrolytes as a working medium, isolating the non-working areas of the electrode-tool surface, maintaining small interelectrode gaps, and using a pulsed current.

The surface roughness decreases with a decrease in the interelectrode gap size, with an increase in the feed rate of the tool electrode, with an increase in the passivating action of the electrolyte, and with an increase in the degree of localization of

the anodic dissolution of the metal. When processing by impulse current, the surface roughness decreases with an increase of the amplitude current density. When the most electrochemical shaping operations are performed, the surface roughness is in the range of  $R_a = 2.5-0.32 \mu\text{m}$

Key words: electrochemical treatment, modes, technological indicators

### References

1. Smolentsev V.P., Kuzovkin A.V., Boldyrev A.I. "Electrical processing methods technology" ("Tekhnologiya elektricheskikh metodov obrabotki"), Voronezh, VSU, 2001, 310 p.
2. Zhitnikov V.P., Zaytsev A.N. "Pulsed electrochemical dimensional processing" ("Impul'snaya elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka"), Moscow, Mashinostroenie, 2008, 413 p.
3. Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Smolentsev E.V. "The theory of electrical, chemical and physical processing methods. Processing materials using tools" ("Teoriya elektricheskikh i fiziko-khimicheskikh metodov obrabotki. Obrabotka materialov s primeneniem instrumenta"), Voronezh, VSTU, 2008, part 1, 248 p.
4. Sukhotin A.M. "Handbook of Electrochemistry" ("Spravochnik po elektrokhimii"), Moscow, Khimiya, 1981, 488 p.
5. Boldyrev A.I., Usov S.V., Boldyrev A.A. "Formalization of the stressed-deformed state of a part with a movable boundary under conditions of electric and combined shaping", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2014, vol.10, no. 1, pp. 16-19.
6. Smolentsev V.P., Kuzovkin A.V., Boldyrev A.I. "Calculation of modes for treating cavities with unbound granules", *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Russian Aeronautics*, 1997, no. 1, pp. 58-61.
7. Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Kuzovkin A.V. "Combined processing methods" ("Kombinirovannye metody obrabotki"), Voronezh, VSTU, 1996, 168 p.
8. Boldyrev A.I., Usov S.V., Boldyrev A.A. "Experimental studies of technological possibilities of electrochemical formation", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2014, vol.10, no. 3-1, pp. 120-122.
9. Boldyrev A.A., Boldyrev A.I. "Preparation of working media for electrochemical processing", *Proc. of the International Scientific and Technical Conference (Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii)*, Lipetsk, LSTU, 2015, pp. 48-51.
10. Bagotskiy V.S. "Fundamentals of electrochemistry" ("Osnovy jelektrohimii"), Moscow, Khimiya, 1988, 520 p.
11. Boldyrev A.I. "Experimental studies of the state of the surface layer after electrochemical-mechanical treatment", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2010, vol. 6, no. 10, pp. 15-20.

## РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССОВ ЛОГИСТИКИ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

О.Г. Туровец, И.В. Каблашова, В.Н. Родионова

В статье рассматривается методологический подход к формированию механизма управления качеством процессов логистики с учетом рекомендаций международной системы стандартов по менеджменту качества. Отражены результаты исследования содержания деятельности по управлению качеством процессов логистики, приведена классификация функциональных процессов логистики и построена процессно-ориентированная схема реализации документированных процедур по управлению качеством процессов логистики. С учетом содержания логистической деятельности предприятия разработана функциональная структура механизма управления качеством процессов логистики, раскрыто содержание принципиальных положений и этапов работ, необходимых для разработки и обеспечения функционирования механизма. Сформирована матрица идентификации ответственности за обеспечение качества процессов логистики. С учетом принципа процессного подхода построена процессно-ориентированная структура механизма управления качеством процессов логистики. Обоснована целесообразность интеграции функциональных процессов, реализуемых в рамках системы организации производства и механизма управления качеством процессов логистики. Для обеспечения функционирования механизма предложена схема проведения мониторинга процессов логистики с целью своевременного выявления и устранения причин отклонений в процессах. Описано содержание документированных процедур, применяемых при проведении мониторинга процессов логистики, в контексте содержания логистической деятельности. Обоснована необходимость организации межфункциональной команды по управлению качеством процессов логистики, которая включает представителей каждого подразделения логистической службы предприятия. Обосновано, что жесткая идентификация ответственности между работниками в составе межфункциональной команды за обеспечение качества процессов логистики позволит обеспечивать качество перемещаемых ресурсов по этапам производства и качество конечного результата деятельности предприятия

Ключевые слова: управление, качество, мониторинг, процессно-ориентированная структура

### Введение

Теоретические исследования направлений инновационного развития предприятий показали, что содержание современной системы менеджмента качества, построенной с учетом процессного подхода, является основой для постановки задач, решаемых при управлении качеством процессов логистики. В соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001- 2010 любая деятельность, которая получает входящие элементы и преобразует их в выходящие элементы, может быть рассмотрена как процесс. Данный стандарт нацеливает на необходимость применения процессного подхода для управления процессами логистики и производства на основе идентификации ответственности за качество, своевременного устранения причин отклонений в процессах, а также проведения верификации и валидации процессов для выявления и обоснования возможностей по улучшению качества процессов логистики [1].

Следует отметить, что применение процессного подхода при формировании механизма управления качеством процессов логистики позволяет:

- рассматривать логистическую деятельность предприятия как совокупность взаимосвязанных процессов логистики, осуществляемых по этапам производства,
- организовывать межфункциональное (интегрированное) управление логистической деятельно-

стью с учетом выполнения установленных требований к качеству процессов логистики,

- обеспечивать качество как совокупное качество цепочек процессов логистики в рамках организационной структуры логистической службы с учетом компонентов организационной культуры предприятия.

### Теория

Основываясь на результатах проведенных теоретических и аналитических исследований, под цепочкой логистических процессов понимается совокупность различных видов функциональной деятельности, направленной на создание и поддержание необходимых условий протекания процессов производства с учетом установленных требований к качеству совокупного результата деятельности предприятия.

При этом логистический процесс рассматривается как цепочка операций, результатом которой является достижение цели процесса и обеспечение соответствия входного и выходного качества процесса. Управление цепочками процессов логистики осуществляется с помощью функций, идентифицированных различным структурным подразделениям организационной структуры логистической службы предприятия [3].

На основе результатов исследования содержания логистической деятельности и деятельности по управлению качеством процессов логистики проведена классификация функциональных процессов, реализуемых при функционировании механизма управления качеством процессов логистики (табл. 1).

Реализация функции «документированное описание процедур управления качеством логистических процессов» должна осуществляться с использованием следующих положений:

Туровец Оскар Григорьевич – ВГТУ, д-р экон. наук, профессор, e-mail: oskar-turovets@yandex.ru  
 Каблашова Ирина Владимировна – ВГТУ, д-р экон. наук, доцент, e-mail: kablashowa@yandex.ru  
 Родионова Валентина Николаевна – ВГТУ, д-р экон. наук, профессор, e-mail: rodionovavn2011@yandex.ru

- формулировка цели осуществления процесса логистики;
- установление показателей качества процесса логистики, методика расчета;
- описание входных данных, содержащих перечень текущих параметров процесса логистики, включая требования к ресурсному обеспечению, с указанием источников информации;

- определение выходных данных, содержащих требования к качеству процесса и к качеству его результата;
- описание процедур измерения (доказательства соответствия), таких как верификация и валидация;
- описание факторов, влияющих на качество процессов логистики, определение показателей и методов оценки [8].

Таблица 1

Классификация функциональных процессов в механизме управления качеством процессов логистики

Функции общего руководства логистической деятельностью	Специальные функции управления качеством процессов логистики
<ul style="list-style-type: none"> <li>- управление взаимовыгодными отношениями с «заинтересованными» клиентами, поставщиками, потребителями т.д.;</li> <li>- разработка стратегических решений по управлению логистической деятельностью;</li> <li>- построение рациональной инфраструктуры логистической деятельности;</li> <li>- планирование ресурсного обеспечения процессов логистики;</li> <li>- разработка планов по совершенствованию логистической деятельности;</li> <li>- диагностика внутренних и внешних условий осуществления логистической деятельности;</li> <li>- идентификация ответственности за качество процессов логистики между работниками логистической службы;</li> <li>- оперативное планирование процедур по постоянному улучшению качества процессов логистики.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- определение и анализ требований к качеству процессов логистики;</li> <li>- планирование обеспечения качества процессов логистики;</li> <li>- организация межфункционального управления цепочками процессов логистики;</li> <li>- организация постоянного мониторинга процессов логистики;</li> <li>- принятие корректирующих решений и решений по предупреждению отклонений (несоответствий) в процессах логистики;</li> <li>- организация работы межфункциональных команд по управлению качеством процессов логистики;</li> <li>- организация обучения персонала логистической службы и проведение квалификационного аудита;</li> <li>- проведение внутренних аудитов в логистической деятельности;</li> <li>- планирование и анализ затрат на управление качеством процессов логистики.</li> </ul>

В контексте рассматриваемой проблемы, основными задачами общего руководства логистической деятельностью являются следующие: идентификация ответственности за качество процессов логистики, удовлетворение потребностей и ожиданий потребителей, поставщиков и заказчиков, поддержка и улучшение условий среды организации для повышения эффективности логистической деятельности.

Следует отметить, что комплекс функций общего руководства логистической деятельностью является важным блоком процессов, реализуемых в рамках механизма управления качеством процессов логистики. Выполнение данных функций связано с обеспечением эффективности управления технологией осуществления логистических процессов, а это возможно только в том случае, если процессы формализованы, документированы и можно точно оценить качество материальных, трудовых, информационных ресурсов и компонентов внутренней и внешней среды [9].

**Модель**

С учетом вышеизложенного построена функциональная структура механизма управления качеством процессов логистики (рис.1).

При разработке и обеспечении функционирования механизма управления качеством процессов логистики необходимо учитывать следующие принципиальные положения:

1. Постоянное повышение квалификации и компетентности персонала логистической службы

предприятия, обучение методам мониторинга и планирования качества процессов логистики, а также проведение квалификационного аудита.

2. Механизм управления качеством процессов логистики должен являться структурным элементом действующей системы менеджмента качества, что предполагает отражение результатов всех процессов логистики в соответствующей документации по качеству, т.е. в отчетах по внутреннему аудиту и самооценке системы качества.

3. Структура механизма управления качеством процессов логистики должна соответствовать принципу процессного подхода, применение которого предполагает организацию межфункционального (интегрированного) управления качеством.

4. Организация деятельности по управлению качеством процессов логистики должна осуществляться с учетом принципов системы TQM, что предполагает идентификацию ответственности за качество процессов логистики между работниками логистической службы предприятия [10].

С учетом вышеизложенного описаны следующие этапы формирования и обеспечения функционирования механизма управления качеством процессов логистики.

1 этап – создание рабочей группы под руководством специалиста службы качества, состоящей из представителей всех подразделений логистической службы, предприятия. В задачи группы входит: разработка общего плана работ по разработке механизма, сбор необходимой информации о параметрах



процессов логистики, проведение анализа проблем в логистической деятельности предприятия, разработка общего алгоритма выполнения работ по разработке механизма управления качеством процессов логистики.

2 этап – постановка целей и выработка стратегии управления и улучшения качества процессов логистики. На данном этапе проводится анализ стратегических и оперативных планов управления логистической деятельностью, совместно с руководством логистической службы формулируются цели и задачи осуществления деятельности по управлению качеством процессов логистики, разрабатыва-

ется матрица идентификации ответственности за качество.

3 этап – разработка положения о деятельности команд по управлению качеством процессов логистики. На данном этапе необходимо организовать обучение персонала, разработать положение по мотивации вовлеченности работников в команды по качеству. По результатам квалификационного аудита провести отбор работников в команды, наделить их соответствующими полномочиями и ответственностью в области принятия решений: по корректировке процессов логистики, по предупреждению причин отклонений и сбоев, по улучшению качества процессов логистики.

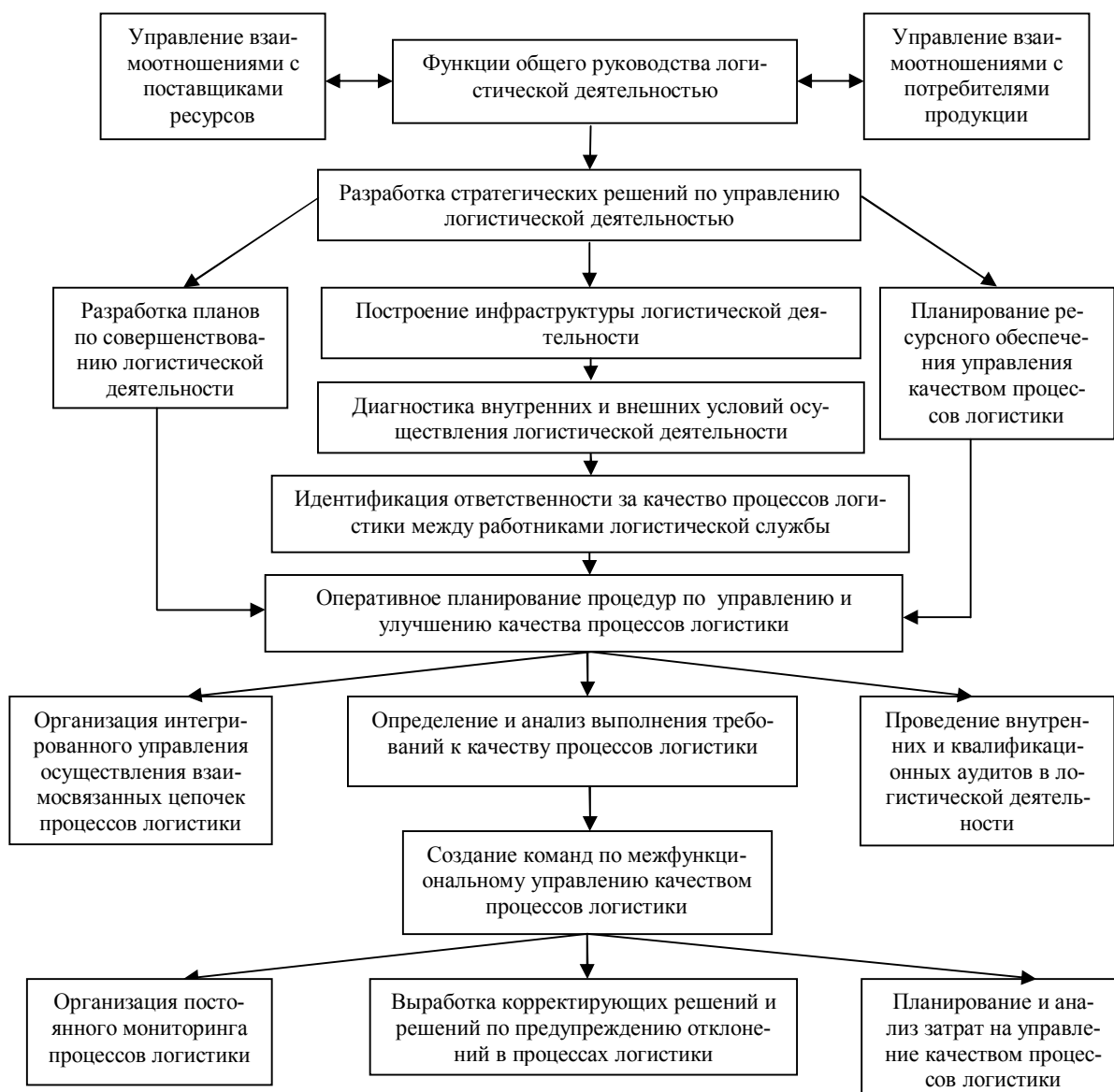


Рис. 1. Функциональная структура механизма управления качеством процессов логистики

4 этап – классификация процессов логистики, построение цепочек процессов, взаимосвязанных по целям и результатам, разработка документированных процедур проведения мониторинга и диагностики процессов с целью доказательства соответствия качества входов и выходов. Составление карты качества для каждого процесса логистики, внесе-

ние изменений и дополнений в должностные инструкции персонала с учетом принципа всеобщей ответственности за качество.

При планировании и описании конкретного логистического процесса в карте качества необходимо идентифицировать следующую информацию:

- цель процесса, связи с целями других логистических процессов,
- входные данные, включающие перечень необходимых ресурсов, требования и показатели качества процесса логистики,
- планируемый результат на выходе с учетом требований к качеству последующего логистического процесса,
- взаимосвязи (последовательность) осуществления процессов логистики,
- используемые информационные ресурсы, необходимые для управления процессом логистики и управления его качеством (инструкции, процедуры, методы и т.п.),

- мероприятия по мониторингу, необходимые для своевременной корректировки процессов логистики с целью достижения требуемого качества.

5 этап – разработка процессно-ориентированной структуры механизма управления качеством процессов логистики, описание необходимых условий для функционирования механизма, формирование системы сбалансированных показателей оценки качества. С учетом вышеизложенного разработана процессно-ориентированная структура механизма управления качеством процессов логистики (рис. 2).

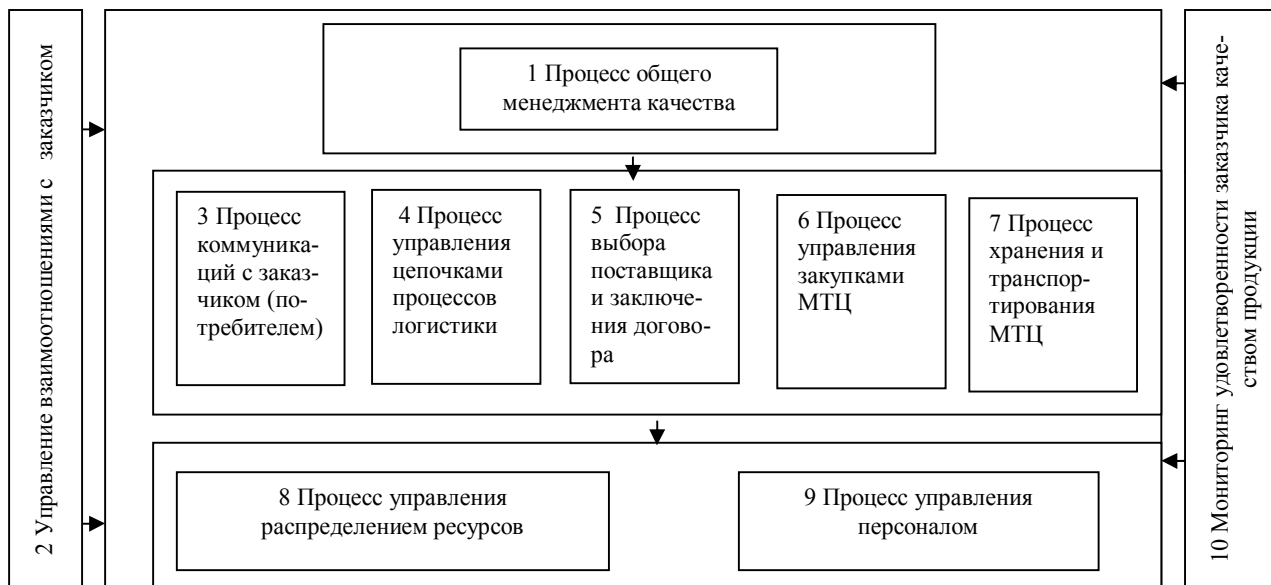


Рис. 2. Процессно-ориентированная структура механизм управления качеством процессов логистики

Основными процессами логистической деятельности являются функциональные процессы, такие как: выбор поставщика, закупка материально-технических ресурсов, хранение, распределение по этапам производства, транспортирование, хранение и оценка качества готовой продукции, поставка поставщику (заказчику) [4].

Ответственность за эффективное функционирование механизма управления качеством процессов идентифицируется службе управления логистической деятельностью, которая подчиняется непосредственно генеральному директору предприятия. В состав структуры логистической службы должны входить следующие подразделения: отдел закупок, бюро

связей с поставщиками ресурсов, склад входящих материалов, склад готовой продукции, межцеховые склады, бюро метрологии, бюро планирования и операционного управления процессами логистики, транспортный отдел, бюро связей с потребителем (заказчиком), бюро мониторинга, команды по межфункциональному управлению качеством процессов логистики.

#### Данные и методы

Для реализации механизма управления качеством процессов логистики разработана матрица идентификации ответственности за качество (табл. 2).

Таблица 2

Матрица идентификации ответственности за качество процессов логистики

Наименование процесса	Руководитель (участник) процесса	Ответственный исполнитель за качество процесса
1 Процесс общего менеджмента качества	Директор по качеству (руководитель службы качества)	Руководитель службы логистики
2 Процесс управления взаимоотношениями с заказчиком	Генеральный директор	Руководитель службы менеджмента качества
3 Процесс коммуникаций с заказчиком (потребителем)	Руководитель службы сбыта продукции	Руководитель маркетинговой службы

4 Процесс управления цепочками процессов логистики	Руководитель службы логистики	Команда по межфункциональному управлению качеством процессов логистики
5 Процесс выбора поставщика и заключения договора на поставку	Директор по коммерческим вопросам	Начальник бюро договорной работы и внешних связей
6 Процесс управления закупками МТЦ	Руководитель службы логистики	Руководитель отдела материально-технического снабжения
7 Процесс хранения и транспортирования МТЦ	Руководитель складской службы	Начальники складов предприятия и руководитель транспортного отдела
8 Процесс управления распределением ресурсов	Руководитель логистической службы	Специалист по оперативному управлению процессами логистики
9 Процесс управления персоналом	Директор по кадровой политике	Руководитель отдела управления персоналом
10 Процесс мониторинга удовлетворенности заказчика качеством продукции	Директор по сбыту и сервисному обслуживанию	Руководитель службы качества

Понимание взаимодействия логистических процессов с процессами производства очень важно для обеспечения эффективного функционирования механизма управления качеством процессов логистики. Согласно разработанной функциональной модели процессы управления качеством соответствуют содержанию логистической деятельности на всех этапах жизненного цикла продукции таких как: маркетинг, проектирование, разработка, изготовление, оценка, отгрузка и эксплуатация продукции, и, сле-

довательно, а также задачам системы организации производства [15].

Сформулированный вывод позволил провести классификацию функций, интеграция которых обеспечивается с помощью функционирования механизма управления качеством процессов логистики, структура которого разработана с учетом содержания логистических и производственных процессов (табл. 3).

Таблица 3

Классификация и интеграция функций, реализуемых в механизме управления качеством процессов логистики

Функции в системе общего менеджмента	Функции в системе организации производства	Функции механизма управления качеством процессов логистики
1. Планирование стратегий и целей развития, формулировка оперативных целей и задач	Принятие решений, позволяющих обеспечить качество организации процессов производства, уменьшить риск неопределенности и улучшить адаптацию к изменениям с учетом оптимального распределения и использования ресурсов, а также стандартов производственной деятельности	Определение возможности обеспечить требуемый потребителем уровень качества, планирование качества процессов логистики и процедур измерения качества, оценка целесообразности улучшения качества процессов и совершенствования логистической деятельности
2. Организация управления предприятием, построение структуры системы и функциональных подсистем	Проектирование структуры системы организации производства, организация процессов в пространстве и во времени, построение инфраструктуры предприятия с учетом условий внутренней и внешней среды	Формирование структуры механизма управления качеством процессов логистики, идентификация ответственности персонала за качество, организация работы команды по межфункциональному управлению, делегирование полномочий командам по принятию корректирующих и предупреждающих мер.
3. Мотивация с целью стимулирования внедрения инноваций в управление деятельностью предприятия с целью повышения конкурентоспособности продукции	Создание внутренней мотивационной среды, побуждающей работников к участию в управлении качеством, проектирование мотивационной структуры на предприятии	Мотивация внутреннего побуждения персонала к участию в командах по межфункциональному управлению качеством процессов логистики, создание условий для вовлеченности персонала в процессы обучения и повышения компетентности в области улучшения качества процессов логистики.
4. Измерение и оценка результатов выполнения всех процессов и видов деятельности на предприятии	Разработка процедуры измерения и оценки качества результатов производственной деятельности, принятие и внедрение корректирующих действий для ликвидации выявленных ошибок и недостатков в производственных процессах	Разработка процедур мониторинга и измерения качества процессов логистики, планирование технологии контроля внутренних и внешних условий логистической деятельности, оценка эффективности корректирующих мер и мер по улучшению качества процессов логистики

Для эффективной интеграции указанных функций целесообразно следовать следующим принципам:

1. Предприятие создается и работает для производства продуктов (услуг), удовлетворяющих потребности и нужды потребителей (заказчиков), что оказывает влияние на устойчивость его развития.

2. Качество продукции определяет конечный потребитель (заказчик), и его оценка подтверждает-ся фактом принятия поставленной продукции.

3. Потребности и ожидания потребителей изменяются и, следовательно, необходимо проводить постоянный мониторинг условий внутренней и внешней среды, а также вносить изменения в процессы производства и логистики.

4. При планировании и реализации изменений целесообразно учитывать компоненты производственного и логистического потенциала предприятия.

Процедуры интеграции управления качеством процессов логистики можно описать с помощью следующих функций:

1. Планирование качества – установление показателей и критериев качества операционных процессов логистики, реализуемых по этапам жизненного цикла продукции, определение необходимых ресурсов для достижения целей управления качеством процессов логистики.

2. Идентификация (установление и закрепление) ответственности за качество процессов логистики между участниками процессов и командами по межфункциональному управлению качеством.

3. Управление качеством – действия, направленные на создание и поддержание условий выполнения установленных требований к качеству процессов логистики.

4. Обеспечение качества – действия, связанные с мониторингом (измерением, оценкой и анализом) текущих параметров качества процессов логистики.

5. Улучшение качества – действия, связанные с увеличением способности процессов логистики выполнить установленные и предполагаемые требования к качеству результатов.

6. Валидация – подтверждение посредством представления объективных свидетельств того, что требования к качеству процессов логистики и к качеству их результатов были выполнены.

7. Верификация – подтверждение посредством представления объективных свидетельств того, что требования к качеству полученного результата одного процесса логистики соответствует требованиям к качеству последующего, взаимосвязанного процесса логистики.

Следует отметить, что управление выполнением каждой функции или осуществлением процесса логистики необходимо организовать в соответствии с известным в теории и практики менеджмента качества методом Э. Деминга «PDCA»: планирование, выполнение, измерение, улучшение [5].

#### **Полученные результаты**

Из вышесказанного следует, что каждую функцию управления качеством можно связать с определенным процессом логистики, т.к. при ее осуществлении происходит преобразование входов в выходы, которые должны удовлетворить ожидания внутреннего и внешнего потребителя, а также создать оптимальные условия для осуществления всех процессов логистики, реализуемых в логистической системе предприятия.

Таким образом, предложенный подход к интеграции управления качеством позволяет выделить общие и специфические функции и процессы в системе управления логистической деятельностью, и описать их с учетом требований и содержания функций управления качеством процессов логистики.

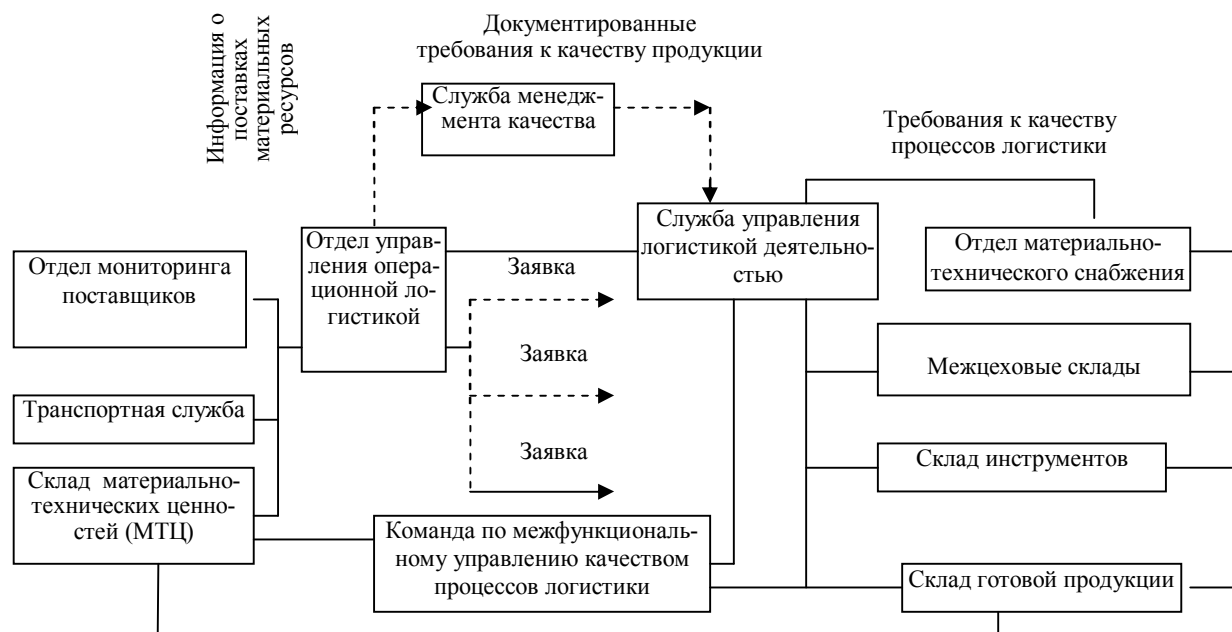
При идентификации и выборе функций управления качеством необходимо учитывать, что осуществление каждой из них можно описать циклом (замкнутость действий), а также, что все функции должны быть сбалансированы и способствовать эффективному функционированию механизма управления качеством процессов логистики и постоянному совершенствованию методов и средств реализации функций [12].

Для обеспечения эффективного функционирования механизма управления качеством процессов логистики необходимо организовать постоянный мониторинг процессов, позволяющий своевременно вносить корректирующие меры в процессы логистики для устранения выявленных отклонений. Ответственность за организацию мониторинга целесообразно идентифицировать участникам команды по межфункциональному управлению качеством процессов логистики.

Общая схема проведения мониторинга процессов логистики с целью своевременного выявления и устранения причин отклонений, приведена на рис. 3.

Из приведенной схемы организации мониторинга процессов логистики следует, что для описания процедур мониторинга на каждом из этапов логистической деятельности необходимо использовать входную и выходную информацию. Входная информация включает: технические условия, документацию по управлению процессами логистики, операционные карты, карты качества процессов логистики и т.д. Выходная информация включает: данные по результатам диагностики процессов логистики, отчеты о внутренних аудитах и протоколы квалификационной аттестации работников, сводные таблицы показателей оценки качества логистических процессов и т.д. На основе сравнения входной и выходной информации вырабатывается решение о необходимости улучшения качества процессов логистики и совершенствования управления логистической деятельностью на предприятии.

Следует отметить, что одним из методов мониторинга процессов является внутренний аудит, требования к проведению которого изложены в стандарте ИСО 9001-2015 [2]. По содержанию аудит и мониторинг процессов идентичны и имеют единые цели, которые заключаются в том, что проводится доказательство соответствия запланированных мероприятий по улучшению качества процессов логистики фактическому состоянию дел по управлению логистической деятельностью на предприятии. При этом программы аудитов должны составляться с учетом важности и приоритетности логистических процессов, а также отдельных этапов работ, подлежащих обязательной проверке для устранения несоответствий и отклонений в процессах логистики.



Информация о движении материальных ресурсов (МР)

Рис. 3. Схема проведения мониторинга процессов логистики

Описание содержания мониторинга качества стической деятельностью приведено в табл. 4. процессов логистики по этапам управления логи-

Таблица 4

Содержание процедур мониторинга процессов логистики

Этап управления логистикой	Содержание процедур и методов мониторинга качества процессов логистики
1 Планирование процессов логистики	- определение целей в области качества, - определение потребности в ресурсах для логистических процессов, - составление карт процедур верификации и валидации, - планирование аудита процессов логистики
2 Управление взаимоотношениями с заказчиками	- идентификация требований потребителя к качеству, - оценка возможности по обеспечению качества, - анализ возможностей выполнения заказа в соответствии с установленными требованиями к качеству
3 Управление взаимоотношениями с поставщиками	- оценка возможности поставщика обеспечить качество поставки МТЦ, - выбор поставщика и заключение договора на поставку, - контроль выполнения договора поставки
4 Управление складированием и хранением	- контроль и корректировка условий хранения, - мониторинг техники и технологии хранения, - контроль параметров качества МТЦ на входе и выходе перед отпуском со склада
5 Управление операционной логистикой (распределения)	- построение цепочек движения МТЦ по этапам производства, - выбор точек контроля качества операций логистики, - идентификация средств измерения с целью установления статуса калибровки, - идентификации ответственности за качество при выполнении операций распределения МТЦ по этапам производства
6 Управление складированием готовой продукции	- мониторинг условий хранения, - мониторинг сопроводительной документации, - оценка качества готовой продукции, - мониторинг выполнения плана отгрузки продукции потребителю (заказчику)
6 Измерение, анализ результатов логистической деятельности	- оценка соответствия процессов установленным параметрам качества, - мониторинг функционирования механизма управления качеством процессов логистики, - оценка соответствия запланированных мероприятий по улучшению качества процессов логистики
7 Управление несоответствиями в процессах логистики	- мониторинг действий с целью устранения обнаруженного отклонения в процессах логистики, - идентификация возможности предупреждения причин отклонений и несоответствий в процессах логистики, - мониторинг целесообразности улучшения качества процессов логистики

Следует отметить, что процедуры мониторинга являются инструментом обеспечения эффективного функционирования механизма управления качеством процессов логистики [13].

Следовательно, для реализации механизма управления качеством логистических процессов необходимо осуществить следующие действия:

- выявить и описать процессы логистики, определить критерии оценки качества процессов логистики,
- определить последовательность процессов логистики их взаимосвязь,
- построить цепочки процессов логистики с учетом содержания основных процессов, реализуемых в производственной системе предприятия,
- выявить и описать ресурсы и определить источники информации, необходимые для управления качеством процессов логистики,
- организовать постоянный мониторинг процессов логистики, а также разработать и реализовать мероприятия по улучшению качества логистических процессов.

### Заключение

Решению поставленных задач во многом способствует организация команды по межфункциональному управлению качеством процессов логистики, которая должна состоять из представителей каждого подразделения логистической службы предприятия. Основной целью работы команды является обеспечение эффективных коммуникаций между этапами логистической деятельности и управление взаимодействием подразделений и процессов логистики. Для координации работы команды необходимо разработать алгоритм действий и обеспечить каналы обратной связи между командой и участниками различных процессов логистики.

Основными задачами работы команды являются диагностика параметров качества процессов логистики, анализ и решение проблем, возникших в логистической деятельности. Кроме того, жесткая идентификация ответственности между участниками команды по межфункциональному управлению качеством процессов логистики позволит обеспечивать качество перемещаемых ресурсов по этапам производства и качество конечного результата деятельности предприятия [9].

Для решения поставленных задач необходимо в рабочей инструкции каждого участника команды четко описать обязанности и ответственность за обеспечение качества процессов логистики. Это позволит реализовать принцип взаимответственности за качество, способствующий интеграции процессов в логистической системе предприятия.

При организации деятельности команды по межфункциональному управлению качеством процессов логистики необходимо выполнить следующие действия:

- обеспечить поддержку со стороны руководства логистической службы и руководства службы качества,
- оформить план мероприятий по созданию и организации деятельности команды,

- установить роль команды в механизме управления качеством процессов логистики,
- обучить работников методам мониторинга и статистическим методам контроля,
- разработать матрицу идентификации ответственности за реализацию функций по управлению качеством процессов логистики.

Важной задачей также является обеспечение вовлеченности всего персонала логистической службы предприятия в деятельность по управлению качеством процессов логистики. Вовлеченные работники должны нести персональную ответственность за разработку и реализацию мероприятий по совершенствованию своей деятельности [4]. Решение поставленной задачи требует активного практического участия руководителей всех подразделений логистической службы предприятия.

Таким образом, формирование и реализация механизма управления качеством процессов логистики с учетом содержания процессного подхода позволяет эффективно использовать принцип всеобщей ответственности за качество процессов при принятии решений по постоянному улучшению качества.

### Литература

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2010. Система менеджмента качества. Основные требования. М.: Стандартинформ. 2010.
2. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Система менеджмента качества. Основные требования. М.: Стандартинформ. 2015.
3. Качалов, В.А. Процессы СМК: выделение, классификация, мониторинг, измерение, валидация / В.А. Качалов. - М.: РИО «Стандарты и качество», 2015. - 531 с.
4. Центр консалтинга обучения Всероссийской организации качества. (ЦКО ВОК) [Электронный ресурс]: Режим доступа: [www.ckovok.ru](http://www.ckovok.ru)
5. Гаджинский, А.М. Основы логистики / А.М. Гаджинский. -М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2012. — 484 с.
6. Каблашова, И.В. Инновационное развитие организации производства и управления качеством на основе процессного подхода / И.В. Каблашова // Организатор производства. - 2015. - № 4. - С. 58-64.
7. Краснова, В.М. Методология применения процессного подхода (Опыт практической реализации) / В.М. Краснова // Стандарты и качество. - 2013. - №6. С. 22-28.
8. Каблашова, И.В. Совершенствование организации производства в условиях инновационного развития системы менеджмента качества / И.В. Каблашова, Ю.А. Саликова // Вестник государственного университета инженерных технологий. - 2016. - №4. - С.421-435.
9. Чайка, Н.И. TQM – основа интегральной системы качества / Н.И. Чайка // Методы менеджмента качества. - 2015.-№ 6. - С.32-42.
10. Rampersad Н.К. Total Quality Menagment. An Executive Guide Springer/ Н.К. Rampersad. – Verlag, 2014.
11. Каблашова, И.В. Методология всеобщей ответственности за качество: теория, методы и инструментарий использования на предприятии: монография / И.В. Каблашова, А.А. Цуканова. Воронеж: ФГБОУ ВПО ВГТУ, 2011. 193 с.
12. Ковалев, А.И. Менеджмент качества. Многое в немногих словах / А.И. Ковалев. –М.: РИА «Стандарты и качество», 2012.-136с.

13. Bochm B.M. A spiral Model of Software Development and Enhancement ACM SLGFT Software Engineering Notes/ B.M. Bochm. Aug, 2011.

14. Курц, А.Л. Процессное управление - основа построения систем контроля и управления информационно-

технологической инфраструктурой / А.Л. Курц // Системы и средства информатики. - 2013. - Т. 19. - № 2. - С. 148-162.

Воронежский государственный технический университет

## DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF QUALITY MANAGEMENT OF LOGISTICS PROCESSES AT A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE

O.G. Turovets<sup>1</sup>, I.V. Kablashova<sup>2</sup>, V.N. Rodionova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: oskar-turovets@yandex.ru

<sup>2</sup>Full Doctor, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: kablashowa@yandex.ru

<sup>3</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: rodionovavn2011@yandex.ru

The article considers a methodological approach to the formation of a quality management mechanism for logistics processes, taking into account the recommendations of the international system of standards for quality management. The results of research into the content of the activity on quality management of logistics processes are reflected, the classification of functional logistics processes is given and a process-oriented scheme for implementing documented procedures for quality management of logistics processes is formed. Taking into account the content of the logistic activity of the enterprise, the functional structure of the mechanism for managing the quality of logistics processes has been developed, the content of the principal provisions and stages of work necessary for the development and operation of the mechanism has been disclosed. The matrix for identifying the responsibility for ensuring the quality of logistics processes has been formed. Taking into account the principle of the process approach, a process-oriented structure of the quality management mechanism for the logistics processes is built. The expediency of integrating the functional processes realized within the production management system and the quality management mechanism of the logistics processes is justified. To ensure the functioning of the mechanism, a scheme is proposed for monitoring the logistics processes with a view to timely identifying and eliminating the causes of deviations in the processes. The content of documented procedures used in monitoring logistics processes is described in the context of the content of logistics activities. The necessity in organizing a multifunctional team for quality management of logistics processes, which includes representatives of each division of the logistics service of the enterprise, is substantiated. It is substantiated that the rigid identification of responsibility between employees in the composition of a multifunctional team for ensuring the quality of the logistics processes will ensure the quality of the transferred resources by the production stages and the quality of the final result of the enterprise

Key words: management, quality, monitoring, process-oriented structure

### References

1. GOST R ISO 9001-2010 "Quality management system. Basic requirements", Moscow, Standardinform, 2010.
2. GOST R ISO 9001-2015 "Quality management system. Basic requirements", Moscow, Standardinform, 2015.
3. Kachalov V.A. "QMS processes: selection, classification, monitoring, measurement, validation", Moscow, The Advertising Informational Agency «Standards and Quality», 2015, 531 p.
4. "Center for consulting training of the All-Russian Organization of Quality" ("Tsentri konsaltinga obucheniya Vserossiyskoy organizatsii kachestva"), available at: [www.ckovok.ru](http://www.ckovok.ru)
5. Gadzhinskiy A.M. "Basics of logistics" ("Osnovy logistiki"), Moscow, Publishing and Trading Corporation "Dashkov i K", 2012, 484 p.
6. Kablashova I.V. "Innovative development of organization of production and quality management on the basis of a process approach, *Organizator proizvodstva*, 2015, no. 4, pp. 58-64.
7. Krasnova V.M. "Methodology of the application of the process approach (Practical implementation experience)", *Standards and quality*, 2013, no. 6, pp. 22-28.
8. Kablashova I.V., Salikova Yu.A. "Perfectioning of production organization in the conditions of innovative development of the quality management system", *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2016, no. 4 pp.421-435.
9. Chayka N.I. "TQM - the basis of the integrated quality system", *Methods of quality management*, 2015, no. 6, pp.32-42.
10. Rampersad H.K. "Total Quality Management. An Executive Guide Springer", Verlag, 2014.
11. Kablashova I.V., Tsukanova A.A. "Methodology of universal responsibility for quality: theory, methods and tools for using at an enterprise: Monograph" ("Metodologiya vseobshchey otvetstvennosti za kachestvo: teoriya, metody i instrumentariy ispol'zovaniya na predpriyatii: Monografiya"), Voronezh, VSTU, 2011, 193 p.
12. Kovalev A.I. "Quality management. Much in a few words" ("Menedzhment kachestva. Mnogoe v nemnogikh slovakh"), Moscow, The Advertising Informational Agency «Standards and Quality», 2012, 136 p.
13. Bochm B.M. "A spiral Model of Software Development and Enhancement. ACM SLGFT Software Engineering Notes", Aug, 2011.
14. Kurts A.L. "Process management - the basis for building systems for monitoring and managing information technology infrastructure", *Systems and Means of Informatics*, 2013, vol. 19, no. 2, pp. 148-162.

## УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ СВАРНЫХ ТИТАНОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ОКИСЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Б.А. Коломенский

В данной работе оценено воздействие оксидных плёнок, формирующихся в процессе отжига в интервале температур 350-650 °С, на ударную вязкость сварных соединений листовых титановых сплавов. Исходные листовые заготовки имели регламентированные газонасыщенные подслои различной микротвёрдости. Стыковые сварные швы на листовых заготовках с целью исключения фактора перепада кромок имитировали сквозным проплавлением заготовок на автомате неплавящимся электродом без присадки с местной защитой аргоном. После сварки из заготовок вырезали образцы для испытаний на ударную вязкость (КСУ) согласно ГОСТ 6996-66. Центр надреза Ø2 мм располагали на расстоянии 1 мм от линии сплавления. В заключение образцы подвергали одночасовому воздушному финишному отжигу. Показано, что оксидная плёнка, образующаяся после низкотемпературного отжига, способствует росту ударной вязкости технического титана ВТ1-0. Повышение температуры финишного отжига снижает значения КСУ технического титана до исходного состояния без отжига. Для высокопрочного сплава ВТ6ч отмечено полезное влияние на ударную вязкость состояния поверхности после отжига при 650 °С. Отмечено, что преобладающее влияние на характер зависимости ударной вязкости от температуры отжига оказывают внутренние структурные изменения, протекающие при отжиге, а не состояние поверхности

Ключевые слова: титановые сплавы, сварка, оксидные плёнки

При нагреве титановых сплавов выше 300 °С на поверхности формируются интерференционно окрашенные оксидные плёнки, а при температурах выше 550 °С начинается заметное растворение кислорода в титан, что может приводить как к падению [1,2], так и к росту [3,4] механических характеристик металла.

Одной из важных механических характеристик является ударная вязкость металла. В работе [5] было показано, что для титановых сплавов низкой и средней прочности проявляется эффект роста ударной вязкости при температуре финишного отжига 450 °С, что связано с полезным влиянием оксидной плёнки, повышающей работу по зарождению и распространению трещины. Данный эффект проявляется как при наличии, так и при отсутствии поверхностных газонасыщенных слоев.

Полученные сведения могут быть полезны при оптимизации технологических параметров процесса получения титановых полуфабрикатов, а также при назначении режимов финишного отжига деталей из листовых титановых сплавов. При этом, однако, отсутствуют данные, как будут воздействовать оксидные плёнки и газонасыщенные слои на сварные соединения и, в частности, металл с крупнозернистой β-превращённой структурой, формирующейся в зоне термического влияния (ЗТВ).

Цель работы - изучение воздействия газонасыщения и оксидных плёнок на ударную вязкость зоны термического влияния листовых титановых сплавов.

В работе использовали листовые сварные образцы сплава ВТ6ч толщиной 0,8 мм и технического титана ВТ1-0 толщиной 1,2 мм. Заготовки под сварку подвергали отжигу по режимам 800 °С, 2 ч. (ВТ1-0) и 850 °С, 1 ч. (ВТ6ч) для формирования газонасыщенных слоев глубиной ~ 100 мкм [5, рис. 1]. Далее по методике [5] производили послойное удаление газонасыщенного слоя и аргоно-дуговую сварку заготовок.

Стыковые сварные швы на листовых заготовках с целью исключения фактора перепада кромок имитировали сквозным проплавлением заготовок на автомате АРК-2 неплавящимся электродом без присадки с местной защитой аргоном (ААрДЭС) на скорости  $V_{св} = 40$  м/ч.

После ААрДЭС из заготовок вырезали образцы для испытаний на ударную вязкость (КСУ) согласно ГОСТ 6996-66, надрез с радиусом 1 мм выполняли с помощью сверла Ø 2 мм. Центр надреза располагали в центре шва и в ЗТВ на расстоянии  $\sim 1 \pm 0,1$  мм от линии сплавления рис. 1. В заключение образцы подвергали одночасовому воздушному финишному отжигу при температурах 350-650 °С.

---

Коломенский Александр Борисович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор; ВАСО, главный металлург, e-mail: metallurg@air.vrn.ru

Шахов Сергей Викторович – ВАСО, ведущий инженер-конструктор, e-mail: shahovsv@gmail.com

Коломенский Борис Александрович – ВАСО, канд. техн. наук, помощник директора по качеству, e-mail: b-kolomenskiy@air.vrn.ru



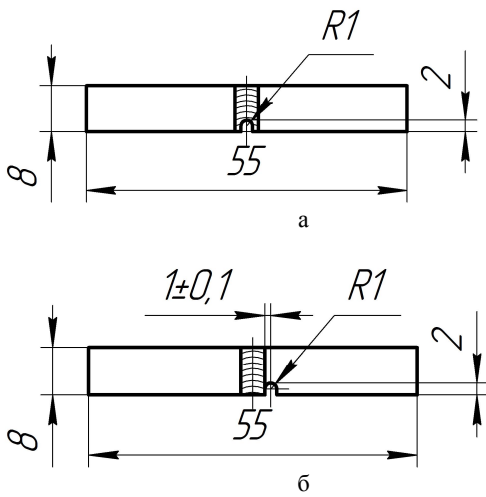
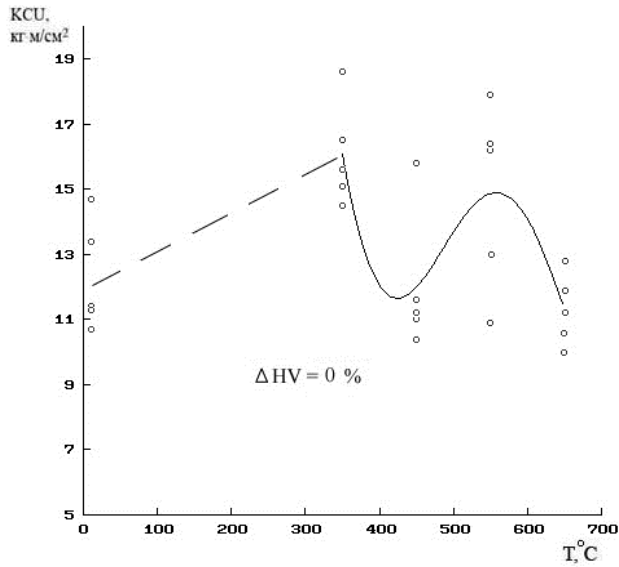
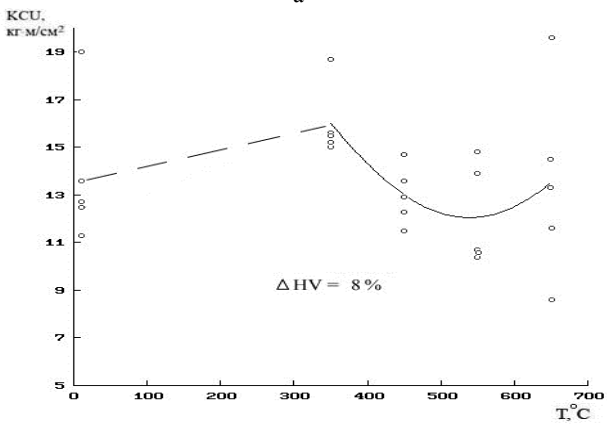


Рис. 1. Образцы для испытаний на ударную вязкость по ГОСТ 6996-66: а – с концентратором по центру шва; б – с концентратором в ЗТВ на расстоянии  $1,0 \pm 0,1$  мм от линии сплавления

На рис. 2 и 3 приведены результаты испытаний образцов в ЗТВ на ударную вязкость.

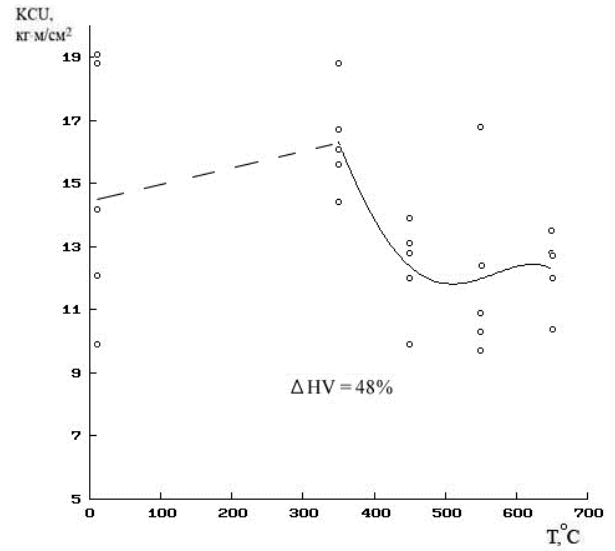


а

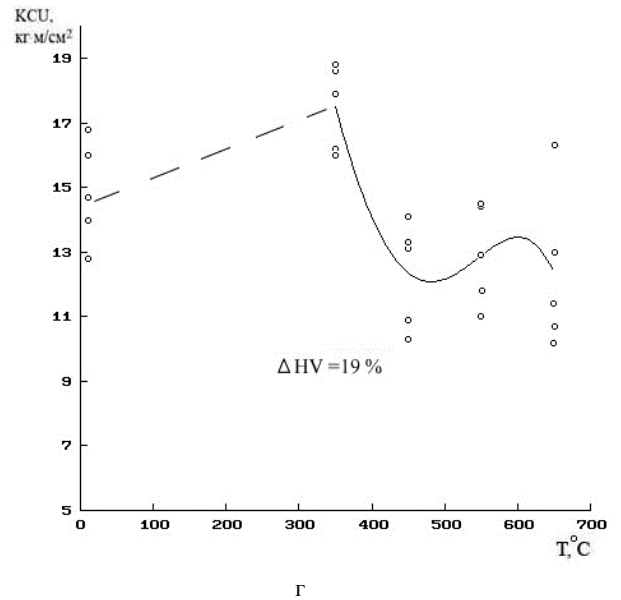


б

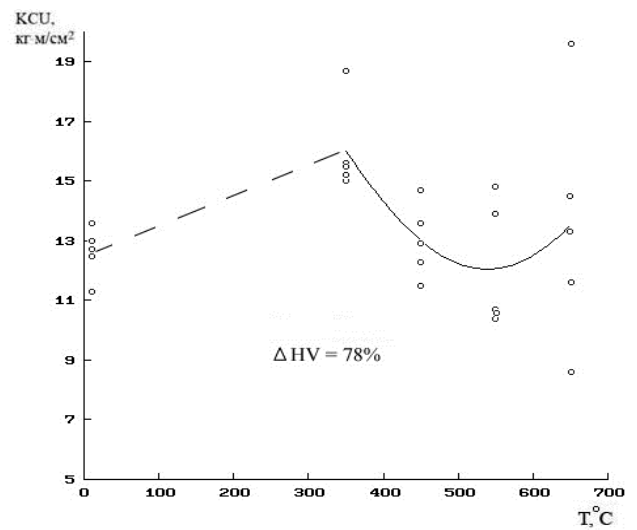
Рис. 2. Зависимости  $KCU=f(T)$  для ЗТВ технического титана ВТ1-0 при  $\Delta HV$ , %: а – 0 %; б – 8 %; в – 19 %; г – 48 %; д – 78 %; е – 112 %



в

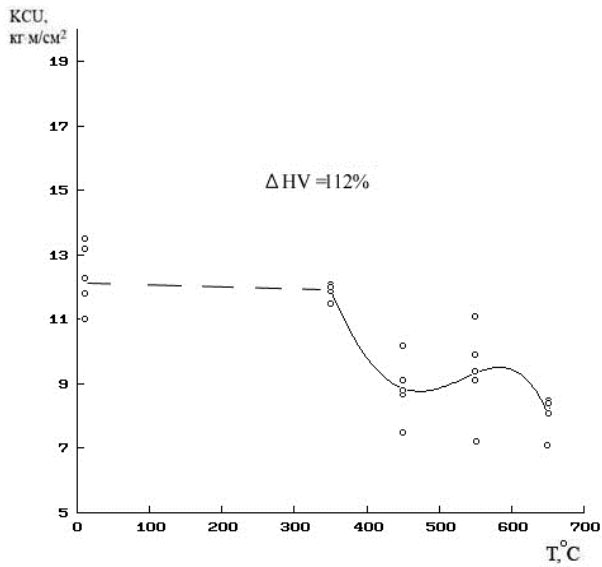


г



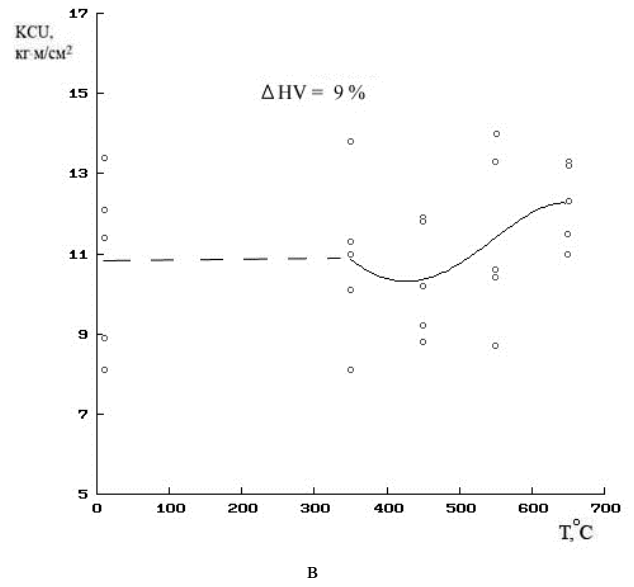
д

Рис. 2. Зависимости  $KCU=f(T)$  для ЗТВ технического титана ВТ1-0 при  $\Delta HV$ , %: а – 0 %; б – 8 %; в – 19 %; г – 48 %; д – 78 %; е – 112 % (продолжение)

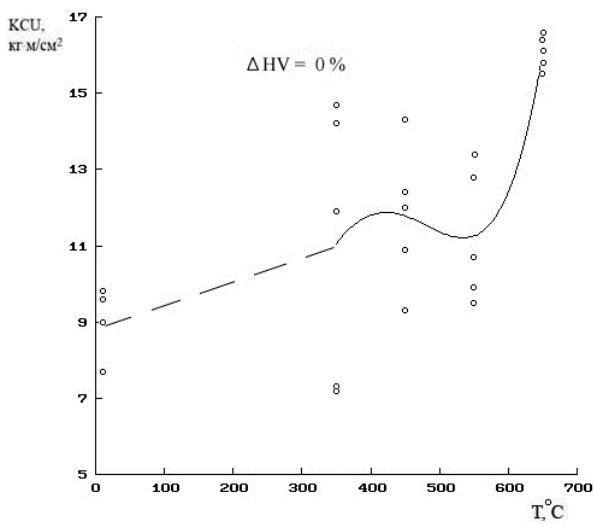


е

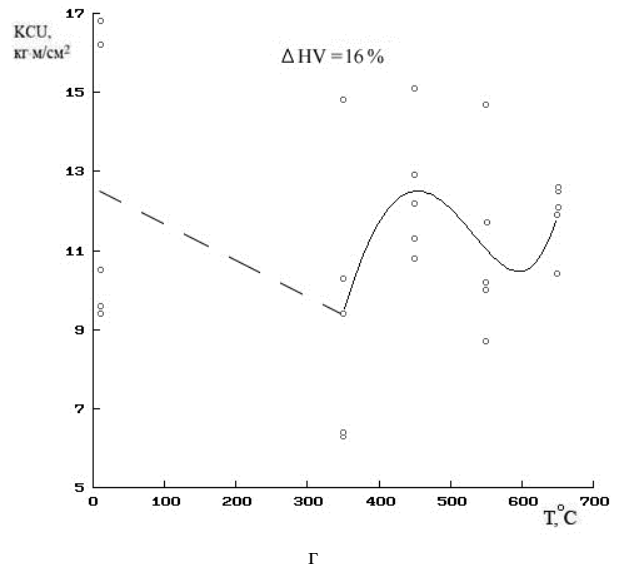
Рис. 2. Зависимости  $KCU=f(T)$  для ЗТВ технического титана ВТ1-0 при  $\Delta HV$ , %: а – 0 %; б – 8 %; в – 19 %; г – 48 %; д – 78 %; е – 112 % (окончание)



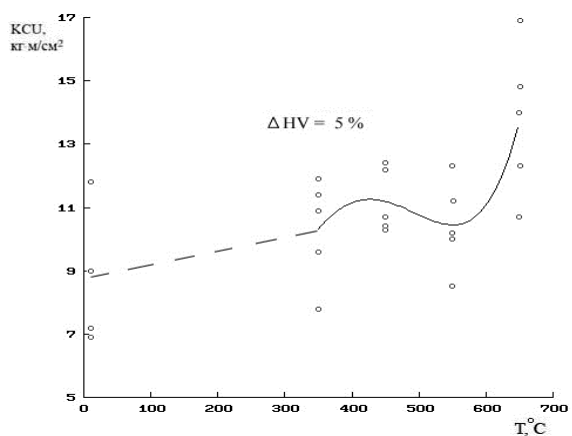
в



а

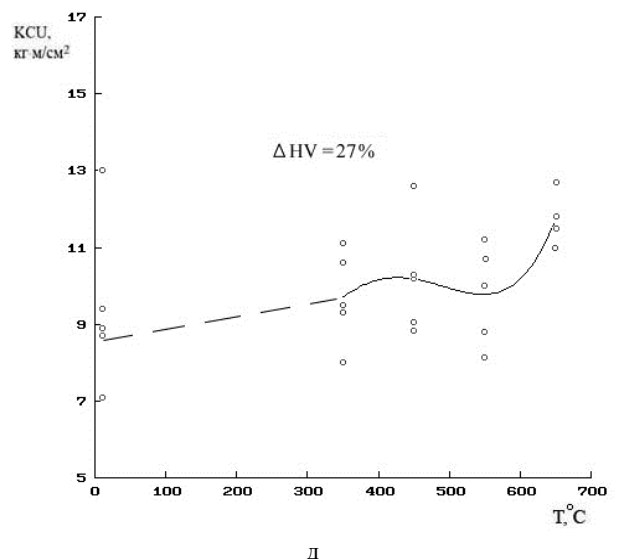


г



б

Рис. 3. Зависимости  $KCU=f(T)$  для ЗТВ сплава ВТ6ч при  $\Delta HV$ , %: а – 0 %; б – 5 %; в – 9 %; г – 16 %; д – 27 %; е – 68 %



д

Рис. 3. Зависимости  $KCU=f(T)$  для ЗТВ сплава ВТ6ч при  $\Delta HV$ , %: а – 0 %; б – 5 %; в – 9 %; г – 16 %; д – 27 %; е – 68 % (продолжение)

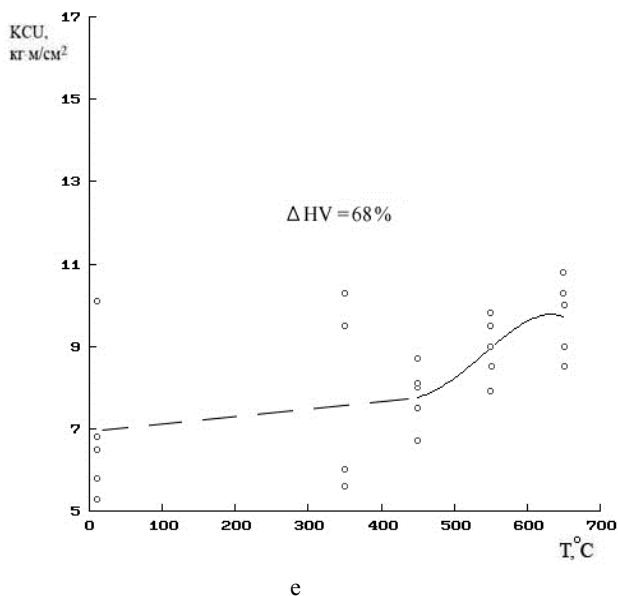


Рис. 3. Зависимости  $KCU=f(T)$  для ЗТВ сплава ВТ6ч при  $\Delta HV$ , %: а – 0 %; б – 5 %; в – 9 %; г – 16 %; д – 27 %; е – 68 % (окончание)

Видно, что для технического титана КСУ имеет максимум при температуре отжига 350 °С для перепадов микротвёрдости поверхности по отношению к сердцевине  $\Delta HV=0\text{...}112$  %. Следует отметить, что для основного металла зафиксирован устойчивый максимум при  $T=450$  °С [5]. Наибольший эффект повышения КСУ приходится на варианты без газонасыщенного подслоя – рост КСУ на ~30 %. Характерно, что для варианта без газонасыщенного подслоя выявляется максимум при  $T=550$  °С.

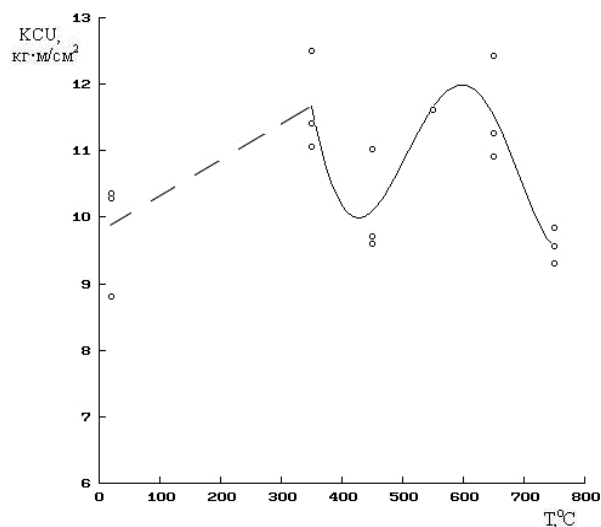
Повышение температуры финишного отжига выше 350 °С в целом снижает значения КСУ до исходного состояния. При этом видно, что рост температуры отжига от 450 до 650 °С практически не вызывает снижения КСУ. Данная закономерность обнаруживается для газонасыщенных слоёв с  $\Delta HV=8\text{--}78$  %.

Для слоя с  $\Delta HV=112$  % финишный отжиг с  $T=450$  до 650 °С вызывает заметное (до 30 %) падение КСУ.

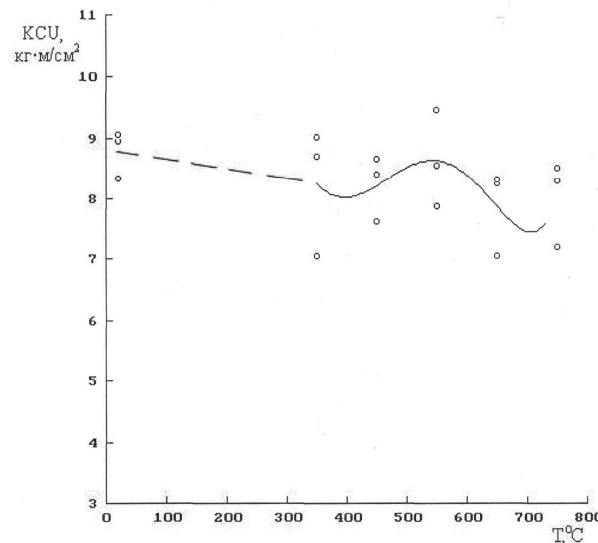
Для высокопрочного титанового сплава ВТ6ч повышение температуры финишного отжига до 650 °С в целом вызывает рост ударной вязкости. Особенно заметно данная тенденция проявляется для вариантов без газонасыщенного слоя ( $\Delta HV=0$  %) и с небольшим газонасыщенным подслоем ( $\Delta HV=5$  %): рост показателя КСУ в этих случаях составляет 60...70 % в сравнении с вариантом без финишного отжига.

Следует учесть, что при изучении влияния температуры финишного отжига на показатель КСУ сварных соединений воздействуют два фактора: изменение состояния поверхности (окисление и газонасыщение) и внутренние структурные изменения. Металл ЗТВ после однопроходной аргонодуговой сварки можно рассматривать как закаленный из  $\beta$ -области. При отжиге такого

металла происходит распад метастабильных  $\beta$ - и  $\alpha'$ -фаз, зафиксированных в процессе ускоренного охлаждения при однопроходной аргонодуговой сварке. Поэтому целесообразно было сравнить полученные результаты на рис. 2а и 3а с результатами испытаний аналогичных сварных соединений соответственно на рис. 4а и 4б [6], которые перед испытаниями прошли облагораживающее травление с целью исключения влияния фактора окисления поверхности.



а



б

Рис. 4. Зависимости  $KCU=f(T)$  для сварных соединений прошедших после отжига облагораживающее травление на глубину 50 мкм для удаления газонасыщенного подслоя: а – для технического титана ВТ1-0; б – для сплава ВТ6ч

Из сравнения видно, что ход зависимостей  $KCU=f(T)$  определяется, в целом, влиянием фактора внутренних структурных изменений.

Путём сопоставления кривых с травленной после отжига и нетравленной поверхностью выявлено заметное положительное влияние оксидной плёнки: для титана ВТ1-0 – после отжига при 350 °С, а для ВТ6ч – во всём исследованном

диапазоне  $T=350...650$  °C. Особенно заметно повышение KCU после отжига с  $T=650$  °C.

Выполняли также отверстие и по центру сварного шва после операции проплавления перед финишным отжигом. В данном случае кислород газонасыщенного поверхностного слоя перемешивался в сварном шве, что незначительно повышало его среднюю концентрацию и практически не влияло на твёрдость шва; имевшиеся газонасыщенные слои составляли от 3 до 13% от общей толщины образцов.

И для титана VT1-0, и для сплава VT6ч не обнаружено заметного влияния на KCU некоторого легирования металла шва кислородом, перешедшим в сварной шов при перемешивании поверхностного газонасыщенного слоя.

#### Выводы

1. Установлено, что оксидные плёнки, формирующиеся в процессе финишного отжига, могут повышать ударную вязкость сварных соединений из титановых сплавов.

Полученные данные могут быть использованы при выборе режимов отжига сварных титановых листовых изделий, работающих в условиях динамического нагружения.

2. Для сварных соединений технического титана показатель KCU имеет максимум при температуре финишного отжига 350 °C.

Данная закономерность имеет место как для металла без газонасыщенного слоя, так и при его наличии при значении  $\Delta HV$  вплоть до 78%.

Из сравнения с металлом с удалённым окисленным слоем следует, что оксидная плёнка, формирующаяся при  $T = 350$  °C, оказывает полезное влияние на показатель KCU металла ЗТВ.

3. Для высокопрочного сплава VT6ч при наличии небольших ( $\Delta HV \leq 5\%$ ) газонасыщенных слоёв также выявлено полезное влияние на ударную вязкость оксидных плёнок, формирующихся при отжиге при температурах 350... 650 °C. Особенно большой рост KCU обнаруживается после отжига с  $T=650$  °C, когда начинается заметное растворение кислорода в титане.

#### Литература

1. Колачев, Б.А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин. – М.: Металлургия, 1981. – 416 с.

2. Глазунов, С.Г. *Конструкционные титановые сплавы* / С.Г. Глазунов, В.Н. Моисеев. – М.: Металлургия. 1974. – 368 с. с ил.

3. Влияние регламентированного съёма травлением поверхностного газонасыщенного слоя на долговечность при малоциклового усталости листов из титана VT1-0/ А.Б. Коломенский, Б.А. Колачев, А.В. Дегтярев, А.Н. Рошупкин // *Технология легких сплавов*. – 1990. – №6. – С. 20–24.

4. Вавилова, В.В. Влияние кислорода на свойства титана и его сплавов / В.В. Вавилова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1973. – №10. – С. 10–14.

5. Коломенский, А.Б. Влияние газонасыщенных слоёв и оксидных плёнок на ударную вязкость титановых сплавов различных групп прочности / А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Б.А. Коломенский // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2017. – Т.13. - №2. – С.132-140.

6. Зубарев, В.Ю. Влияние мягких и жёстких режимов сварки на ударную вязкость сварных соединений титановых сплавов/ В.Ю. Зубарев, А.Б. Коломенский, Б.А. Коломенский // *Сварочное производство*. - 2010. - N 4. - С. 9-11.

Воронежский государственный технический университет  
Воронежское акционерное самолетостроительное общество

## IMPACT TOUGHNESS OF TITANIUM WELDED JOINTS WITH OXIDE FILMS

**A.B. Kolomenskiy<sup>1</sup>, S.V. Shakhov<sup>2</sup>, B.A. Kolomenskiy<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University; Chief Metallurgist, Voronezh Joint-Stock Aircraft Company, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: metallurg@air.vrn.ru

<sup>2</sup> Leading Engineer, Voronezh Joint-Stock Aircraft Company, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: shahovsv@gmail.com

<sup>3</sup> PhD, Assistant Quality Director, Voronezh Joint-Stock Aircraft Company, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: b-kolomenskiy@air.vrn.ru

In this paper, the effect of oxide films formed during annealing in the temperature range 350-650 ° C on the impact toughness of welded joints of sheet titanium alloys is estimated. The initial sheet blanks had regulated gas-saturated sublayers of various microhardness. Butt welds on the sheet blanks for the purpose of excluding the edge difference factor were imitated by the automatic through penetration with a non-consumable electrode without an additive with argon local protection. After welding, pieces for impact toughness testing (KCU) were cut from the blanks according to GOST 6996-66. The center of the notch  $\varnothing 2$  mm was located at the distance of 1 mm from the weld line. Finally, the samples were subjected to a one-hour air finish annealing. It is shown that the oxide film formed after low-temperature annealing contributes to the growth of the impact toughness of technical titanium VT1-0. An increase in the finishing annealing temperature reduces the KCU values of technical titanium to the initial state without annealing. For a high-strength alloy VT6ch, a beneficial effect of the surface state

after annealing at 650 ° C was noted. The prevailing influence on the nature of the dependence of the toughness on the annealing temperature is due to internal structural changes that occur during annealing, not the surface state

Key words: titanium alloys, annealing, oxide films

#### References

1. Kolachev B.A., Livanov V.A., Elagin V.I. "Metal science and heat treatment of nonferrous metals and alloys" ("Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i splavov"), Moscow, Metallurgia, 1981, 416 p.
2. Glazunov S.G., Moiseev V.N. "Structural titanium alloys" ("Konstruktsionnye titanovye splavy"), Moscow, Metallurgia, 1974, 368 p.
3. Kolomenskiy A.B., Kolachev B.A., Degtyarev A.V., Roshchupkin A.N. "Influence of regulated removal made by etching of the surface gas-saturated layer on the durability under the condition of low-cycle fatigue of titanium sheet", *Light alloys technology (Tekhnologiya lyegkikh splavov)*, 1990, no. 6, pp. 20–24.
4. Vavilova V.V. "Influence of oxygen on titanium and its alloys properties", *Metal science and heat treatment of metals (Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov)*, 1973, no. 10, pp. 10–14.
5. Kolomenskiy A.B., Shakhov S.V., Kolomenskiy B.A. "Effect of gas-saturated layers and oxide films on the impact toughness of titanium alloys of different strength grades", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2017, no. 2, pp. 132-140.
6. Zubarev V.U., Kolomenskiy A.B., Kolomenskiy B.A. "Effect of the soft and tough welding conditions on the impact toughness of titanium alloy welding joints", *Welding engineering (Svarochnoe proizvodstvo)*, 2010, no. 4, pp. 9-11.

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТРУИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

О.Н. Кириллов, В.П. Смоленцев

В статье представлен анализ возможной траектории движения струи в сочетании с анодным растворением поверхностного слоя при финишной гидроабразивной обработке геометрически сложных поверхностей, например лопаток двигателей летательных аппаратов. Для этого используется объемная модель профиля пера и переходные участки лопаток реактивных двигателей, турбокомпрессоров агрегатов ракетных двигателей и других видов турбомашин. Анализ показал, что предложенный комбинированный процесс является наиболее эффективным для деталей с ограниченным доступом в зону действия инструмента, где разработанный метод струйной обработки имеет значительные преимущества.

Создан математический аппарат для автоматизированного управления струей при обработке сложнопрофильных участков, что позволило сформировать траектории, описывающие плавные изгибы, заданные табличным методом (по точкам).

Анализ возможностей чистовой струйной обработки выполнен с учетом влияния на точность профиля допущений, принятых при разработке программного продукта. Показано, что при использовании современного оборудования для комбинированной струйной гидроабразивной обработки удастся обеспечить высокую точность, ускорить процесс технологической подготовки производства и расширить область эффективного применения комбинированной гидроабразивной обработки на наукоемкие изделия современной техники

Ключевые слова: струя, гидроабразивная комбинированная обработка, программный продукт, математический аппарат, траектория движения

### Введение

Одним из технологических методов снижения негативного силового воздействия лезвийного инструмента на эксплуатационные характеристики изделий является разработанный в последние годы метод гидроабразивной резки материала [1; 2; 3]. В процессе развития метода выявилась необходимость более точного контроля положения и управления струей. Решение такой задачи становится возможным путем создания программного продукта, реализуемого на современном оборудовании для комбинированной обработки. За счет этого удастся автоматизировать наиболее трудоемкую часть процесса - технологическую подготовку производства.

На рис. 1 показана схема рабочей головки для гидроабразивной обработки металлической детали воздействием струи с наложением электрического поля.

Как видно из рис. 1 обработка (например разделение) материала детали 4 происходит при комбинированном воздействии струи 2 с абразивными зёрнами (гранулами) 1 и анодного растворения продуктов обработки под действием источника постоянного тока 6 струей 5. Наложение электрического поля

обеспечивает увеличение скорости электрохимического растворения поверхности участка разделения детали, уменьшает величину дефектного слоя и шероховатость поверхности [4].

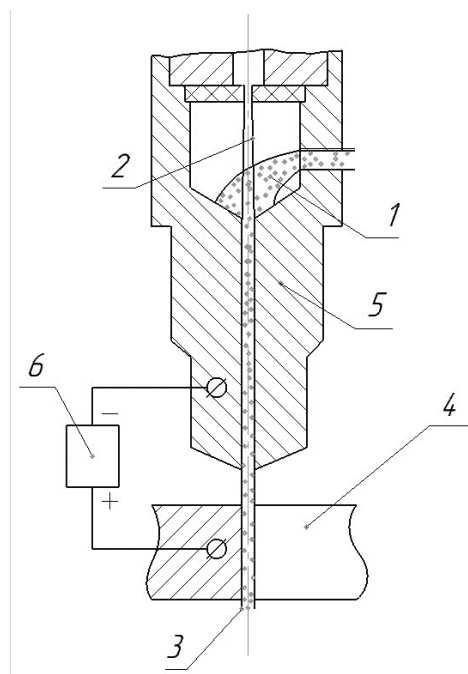


Рис. 1. Рабочая головка для подачи рабочей струи при гидроабразивной обработке: 1 - абразивные зёрна; 2-струя жидкости; 3-гидроабразивная струя; 4-обрабатываемая деталь; 5-металлическая головка корпуса; 6-источник тока

### Геометрия струи при комбинированной гидроабразивной струйной обработке

На рис. 2 показана схема комбинированной гидроабразивной обработки

Кириллов Олег Николаевич – ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, e-mail: [kirillov.oll@yandex.ru](mailto:kirillov.oll@yandex.ru)  
Смоленцев Владислав Павлович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: [vsmolen@inbox.ru](mailto:vsmolen@inbox.ru)

геометрически сложных поверхностей, например профиля пера лопатки реактивного двигателя

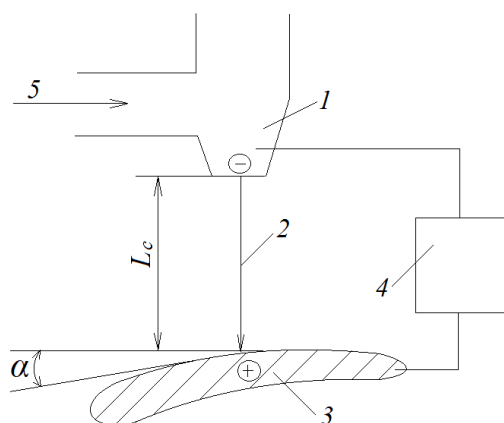


Рис. 2. Схема комбинированной гидроабразивной обработки: 1 – сопло для подачи рабочей среды; 2 – струя рабочей среды; 3 – заготовка (анод); 4 – источник постоянного тока; 5 – канал подачи токопроводящих абразивных частиц (гранул) и жидкости;  $L_c$  – длина струи;  $\alpha$  – угол атаки струи

На рис. 2 представлена схема комбинированной обработки, где съем происходит с участием электрического поля, создаваемого источником тока 4, и струи 2 длиной  $L_c$ .

Зависимость  $L_c$  по [5], рассчитывается по формуле:

$$L_c = Kcd_2 \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{L_n}} \right) \sqrt{\frac{W}{M_n}}, \quad (1)$$

где  $K_c$  – численный коэффициент, учитывает свойства рабочей среды. В [5] рекомендуется  $K_c = 14,8$ ;

$d_2$  – эквивалентный диаметр гранул абразива, мм;

$L_n$  – критерий Лапласа;

$W$  – критерий Вебера;

$M_n$  – критерий подобия.

Критерий Лапласа ( $L_n$ ) показывает соотношение сил вязкости и поверхностного натяжения.

По [5]:

$$L_n = \frac{D_c \gamma_c \sigma_c}{\mu_c}, \quad (2)$$

где  $D_c$  – диаметр сопла на срезе форсунки, мм;

$\gamma_c$  – средняя плотность рабочей среды в струе, кг/м<sup>3</sup>;

$\sigma_c$  – коэффициент поверхностного натяжения рабочей среды, Н/м;

$\mu_c$  – коэффициент динамической вязкости рабочей среды, Па·с.

Критерий Вебера учитывает величину скорости струи и поверхностное натяжение среды в струе.

$$W = \frac{v_c^2 \gamma_c D_c}{\sigma_c}$$

(3)

где  $v_c$  – скорость струи;  $\gamma_c$  – плотность материала гранул абразива, кг/м<sup>3</sup>.

Тогда критерий подобия выражается через соотношение плотностей материала гранул и рабочей среды

$$M_n = \frac{\gamma_c}{\gamma_c}$$

Длина  $L_n$  нераспавшейся части струи, где имеется возможность размерной обработки, по [5] составляет

$$L_n = Kcd_2 \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{D_c \gamma_c \sigma_c}{\mu_c}}} \right) \sqrt{\frac{v_c^2 D_c \gamma_c}{\sigma_c}} \quad (4)$$

Условием для размерной обработки является

$$L_c < L_n. \quad (5)$$

Здесь длина пути от среза сопла форсунки до места обработки заготовки  $L_c$  определяется при проектировании технологического процесса по чертежу детали.

Для управления размерным съемом, под действием струи с твердым абразивом, необходимо определить половину угла распыла струи ( $\alpha$ ), который зависит от давления струи (до давления  $p=100$  МПа). Если принять его на участке  $L_c$  постоянным, то по [5]:

$$\alpha = \arctg C L_c^b W^d M^c, \quad (6)$$

где  $C$  – экспериментальный коэффициент, учитывает условия течения струи на участке от среза сопла до точки обработки заготовки;

$b, d, c$  – показатели степени, учитывают динамические данные струи и свойства рабочей среды.

В [5] представлены результаты исследований течения струи при давлении до 100 МПа для форсунок имеющих диаметр сопла на срезе в диапазоне от 2,3 мм до 10,4 мм, при  $L_c = 300 - 1350$ ;  $W = 133 - 20000$ ;  $M = -2,8 - 0,0095$ . Получено  $C = 0,112$ ;  $b = 0,7$ ;  $d = 3,2$ ;  $c = 1,8$ .

Вследствие этого, при малых давлениях (до 100 МПа), на конечном этапе размерной обработки вектор струи (положение оси сопла) должен быть повернут относительно обрабатываемой поверхности на угол  $\alpha$ , рассчитываемый по (6).

При размерной обработке закрытых, труднодоступных для рабочей струи участков, необходимо обеспечить прохождение струи без касания ею необрабатываемых частей заготовки. Это осуществимо, если известен диаметр струи ( $D_c$ ) в зоне обработки, который определяется через площадь сечения сопла [4].

Критерием обеспечения показателей чистовой обработки без нарушения точности необрабатываемых участков является:

$$D_c \leq L_n, \quad (7)$$

где  $L_n$  - расстояние между противоположными сторонами обрабатываемого участка заготовки, одна из которых планируется для обработки.

Если в (7) условие не выполняется, то необходимо уменьшить размер  $L_c$  или  $D_c$ .

На интенсивность комбинированного гидроабразивного удаления припуска (скорость  $v_n$ ) влияют параметры электрического поля и расстояние  $L_c$ .

$$v_n = K_3 v_n L_c^{0.3}, \quad (8)$$

где  $K_3$  - коэффициент, учитывает изменение скорости съема припуска, содержащего шаржированный слой, анодного растворения материала в зоне обработки. Для деталей из стали  $K_3 = 1,3 - 1,5$ ;

$v_n$  - скорость съема припуска на ближайшем к соплу обрабатываемом участке заготовки. Рассчитывается аналогично положениям [6] для неподвижных электродов.

#### Давление струи при комбинированной обработке

В [5] приведены теоретические и экспериментальные исследования механизма комбинированной обработки участков,

удаленных от среза сопла до 90 мм. Показано, что в рассматриваемых случаях может использоваться давление до 100 МПа. Однако, для повышения производительности, необходимо повышать давление струи до 450 МПа, что вызывает дополнительные энергозатраты и увеличивает себестоимость операции.

По [7] сила действия струи  $P_c$  установившегося потока на твердую стенку под углом  $\beta$  зависит от параметров, изменяющихся в широких пределах. Здесь качественная картина процесса хорошо поясняется зависимостью

$$P_c = M v_c \sin \beta = Q_c \gamma_c v_c \sin \beta, \quad (9)$$

где  $M$  - масса рабочей среды, перемещаемая через форсунку в единицу времени (расход жидкости), г/с;

$Q_c$  - объемный расход рабочей среды, м<sup>3</sup>/с;

$\gamma_c$  - плотность рабочей среды, г/см<sup>3</sup>;

$v_c$  - скорость рабочей струи, м/с;

$\beta$  - угол атаки рабочей струи, град.

Струя служит инструментом как для гидроабразивной обработки, так и для анодного удаления припуска, поэтому, она рассчитывается из условия одновременного воздействия обеих факторов и давление для анодного процесса принимается как расчетная величина, полученная для гидроабразивной обработки.

При расчете параметров струи, при обработке сопрягаемых участков или кромок лопаток турбонасосных агрегатов, компрессоров, шнеков с переменным шагом, центробежных колес высокоскоростных насосов, камер сгорания и других деталей с пространственным профилем и сложной геометрической формой, должна учитываться форма локальных криволинейных участков и сопряжений деталей.

Численные значения силы рабочей струи рассчитывают по методике, приведенной в [7]

$$P_c = \sqrt{(Q_c \gamma_c \bar{v}_1)^2 + (Q_c \gamma_c \bar{v}_2)^2} \cdot \sin \beta, \quad (10)$$

где  $\bar{v}_1$  - скорость рабочей струи до встречи с поверхностью обрабатываемого участка;

$\bar{v}_2$  - скорость потока рабочей среды после удаления от места обработки заготовки.



## Автоматизация расчета параметров перемещения струи

Скорость удаления припуска с деталей, имеющих участки кривых с постоянными параметрами, определяется (среди прочих факторов) положением и сечением струи. По [4] при значительном или неравномерном припуске на заготовке (свойственно переходным участкам и кромкам лопаток турбин и компрессоров) необходимо создавать уравнения регрессии для численных решений, при которых обеспечивается требуемая точность обработки таких деталей.

Из [7;8] можно установить кусочногладкие приращения (11) по координатам точки обработки ( $\Delta X$ ;  $\Delta Y$ ;  $\Delta Z$ ) при радиусе  $R_c$  кривизны в месте обработки, угле наклона касательной к профилю детали ( $\alpha$ ) и закрутке профиля ( $\theta$ ), заданного в чертеже детали по осям  $x, y, z$  в приращениях.

$$\begin{aligned} \Delta X &= \left[ 1 - \frac{R_c^2 x x \cos \alpha}{(1+z^2)^{3/2}} + \frac{R_c^2 \alpha'_x z'_x \sin \alpha}{(1+z_x'^2)^{1/2}} \right] \Delta x; \\ \Delta Y &= R_c (\theta) \alpha'_x \cos \alpha \Delta x; \\ \Delta Z &= \left[ z'_x + \frac{R_c z'_x z''_{xx} \cos \alpha}{(1+z_x'^2)^{3/2}} + \frac{R_c \alpha'_x \sin \alpha}{(1+z_x'^2)^{1/2}} \right] \Delta x. \end{aligned} \quad (11)$$

Большую технологическую сложность представляет обработка поверхностей, заданных табличным методом. К ним относится профиль пера крупных лопаток компрессоров и турбин с большой закруткой и их кромки.

При постоянном угле  $\alpha$  наклона касательной к профилю обрабатываемой поверхности в точке контакта по аналогии с [8] положение точки на обрабатываемом участке может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} X_{i,j} &= \frac{x_{i,j} R_c \cos \alpha_{i,j}}{\alpha_{i+1,j} - \alpha_{i,j}} \left( \sqrt{1 + \alpha_{i+1,j}^2} - \sqrt{1 + \alpha_{i,j}^2} \right); \\ \text{где } \alpha_{i+1} &- \text{ угол на следующей строке} \\ Y_{i,j} &= y_i; \\ Z_{i,j} &= \alpha_i x_{i,j} + y_j \operatorname{tg} \alpha_{i+} + D_{i,j}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $D_{i,j} = d_{i,j} + R_c \cos \alpha_i \sqrt{1 + \alpha_{i,j}^2}$ . Здесь  $D_{i,j}$  - дивергенция (расходимость) струи по ее оси на срезе сопла;  $d_{i,j}$  - дивергенция в точке контакта струи при ее перемещении вдоль строки;  $i, j$  - единичные векторы

В случае обработки кромки лопатки с большой закруткой угол  $\alpha$  в пределах одной строки может изменяться. Тогда расчет

положения оси струи выполняется в приращениях, как показано в (13)

$$\begin{aligned} \Delta X_{i,j} &= \Delta x_{i,j} - \frac{R_c \cos \alpha_{i,j}}{2} (\alpha_{i,j} + \alpha_{i+1,j}) + \\ &+ \frac{R_c \cos \alpha_{i+1,j}}{2} (\alpha_{i,j} + \alpha_{i+1,j}); \\ \Delta Y_{i,j} &= R_c \cos \alpha_{i,j} \Delta \alpha_{i,j}; \\ \Delta Z_{i,j} &= \alpha_i \Delta X_{i,j} + \operatorname{tg} \alpha_{i,j} \Delta Y_{i,j} + \\ &+ R_c (\cos \alpha_{i,j} - \cos \alpha_{i-1,j} - \cos \alpha_{i+1,j}) \sqrt{1 + \alpha_{i,j}^2} \end{aligned} \quad (13)$$

## Погрешность процесса расчета перемещения струи при комбинированной обработке

Погрешность перемещений струи по поверхности, заданной системой точек, зависит от приращения по координатам ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ) и рассчитывается с учетом допуска на отклонение геометрии расчетного участка от заданного на чертеже. Как следует из [8] допустимая погрешность аппроксимации участков сопряжения не превышает 20 мкм. Применительно к координатной сетке при цене импульса 100 мкм погрешность не превышает несколько микрон, что значительно ниже задаваемого допуска на профиль пера.

## Заключение

Выполненные расчеты и исследования положения струи при комбинированной гидроабразивной обработке сложнофасонных поверхностей деталей типа профиля пера лопаток реактивных двигателей позволили определить основной параметр процесса - давления струи при анодном удалении припуска. Исследования показали, что сила действия струи, воздействующей при комбинированной обработке на сложнопрофильную поверхность, на несколько порядков ниже, чем ранее использовалось для гидроабразивной обработки.

Рассмотрено формирование геометрии и параметров струи, что позволило уточнить границы обработки действием струи с анодным растворением припуска и за счет этого повысить точность получаемого профиля, в том числе при сложной геометрической форме сопрягаемых участков обрабатываемой поверхности детали.

## Литература

1. Кириллов, О.Н. Повышение качества поверхностного слоя деталей гидроабразивной обработкой с локальным анодным растворением / О.Н. Кириллов, Е.В. Гончаров, В.И. Котуков // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - №6.1. - С. 64 - 66.

2. Кириллов, О.Н. Комбинированное гидроабразивное с локальным электрохимическим растворением удаление заусенцев / О.Н. Кириллов, Е.В. Гончаров, В.И. Котуков // Вестник Воронежского государственного технического университета.- 2014. - Т.10. -№1.- С. 24-26.

3. Сафонов, С.В. Поддержание качества поверхностного слоя изделий в процессе их очистки от загрязнений / С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев, В.И. Котуков // Научные технологии в машиностроении. 2014. №7. С.21-23.

4. Смоленцев, В.П. Комбинированное разделение заготовок гидроабразивным методом / В.П. Смоленцев, Е.В. Гончаров, В.И. Котуков // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. М.: Спектр, 2014. Т. 3. С.118-172.

5. Кузовкин, А.В. Размерное формообразование сложнопрофильных деталей с применением твердого токопроводящего наполнителя / А.В. Кузовкин, В.П. Смоленцев. Воронеж: ВГТУ, 2000. 176 с.

6. Смоленцев, Г.П. Теория электрохимической обработки в нестационарном режиме / Г.П. Смоленцев, И.Т. Коптев, В.П. Смоленцев. Воронеж: ВГТУ, 2000. 103 с.

7. Справочник металлиста. В 5 т. / Под ред. С.А. Чернавского и В.Ф. Резникова. М.: Машиностроение, 1976. Т.1. 768 с.

8. Юнусов, Ф.С. Формообразование сложнопрофильных поверхностей шлифованием/ Ф.С. Юнусов. М.: Машиностроение, 1987. 248 с.

Воронежский государственный технический университет

## CALCULATION OF JET PARAMETERS IN COMBINED HYDROABRASIVE PROCESSING

O.N. Kirillov<sup>1</sup>, V.P. Smolentsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: kirillov.ollli@yandex.ru

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [ysmolen@inbox.ru](mailto:ysmolen@inbox.ru)

The paper presents the analysis of a possible trajectory of the jet movement in combination with anodic dissolution of the surface layer during the final hydroabrasive treatment of geometrically complex surfaces, for example, aircraft engine blades. To do this, a volumetric model of a blade airfoil and transition areas of jet blades, turbo-pump units of rocket engines and other types of turbomachines is used. The analysis has shown that the proposed combined process is most effective for parts with limited access to the tool working area where the developed jet machining method has significant advantages.

A mathematical apparatus for automated control of the jet was developed for complex sections processing, which made it possible to form trajectories circumscribing smooth bends given by the table method (by points).

The analysis of the possibilities of finishing jet machining is performed taking into account the influence of the assumptions made when developing the software product on the accuracy of the profile. It is shown that with the use of modern equipment for combined jet hydroabrasive processing, it is possible to provide high accuracy, to accelerate the process of technological preparation of production, and to expand the area of effective application of combined hydroabrasive processing onto science-intensive products of modern technology

Key words: jet, waterjet combined processing, software, mathematical apparatus, trajectory.

### References

1. Kirillov O.N., Goncharov E.V., Kotukov V.I. "Improvement of surface quality of parts by hydroabrasive treatment with local anodic dissolution", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2013, vol. 9, no.6.1, pp. 64 - 66.

2. Kirillov O.N., Goncharov E.V., Kotukov V.I. "Combined hydroabrasive burr removal with local electrochemical dissolution", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2014, v.10, no.1, pp. 24-26

3. Safonov S.V., Smolentsev V.P., Kotukov V.I. "Maintaining the quality of the surface layer of products when cleaning from contamination", *High technology in mechanical engineering (Naukoymkie tekhnologii v mashinostroenii)*, 2014, no. 7, pp. 21-23

4. Smolentsev V.P., Goncharov E.V., Kotukov V.I. "Combined separation of blanks by the hydroabrasive method", *Progressive engineering technologies, equipment and tools (Progressivnye mashinostroitel'nye tekhnologii, oborudovanie i instrumenty)*, Moscow, Spektr, 2014, vol. 3, pp.118-172

5. Kuzovkin A.V., Smolentsev V.P. "Dimensional shaping of complex profile parts with the use of a solid current-carrying filler" ("Razmernoe formoobrazovanie slozhnoprofil'nykh detaley s primeneniem tverdogo tokoprovodyashchego napolnitelya"), Voronezh, VSTU, 2000, 176 p.

6. Smolentsev G.P., Koptev I.T., Smolentsev V.P. "Theory of electrochemical processing in a nonstationary regime" ("Teoriya elektrokhemicheskoy obrabotki v nestatsionarnom rezhime"), Voronezh, VSTU, 2000, 103 p.

7. Chernavskiy S.A., Reznikov V.F. "Metalist's handbook" ("Spravochnik metalista"), Moscow, Mashinostroenie, 1976, vol.1, 768 p.

8. Yunusov F.S. "Forming of complex profile surfaces by grinding" ("Formoobrazovanie slozhnoprofil'nykh poverkhnostey shlifivaniem"), Moscow, Mashinostroenie, 1987, 248 p.

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЕРШИНЕ КОНУСНОГО НИТЕВИДНОГО КРИСТАЛЛА В ТОЧКЕ ПЕРЕХОДА К ЦИЛИНДРИЧЕСКОМУ РОСТУ

О.Д. Козенков, В.В. Горбунов, Л.Г. Косырева, Д.Г. Жилияков

Рост нитевидных кристаллов - многостадийный процесс, сопровождающийся гетерогенной химической реакцией. Влияние температуры на процесс роста может быть существенным. Нитевидные кристаллы растут конусными. Обычно конусность составляет  $10^{-3}$ - $10^{-4}$ . Геометрия кристалла должна учитываться при расчете температуры расплава на его вершине. Предложена модель теплообмена длинного конического нитевидного кристалла в случае стационарного роста при условии, что конусность мала и изменением диаметра можно пренебречь. Уравнение теплового баланса включает: тепловые потоки, обусловленные фазовыми переходами на границах газ-жидкость и жидкость-кристалл, тепловой эффект химической реакции и конвективный теплоотвод с боковой поверхности. Предполагается, что температура в радиальном направлении нитевидного кристалла постоянна, так как его поперечный размер меньше 100 мкм. Модель теплового баланса длинного конического нитевидного кристалла позволила оценить зависимость температуры на его вершине от радиуса кристалла и распределение температуры по его длине. При уменьшении радиуса кристалла температура на его вершине падает, приближаясь к нулю, в результате увеличения доли боковой поверхности. С увеличением конусности кристалла температура на его вершине падает за счет увеличения поверхности теплоотвода и облегчения теплопроводности при увеличении его поперечного сечения сверху вниз. Для одиночного, длинного, конусного, наноразмерного нитевидного кристалла влияние тепловых эффектов на температуру вершины не существенно

Ключевые слова: нитевидный кристалл, гетерогенная обратимая химическая реакция, конусность, тепловые потоки, тепловой баланс

### Введение

Нитевидные кристаллы (НК) – квазиодномерные микро-, наноразмерные объекты, обладающие рядом уникальных свойств [1-3] и находящие практическое применение для изготовления чувствительных элементов датчиков [4] и модифицирования поверхностей [5]. НК представляют интерес как модельные объекты для изучения физико-химических процессов роста и формообразования монокристаллов по механизму пар-жидкость-кристалл (ПЖК) [1, 2, 6, 7]. Особый интерес к НК возникает в связи с перспективами их применения в интенсивно развивающихся нанотехнологиях [5, 7].

Нитевидные кристаллы могут быть получены в результате физического осаждения [6] или в системах, где рост НК сопровождается химической реакцией выделения кристаллизующегося вещества [1, 2, 7]. Независимо от способа получения НК растут по механизму ПЖК, и основные закономерности, присущие этому механизму, должны быть общими для разных способов их получения.

В любом случае на вершине кристалла происходит процесс кристаллизации связанный с

существенным тепловым эффектом. Температура на вершине кристалла определяется различными факторами и может быть существенно выше температуры окружающей среды [8]. Повышение температуры вершины НК стимулирует термоактивируемые процессы и учет этого фактора необходим для корректного моделирования роста НК.

В работе [9] предложена модель роста нитевидного кристалла, контролируемого гетерогенной химической реакцией, которая позволила объяснить некоторые закономерности роста НК и получить удовлетворительное согласование с экспериментом [10, 11]. Изменение температуры роста НК должно приводить к существенному изменению скорости химической реакции и состава газовой фазы вблизи реакционной поверхности.

До настоящего времени не созданы модели, позволяющие установить температуру на вершине НК в зависимости от геометрии кристалла и технологических параметров процесса роста. Более того, вопрос об изменении температуры вершины НК в процессе роста даже не обсуждался в ряде обобщающих работ [1, 2, 6, 7].

В работе [12] рассмотрена задача о температуре на вершине НК, растущего из молекулярного пучка в результате физического осаждения. Авторы пренебрегли теплом, уходящим с боковой поверхности кристалла, и тепловыми эффектами фазовых переходов, рассматривая задачу о передаче тепла от подложки через тело НК к его вершине, с которой тепло уходило в виде теплового излучения. Хотя, возможно такой подход оправдан для высокой плотности кристаллов на подложке.

В работе [13] проведены оценки температуры

Козенков Олег Дмитриевич – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: [kozenkov\\_w@mail.ru](mailto:kozenkov_w@mail.ru)  
Горбунов Валерий Викторович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: [valeris55@mail.ru](mailto:valeris55@mail.ru)  
Косырева Людмила Геннадьевна – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. физ.-мат. наук, преподаватель, e-mail: [lyudovikxiv@yandex.ru](mailto:lyudovikxiv@yandex.ru)  
Жилияков Дмитрий Геннадьевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: [zhilyakov@inbox.ru](mailto:zhilyakov@inbox.ru)

наноклапты на вершине углеродного нановолокна. Для оценки температуры авторы пренебрегли теплоотводом с боковой поверхности кристалла, учитывая только передачу тепла за счет теплопроводности по телу кристалла, что допустимо при высокой плотности расположения кристаллов на подложке.

В работе [8] предложена модель теплового баланса бесконечно длинного нитевидного кристалла, рост которого сопряжен с гетерогенной химической реакцией выделения кристаллизующегося вещества [9]. Данная модель в стационарном случае роста цилиндрического НК позволила проанализировать основные моменты, приводящие к разогреву вершины кристалла в отсутствие тепловой связи с подложкой и оценить температуру на вершине кристалла.

Известно [14], что НК растут конусными. Увеличение диаметра НК, от вершины к основанию, увеличивает площадь его боковой поверхности и площадь поперечного сечения, что приводит к интенсификации отвода тепла и снижению сопротивления теплопроводности. По этой причине представляет интерес рассмотрение теплового баланса конусного НК.

В данной работе рассмотрен тепловой баланс, возникающий в процессе роста конусного НК с длинной, обеспечивающей отсутствие теплового взаимодействия между кристаллом и подложкой.

### Результаты и их обсуждение

Рассмотрим бесконечно длинный конусный нитевидный кристалл, растущий по механизму ПЖК на вершине которого находится жидкая капля сплава кристаллизующегося и вспомогательного вещества, образующего жидкую фазу при температуре роста.

Конусность НК в соответствии с рис. 1 определим, как изменение радиуса кристалла, приходящееся на единицу его длины.

$$K = \operatorname{tg} \gamma = \frac{dR}{dl}, \quad (1)$$

где  $K$  – конусность НК,  $\gamma$  – угол наклона касательной к боковой поверхности НК,  $\operatorname{tg} \gamma$  – равен производной от радиуса НК по его длине.

Рост НК по ПЖК механизму сопровождается выделением кристаллизующегося вещества на поверхности расплава с последующей его кристаллизацией в малом объеме жидкой фазы на границе жидкость-кристалл, что сопряжено со значительным тепловым эффектом [8]. Если рост НК определяется гетерогенной химической реакцией [9-11], то влияние температуры на кинетику роста и формообразование кристалла может быть существенным.

На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость радиуса НК кремния, выращенного в открытой проточной системе  $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$ , от его длины. В области I, по мере роста НК его радиус уменьшается. При этом конусность кристалла не остается постоянной. По мере уменьшения радиуса

НК его конусность растет и достигает максимального значения в области перехода от области I к области II. Однако, в области II, при достижении определенного поперечного размера радиус НК перестает меняться, и кристалл растет «цилиндрическим». Для данного случая, найдем температуру НК, в точке перехода к цилиндрическому росту считая, что тепловой поток в эту точку постоянен за счет постоянства радиуса НК на участке цилиндрического роста. Это допущение возможно для достаточно больших промежутков времени, так как рост НК в области II может продолжаться более часа. Будем считать, что этого времени достаточно для достижения стационарного режима. Кроме того, предположим, что конусность НК в области I постоянна.

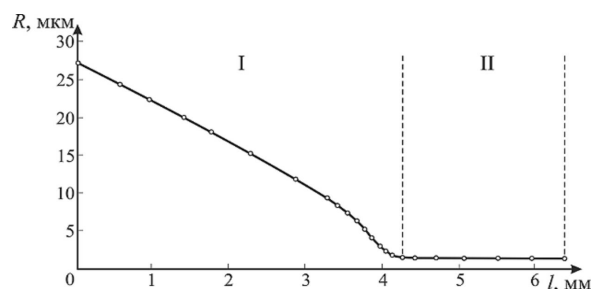


Рис. 1. Зависимость радиуса НК кремния, выращенного в открытой системе  $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$ , от его длины

С учетом сделанных допущений и предположений на рис. 2 представлена модель теплового баланса «бесконечно» длинного нитевидного кристалла для стационарного случая.



Рис. 2. Схема тепловых потоков, возникающих в процессе роста НК, и геометрии кристалла

На рис. 2 показаны тепловые потоки, возникающие в процессе роста бесконечно длинного конусного НК.

Приходящий тепловой поток  $Q_{\text{п}}$ , связанный с ростом НК, можно записать в виде:

$$Q_{\text{п}} = jS q_{\text{п}} = jS(q_x + q_{\text{гж}} + q_{\text{жк}}), \quad (2)$$

где  $j$  – плотность потока атомов вещества, закристаллизовавшегося на фронте кристаллизации НК – границе жидкость-кристалл,  $S = \pi R^2$  –

площадь фронта кристаллизации НК,  $R$  – радиус кристалла,  $q_{\text{п}}, q_x, q_{\text{Гж}}, q_{\text{жк}}$  – тепловые эффекты на атом закристаллизовавшегося вещества, а именно: полный тепловой эффект, тепловой эффект химической реакции, теплота фазового перехода газ-жидкость, теплота фазового перехода жидкость-кристалл соответственно.

Так как поперечный размер жидкой фазы сравним с диаметром НК и достаточно мал (менее 100 мкм), а ее теплопроводность близка к теплопроводности металлов, будем считать, что температура в ее объеме постоянна. По тем же причинам будем считать, что температура в радиальном направлении поперечного сечения НК постоянна. Это предположение сводит задачу к одномерной.

Приняв температуру окружающей среды  $T_{\text{ср}}$  равной нулю, запишем тепловой поток, уходящий с поверхности жидкой фазы:

$$Q_{\text{ж}} = \alpha T_1 S_{\text{ж}}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, который включает все способы теплоотвода с поверхности НК,  $T_1$  – температура жидкой фазы на вершине НК,  $S_{\text{ж}} = 2\pi R^2$  – площадь поверхности жидкой фазы.

Распределение температуры вдоль нагретого с вершины НК аналогично распределению температуры в тонком стержне, ось которого совпадает с осью  $x$  (рис. 2). Задача сводится к решению дифференциального уравнения, при записи которого температуру окружающей среды полагаем равной нулю:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = a^2 T, \quad (4)$$

где  $T_{\text{ср}} = 0$ ,  $a$  – коэффициент, который записывается в виде:

$$a^2 = \frac{\alpha P}{\lambda S}. \quad (5)$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $P = 2\pi R$  – периметр поперечного сечения НК,  $S = \pi R^2$  – площадь поперечного сечения НК,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $T$  – температура элемента НК.

Для конусного НК, при условии  $tg\gamma = \text{const}$  (рис. 1), коэффициент (5) примет вид:

$$a^2 = \frac{2\alpha}{\lambda} \frac{1}{R_0 + x \cdot tg\gamma}, \quad (6)$$

где  $R_0$  – радиус НК на границе жидкой и кристаллической фаз,  $tg\gamma$  – конусность НК.

Тогда с учетом (6) уравнение теплопроводности (4) примет вид:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{2\alpha}{\lambda} \frac{T}{R_0 + x \cdot tg\gamma} = 0. \quad (7)$$

Найдем решение уравнения (7) для бесконечно длинного НК с граничными условиями:

$$\begin{aligned} T_{x=0} &= T_1 \\ T_{x \rightarrow \infty} &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $T_1$  – температура жидкой фазы на вершине НК при  $x = 0$ . Второе граничное условие отражает тот факт, что при  $x \rightarrow \infty$  температура кристалла стремится к температуре окружающей среды, принятой

за нуль.

В уравнении (7) сделаем замены и запишем в виде:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{A}{B+x} T = 0. \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \frac{2\alpha}{\lambda \cdot tg\gamma} \\ B &= \frac{R_0}{tg\gamma}. \end{aligned} \quad (10)$$

Сделаем замену

$$T(x) = zF(z), \quad (11)$$

где

$$z = 2\sqrt{A(B+x)}. \quad (12)$$

Найдем первую и вторую производные от (11) и подставим их значения в уравнение (9)

$$z^2 F''(z) + zF'(z) - (1+z^2)F(z) = 0. \quad (13)$$

Выражение (13) – модифицированное уравнение Бесселя первого порядка с общим решением

$$F(z) = C_1 I_1(z) + C_2 K_1(z), \quad (14)$$

где  $I_1(z)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода или функция Инфельда,  $K_1(z)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода или функция Макдональда.

Асимптотическое поведение функций Бесселя:

$$\begin{aligned} I_1(z) &\approx \frac{e^z}{\sqrt{2\pi z}} \text{ при } z \rightarrow \infty, \\ K_1(z) &\approx \frac{\sqrt{\pi} \cdot e^{-z}}{\sqrt{2z}} \text{ при } z \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (15)$$

С учетом обозначений (10), (12) решение уравнения (9) для конического НК примет вид:

$$\begin{aligned} T(x) &= C_1 \sqrt{A(B+x)} I_1(2\sqrt{A(B+x)}) + \\ &+ C_2 \sqrt{A(B+x)} K_1(2\sqrt{A(B+x)}). \end{aligned} \quad (16)$$

Для граничных условий (8) с учетом (15) решение (16) примет вид:

$$T(x) = \frac{T_1}{\sqrt{ABK_1(2\sqrt{AB})}} \sqrt{A(B+x)} \cdot K_1(2\sqrt{A(B+x)}). \quad (17)$$

Тепловой поток, уходящий с боковой поверхности кристалла, определяется выражением:

$$dQ_{\text{к}} = \alpha T(x) P(x) dx, \quad (18)$$

где  $T(x)$  – решение (17),  $P(x)$  – периметр НК на расстоянии  $x$ , который определяется выражением:

$$P(x) = 2\pi(R_0 + xtg\gamma) = 2\pi tg\gamma(B+x). \quad (19)$$

С учетом (17), (19) проинтегрируем (17) по  $x$  от 0 до  $\infty$  и найдем тепловой поток, уходящий с боковой поверхности НК:

$$Q_{\text{к}} = \alpha 2\pi \cdot tg\gamma \cdot T_1 \int_0^{\infty} (B+x) \frac{\sqrt{A(B+x)} K_1(2\sqrt{A(B+x)})}{\sqrt{AB} \cdot K_1(2\sqrt{AB})} dx. \quad (20)$$

Определенный интеграл (20) может быть вычислен для заданных параметров.



Введем обозначение:

$$I = \int_0^{\infty} (B+x) \frac{\sqrt{A(B+x)} K_1(2\sqrt{A(B+x)})}{\sqrt{AB} \cdot K_1(2\sqrt{AB})} dx. \quad (21)$$

Используя (21) запишем выражение для теплового потока (20) в виде:

$$Q_k = \alpha 2\pi \cdot tg\gamma \cdot T_1 I. \quad (22)$$

В стационарном случае, приходящий тепловой поток (2), равен сумме, уходящих тепловых потоков, и тепловой баланс, возникающий в процессе роста бесконечно длинного НК, запишется:

$$Q_{\Pi} = Q_{ж} + Q_k. \quad (23)$$

Используя (2), (3), (22), (23) найдем температуру  $T_1$  на поверхности жидкой фазы в зависимости от радиуса кристалла  $R$ :

$$T_1 = \frac{j q_{\Pi} R^2}{2\alpha R^2 + 2\alpha tg\gamma I}. \quad (24)$$

Оценим температуру на вершине НК с помощью (24), используя экспериментальные данные [15] для НК кремния, выращенных с использованием меди в качестве иницирующей примеси.

Известно [16], что при температуре роста НК (1300-1400 К) теплопроводность кремния  $\lambda_{Si} \approx 23$  Вт/(м·К). Для температуры  $T = 1323$  К, при скорости роста НК  $V = 1$  мкм/с, плотность потока атомов кремния составит величину  $j = 5 \cdot 10^{22}$  с<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>.

Известно [16], что  $q_{гж} = 6,36 \cdot 10^{-19}$  Дж,  $q_{жк} = 0,83 \cdot 10^{-19}$  Дж,  $q_x = -0,332 \cdot 10^{-19}$  Дж, следовательно,  $q_{\Pi} = 6,858 \cdot 10^{-19}$  Дж. Возьмем коэффициент теплоотдачи от твердой поверхности через газовую фазу  $\alpha = 0,25$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup> [10].

Зависимость температуры на вершине бесконечно длинного НК, для различных значений конусности, от его радиуса показана на рис. 3. Температура на вершине НК определяется скоростью роста, радиусом на вершине  $R_0$ , условиями теплоотдачи и конусностью.

Обычные значения конусности для НК кремния  $K \approx 10^{-3}$  [14]. Как видно из рис. 3, для кристалла с такой конусностью температура вершины НК на порядок ниже, чем для цилиндрического кристалла. При уменьшении конусности температура вершины НК приближается к предельному значению, соответствующему цилиндрическому кристаллу.

Найдем распределение температуры по длине бесконечно длинного конусного НК, для чего учтем (24) в решении (16).

$$T(x) = \frac{j q_{\Pi} R^2}{2\alpha R^2 + 2\alpha tg\gamma \cdot I} \frac{\sqrt{A(B+x)} K_1(2\sqrt{A(B+x)})}{\sqrt{AB} K_1(2\sqrt{AB})}. \quad (25)$$

Оценим распределение температуры на вершине НК с помощью выражения (25) считая, что, как и для зависимости температуры от радиуса на вершине кристалла (рис. 2),  $V = 1$  мкм/с,  $\alpha = 0,25$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>,  $R_0 = 30$  мкм.

На рис. 4 показано распределение температуры по длине бесконечно длинного НК с

различной конусностью. Как следует из рис. 4, с увеличением длины НК превышение его температуры над температурой окружающей среды уменьшается, стремясь к нулю. Для выбранных значений параметров длина НК, при которой его температура практически сравнивается с температурой среды, составляет  $\sim 22$  см. Вид кривых на рис. 4 определяется скоростью роста НК, его радиусом на вершине и коэффициентом теплоотдачи [9].

Увеличение конусности НК приводит к интенсификации теплоотвода и, следовательно, к снижению температуры на вершине НК (кривые 2, 3, 4 рис. 4).

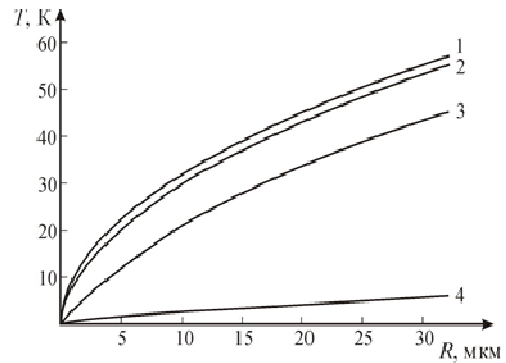


Рис. 3. Зависимость температуры на вершине бесконечно длинного НК с различной конусностью от его радиуса. 1 –  $K = 0$ ; 2 –  $K = 10^{-5}$ ; 3 –  $K = 10^{-4}$ ; 4 –  $K = 10^{-3}$

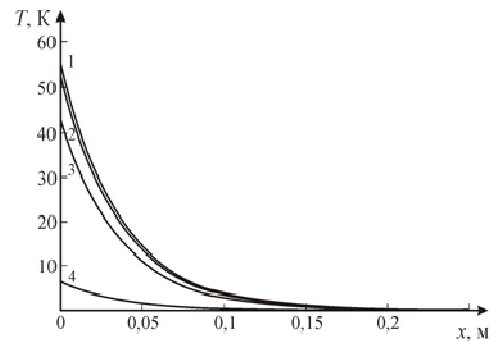


Рис. 4. Распределение температуры по длине бесконечно длинного НК с различной конусностью. 1 –  $K = 0$ ; 2 –  $K = 10^{-5}$ ; 3 –  $K = 10^{-4}$ ; 4 –  $K = 10^{-3}$

Полученные расчетные значения значительно превышают максимальную длину НК, выращенных экспериментально, которая составляла величину не более 1 см. Таким образом, для получения достоверных сведений о температуре на вершине конусных НК, необходимо учитывать тепловое взаимодействие растущего кристалла с подложкой, особенно на начальных стадиях роста.

Для достаточно тонких (наноразмерных) НК рост доли боковой поверхности приводит к значительной интенсификации теплоотвода за счет роста доли поверхности при уменьшении радиуса кристалла.

## Выводы

Предложена модель теплообмена бесконечно

длинного, конусного, не связанного тепловым взаимодействием с подложкой нитевидного кристалла, для случая стационарного роста, которая строится на основе экспериментальных данных о зависимости радиуса НК от его длины.

Уравнение теплового баланса включает подвод тепла к вершине кристалла за счет фазовых переходов на границах газ-жидкость и жидкость кристалл, а также теплоты химической реакции выделения кристаллизующегося вещества на поверхности жидкой фазы и отвод тепла с боковой поверхности за счет конвекции. Предполагается, что температура в радиальном направлении НК постоянна, так как поперечный размер НК мал.

Установлена зависимость температуры на вершине конусного бесконечно длинного НК от его радиуса и распределение температуры по длине кристалла. С уменьшением радиуса НК температура его вершины падает, стремясь к нулю, в результате роста доли поверхности кристалла. С ростом конусности НК интенсифицируются процессы теплопроводности и конвекции за счет увеличения его радиуса от вершины к основанию, что приводит к существенному снижению температуры на вершине кристалла. Температура вершины конусного кристалла мало отличается от температуры окружающей среды для НК кремния, выращенных экспериментально.

Для наноразмерных конусных НК, не связанных тепловым взаимодействием с подложкой, влияние тепловых эффектов на рост кристаллов не существенно.

#### Литература

1. Вагнер, Р. Монокристалльные волокна и армированные ими материалы / Р. Вагнер. – М.: Мир, 1973. – 464 с.
2. Гиваргизов, Е.И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара / Е.И. Гиваргизов. – М.: Наука, 1977. – 304 с.
3. Антипов, С.А. Релаксационные явления в нитевидных кристаллах полупроводников / С.А. Антипов, А.И. Дрожжин, А.М. Рощупкин. – Воронеж: ВГУ, 1987 – 192 с.
4. Дрожжин, А.И. Преобразователи на нитевидных кристаллах P-Si <111> / А.И. Дрожжин; ВПИ. – Воронеж,

1984. – 241 с. Деп в ВИНТИ 29.06.83, № 6606-84 Деп.

5. Spinelli, P. Broadband omnidirectional antireflection coating based on subwavelength surface Mie resonators / P. Spinelli, M.A. Verschuuren, A. Pullman // Nature Communication. – 2012. – 3:692 doi: 10.1038/ncomms1691. – P. 1-5.

6. Дубровский, В.Г. Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы: синтез, свойства, применения / В.Г. Дубровский, Г.Э. Цырлин, В.М. Устинов // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т.43. – Вып. 12. С. 1585-1628.

7. Небольсин, В.А. Рост нитевидных кристаллов / В.А. Небольсин, А.А. Щетинин. – Воронеж: ВГТУ, 2003. – 620 с.

8. Козенков, О.Д. Модель теплового баланса бесконечно длинного нитевидного кристалла / О.Д. Козенков, В.В. Горбунов // Неорганические материалы. – 2015. – Т. 51. – № 5. – С.576-580.

9. Козенков, О.Д. Модель роста нитевидного кристалла, лимитируемого гетерогенной химической реакцией / О.Д. Козенков // Неорганические материалы. – 2014. – Т. 50. – № 11. – С. 1-5.

10. Козенков, О.Д. Зависимость скорости роста нитевидного кристалла, лимитируемого гетерогенной химической реакцией, от состава газовой фазы / О.Д. Козенков, Л.Г. Косырева // Неорганические материалы. – 2015. – Т.51. – № 11. – С. 1255-1259.

11. Козенков, О.Д. Конусность нитевидного кристалла, обусловленная гетерогенной химической реакцией / О.Д. Козенков // Неорганические материалы. – 2016. – Т. 52. – № 3. – С. 279–284.

12. Сибирев, Н.В. Кинетические модели роста полупроводниковых нитевидных нанокристаллов: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Н.В. Сибирев. – Санкт-Петербург, 2007. – 20 с.

13. Фисенко, С.П. Нуклеация в каталитической наноклапте и рост нановолокон / С.П. Фисенко, Ф.Н. Боровик // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. – № 2. – С. 83–89.

14. Козенков, О.Д. О конусности нитевидных кристаллов кремния / О.Д. Козенков, А.Б. Козьяков, А.А. Щетинин // Известия вузов, Физика. – 1986. – Т. 29. – № 9. – С. 115–117.

15. Даринский, Б.М. О зависимости скорости роста нитевидных кристаллов от их диаметра / Б.М. Даринский, О.Д. Козенков, А.А. Щетинин // Известия вузов, Физика. – 1986. – Т.32. – № 12. – С. 18–22.

16. Смитлз, К. Дж. Металлы / К. Дж. Смитлз. – М.: Металлургия, 1980. – 447 с.

Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж  
Воронежский государственный технический университет

## MEASURING TEMPERATURE ON THE TOP OF THE CONE WHISKER AT THE POINT OF TRANSITION TO CYLINDRICAL GROWTH

O.D. Kozenkov<sup>1</sup>, V.V. Gorbunov<sup>2</sup>, L.G. Kosyрева<sup>3</sup>, D.G. Zhilyakov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Zhukovski-Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russian Federation, e-mail: [kozenkov\\_w@mail.ru](mailto:kozenkov_w@mail.ru)

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation e-mail: [valeris55@mail.ru](mailto:valeris55@mail.ru)

<sup>3</sup>PhD, Tutor, Zhukovski-Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russian Federation e-mail: [lyudovikxiv@yandex.ru](mailto:lyudovikxiv@yandex.ru)

The growth of whiskers is a multi-stage process, accompanied by a heterogeneous chemical reaction. The temperature effects on their growth process can be significant. Filamentous crystals grow as conical structures. Normally, their taper comprises  $10^{-3}$  to  $10^{-4}$ . The geometry of the crystal must be taken into account when calculating the temperature of the melt at its apex. Proposed is the model for the heat transfer of a long conical whisker in the case of its steady growth, provided that the taper is small and its diameter can be neglected. The heat balance equation includes: heat fluxes due to phase transitions at the gas-liquid and liquid-crystal boundaries, the thermal effect of the chemical reaction, and the convective heat sink from the lateral surface. It is assumed that the temperature in the radial direction of the whisker is constant, since its transverse dimension is less than 100  $\mu\text{m}$ . The model of the thermal balance of a long conical filamentary crystal makes it possible to estimate the temperature dependence at its vertex from the radius of the crystal and the temperature distribution along its length. As the radius of the crystal decreases, the temperature at its apex drops, approaching zero, as a result of an increase in the proportion of the lateral surface. With an increase of the whisker taper, the temperature at its apex decreases as a result of the heat sink increase in the surface and in facilitating thermal conductivity with an increase in its cross section from top to bottom. For a single, long, conical, nanoscale filamentary crystal, the effect of thermal effects on the temperature of the vertex is not significant

Key words: whisker, heterogeneous reversible chemical reaction, whisker taper, heat flux, heat balance

### References

1. Wagner R. "Monocrystalline fiber and fiber reinforced materials" ("Monokristal'nye volokna i armirovannye imi materialy"), ed. A.T. Tumanov. Moscow, Mir, 1973, 464 p.
2. Givargizov E.I. "The growth of steam made whiskers and lamellar crystals" ("Rost nitevidnykh i plastinchatykh kristallov iz para") Moscow, Nauka, 1977, 304 p.
3. Antipov S.A., Drozhzhin A.I., Roshupkin A.M. "Relaxation phenomena of semi-conductor whiskers" ("Relaksatsionnye yavleniya v nitevidnykh kristallakh polu-provodnikov"), Voronezh, Voronezh State University, 1987, 192 p.
4. Drozhzhin A.I. "Converters on P-Si <111> whiskers" ("Preobrazovateli na nitevidnykh kristallakh P-Si <111>"), Voronezh, All-Russia Institute of Scientific and Technical Information, 1984, no.6606-84, 241 p.
5. Spinelli, P. "Broadband omnidirectional antireflection coating based on subwavelength surface", *Mie resonators. Nat. Commun.* 3:692 doi: 10.1038/ncomms1691, 2012.
6. Dubrovskij V.G., Cyrilin G.EH., Ustinov V.M. "Semiconductor nano-whiskers: synthesis, features and application" *Physics and Technology of Semiconductor*, 2009, vol. 43, no.12, 1585–1628 pp.
7. Nebolsin V.A., Schetinina A.A. "The growth of whiskers" ("Rost nitevidnykh kristallov"), Voronezh, *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2003, 620 p.
8. Kozenkov O. D., Gorbunov V. V. "A Model for the Heat Balance of an Infinitely Long Whisker" ("Model' teplovogo balansa dlinnogo nitevidnogo kristalla"), *Inorganic Materials*, 2015, vol. 51, no. 5, 520–524 pp.
9. Kozenkov O. D. "A Model for Whisker Growth Limited by a Heterogeneous Chemical Reaction" ("Model' rosta nitevidnogo kristalla, limitiruyemogo geterogennoy khimicheskoy reaktsiyey"), *Inorganic Materials*, 2014, vol. 50, no. 11, 1146–1150 pp.
10. Kozenkov O. D., Kosyreva L. G. "Effect of Vapor Phase Composition on the Whisker Growth Rate Limited by a Heterogeneous Chemical Reaction" ("Zavisimost' skorosti rosta nitevidnogo kristalla, limitiruyemogo geterogennoy khimicheskoy reaktsiyey, ot sostava gazovoy fazy"), *Inorganic Materials*, 2015, vol. 51, no. 11, 1163–1167 pp.
11. Kozenkov O. D. "Whisker Taper Induced by Heterogeneous Chemical Reaction" ("Konusnost' nitevidnogo kristalla, obuslovlennaya geterogennoy khimicheskoy reaktsiyey"), *Inorganic Materials*, 2016, vol. 52, no. 3, 279–284 pp.
12. Sibirev N.V. PhD Thesis, SpB, 2007, 20 p.
13. Fisenko S.P., Borovik F.N. "Technical Physics Journal" ("Zhurnal tekhnicheskoy fiziki"), 2009, vol. 79, no. 2, 83-89 pp.
14. Kozenkov O. D., Koziakov A.B., Schetinina A.A. "On taper of silicon whiskers" ("O konusnosti nitevidnykh kristallov kremnija"), *Proceedings of the Universities, Physics*, 1986, vol. 29, 115-117 pp.
15. Darinskii B.M., Kozenkov O.D., Schetinina A.A. Dependence of the rate of growth of whiskers based on their diameter rates ("O zavisimosti skorosti rosta nitevidnykh kristallov ot ikh diametra"), *Proceedings of the Universities, Physics*, 1986, vol. 32, no. 12, 18-22 pp.
16. Smitz C.J. "Metal", Moscow, "Metallurgy", (Ref. ed), 1980, 447 p.



## КОЛЕБАНИЯ КРИСТАЛЛА С ДИСЛОКАЦИЕЙ ПАЙЕРЛСА

И.Л. Батаронов, Т.А. Наденна

В статье на основе самосогласованной динамической теории малых колебаний дислокационных скоплений лагранжев подход обобщен на скопление непрерывно распределенных дислокаций. В качестве примера этого скопления рассмотрено построение уравнения колебаний пайерлсовской дислокации (ПД).

В рамках модели Пайерлса распределение дислокаций в плоскости скольжения определяется введением в лагранжиан энергии несовпадения. Преобразование его к квадратичной по динамическим переменным форме с последующим использованием принципа стационарного действия позволило получить уравнения колебаний кристалла, которое для прямолинейной дислокации преобразуется к интегральному уравнению колебаний дислокации. Для синусоидальной формы аппроксимации пайерлсовского рельефа это уравнение удается свести к дифференциальному уравнению второго порядка. Появляющаяся здесь функция совпадает с обратной обобщенной восприимчивостью двойниковой границы.

На основе численного решения полученного уравнения были исследованы спектры собственных колебаний ПД. Так, для краевой дислокации найдено, что в коротковолновом пределе фазовая скорость колебаний приближается к скорости поперечного звука, а сами колебания приобретают антифазный характер, т.е. края ПД колеблются в противофазе с ее центральной частью. Аналогичные результаты получены и для локальной частоты винтовой дислокации, но в этом случае фазовая скорость слегка уменьшается. Результаты расчета для промежуточной (смешанной) дислокации показывают, что в длинноволновой асимптотике ПД смещается как целое. Анализ зависимости фазовой скорости от изменения доли составляющих показывает увеличение фазовой скорости с увеличением волнового числа.

Найдено явное выражение обобщенной восприимчивости ПД в длинноволновом приближении. Полученные результаты хорошо согласуются с аналогичным выражением для линейной дислокации, но отличаются от него корректным определением параметра, соответствующего радиусу ядра, и формой высокочастотных зависимостей аргументов логарифмических множителей

Ключевые слова: дислокация Пайерлса, обобщенная восприимчивость

**Введение.** Анализ колебаний кристалла с дислокацией в пайерлсовском рельефе представляет интерес для многих приложений, в частности, для задач рассеяния в физической кинетике, для описания элементарных актов пластической деформации, неупругих явлений и механизмов дислокационного внутреннего трения. Отдельная дислокация в модели Пайерлса рассматривается как ансамбль сильно-взаимодействующих непрерывно распределенных микродислокаций. В этом смысле пайерлсовскую дислокацию (ПД) можно рассматривать как дислокационное скопление и распространить уравнения малых колебаний [1] на случай колебаний кристалла с Пайерлсовской дислокацией.

**Постановка задачи.** В рамках полумикроскопической модели Пайерлса связанная с дислокацией пластическая дисторсия записывается в виде:

$$w_{ik}^{(p)} = n_i b_k \delta(S_D) \theta(x, y),$$

где  $\vec{n}$  - вектор нормали к плоскости скольжения,  $\vec{b}$  - вектор Бюргерса, а  $\theta$  изменяется от 1 в некоторой плоскости XOY до 0 в другой ее части. Локализация изменения функции  $\theta$  в некоторой зоне, рассматриваемой как ПД,

обеспечивается введением в функцию Лагранжа так называемую энергию несовпадения.

Рассматривая малые смещения  $\xi(x, y)$  элементов ПД и записывая функцию Лагранжа в квадратичном по динамическим переменным виде, на основе принципа стационарного действия, получим систему уравнений, описывающих малые колебания кристалла с ПД:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - \lambda_{iklm} \frac{\partial^2 u_m}{\partial x_k \partial x_l} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\lambda_{ik}^D \delta(z) \theta_0(y) \xi) = f_i \\ K(y) - \lambda_{ik}^D \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \Big|_{z=0} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

здесь  $\rho$  - плотность среды,  $\lambda_{iklm}$  - тензор модулей упругости,  $\lambda_{ik}^D = \lambda_{iklm} n_l b_m$ ,  $\vec{u}$  - вектор смещения точек среды из положения равновесия,  $K(y)$  - функция, определяемая статическим полем смещений вокруг ПД.

Система (1) приведена к интегральному уравнению, в результате решения которого приводит к явному выражению обратной обобщенной восприимчивости ПД:

$$g_{\omega}^{-1}(q_x) = \frac{\rho \omega^2}{8\pi} [b_s^2 F_s(x, \omega_0/\omega) - b_e^2 F_e(x, \omega_0/\omega)], \quad (2)$$

где  $\vec{q}$  - волновой вектор,  $b_s$  и  $b_e$  - винтовая и краевая составляющие вектора Бюргерса,  $c_t$  и  $c_l$  - скорости поперечного и продольного звука,  $x = c_l q_x / \omega$ ,  $\omega_0^2 = 4c_t^2 / \tilde{\lambda}^2$ ,  $\tilde{\lambda} = \lambda e^C$ ,  $C=0,577$  - постоянная Эйлера,

Батаронов Игорь Леонидович - ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: ibat@mail.ru  
Наденна Татьяна Анатольевна - ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: nadtana@mail.ru

$$F_s = -(1-3x^2+4x^4) \ln \frac{(\omega_0/\omega)^2}{x^2-1} +$$

$$+ 4x^2(x^2-\gamma) \ln \frac{(\omega_0/\omega)^2}{x^2-\gamma} + (5-4\gamma)x^2 - 1;$$

$$F_e = (x^4-1) \ln \frac{(\omega_0/\omega)^2}{x^2-1} - (x^2-\gamma)^2 \ln \frac{(\omega_0/\omega)^2}{x^2-1} +$$

$$+ (1-\gamma)x^2 + 1/2(1-\gamma^2), \quad \gamma = c_t^2/c_l^2.$$

Собственные колебания ПД являются решениями однородного уравнения:

$$\frac{\partial^2 \zeta_\omega}{\partial q_y^2} + \frac{\alpha_0 - \alpha_\omega}{\alpha_0 + \alpha_\omega} \zeta_\omega = 0. \quad (3)$$

здесь  $\zeta_\omega$  - Фурье-образ смещения дислокационной линии, явные выражения для  $\alpha_0$  и  $\alpha_\omega$  в случае изотропной среды имеют вид:

$$\alpha_0 = -\mu \left( \frac{1}{2} b_s^2 + (1-\gamma) b_e^2 \right),$$

$$\alpha_\omega = -\frac{\mu b^2}{2} \left( \frac{(\bar{\beta} \times \bar{q}_\perp)^2 - \omega^2/c_t^2}{\chi_t} + \frac{4(1-\gamma)(\bar{\beta} \bar{q}_\perp)^2}{\chi_t + \chi_l} \right),$$

где  $\mu$  - модуль сдвига,  $\chi_\alpha^2 = q_x^2 - \omega^2/c_\alpha^2$ ,  $\bar{\beta} = \bar{b}/b$ .

Решения дифференциального уравнения (3) представлены с помощью графиков.

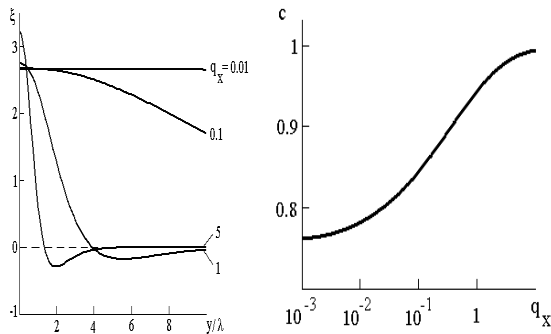


Рис. 1. Краевая ПД: а) амплитуды смещений элементов; б) спектр колебаний

Как видно из рис. 1 а), при  $q_x = 0,01$  (длинноволновый предел) амплитуды элементов ПД постоянны, что соответствует смещению ПД как целого под действием внешнего напряжения. С увеличением,  $q$  т.е. переходом в коротковолновую область, при приближении к краю ПД амплитуды элементов принимают отрицательные значения. Это означает, что края дислокации колеблются в противофазе с

ее центром массы. Фазовая скорость при этом приближается к скорости поперечного звука.

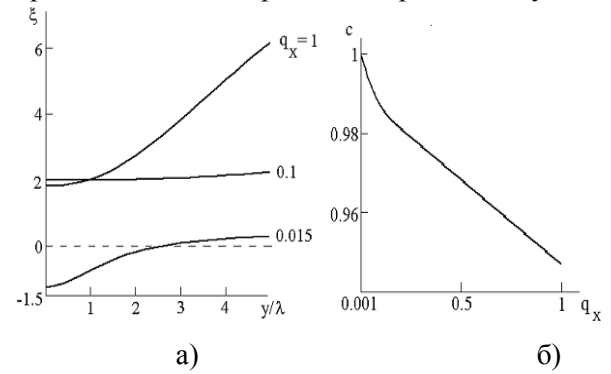


Рис. 2. Локальные колебания винтовой ПД: а) амплитуды смещений элементов; б) спектр колебаний

Как следует из рис. 2 а), амплитуда колебаний края ПД больше амплитуды центра масс дислокации, сильно “размывая” границу ПД.

Из анализа спектра колебаний винтовых дислокаций следует, что в нем присутствует еще одна, квазилокальная мода.

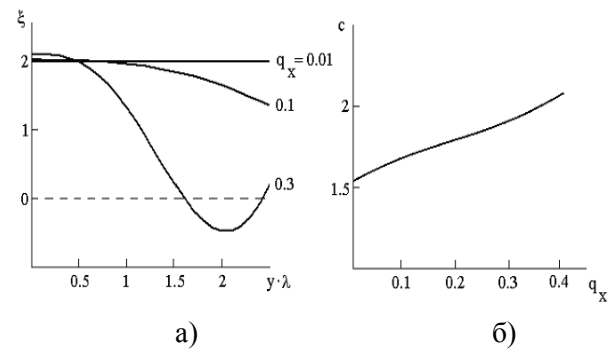


Рис. 3. Квазилокальные колебания винтовой ПД: а) амплитуды смещений элементов; б) спектр колебаний

Характер зависимости амплитуд смещений квазилокальных колебаний винтовой ПД от  $y$  аналогичен изменению амплитуд локальных колебаний краевой ПД: в длинноволновой области винтовая ПД смещается как целое, в коротковолновой области края ПД и центр масс дислокации колеблются антифазно.

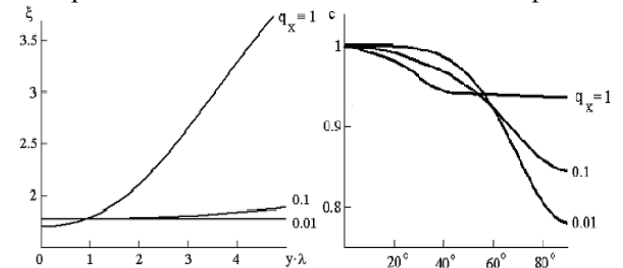


Рис. 4. а) Амплитуды смещений элементов смешанной ПД; б) Зависимость фазовой скорости от ориентации вектора Бюргера ПД

Из рис. 4 видно, что в длинноволновом пределе смешанная ПД смещается “как целое”.

**Заключение.** Найденное явное выражение обобщенной восприимчивости ПД в длинноволновом приближении хорошо согласуется с аналогичным выражением для линейной дислокации, но отличаются от него корректным определением параметра, соответствующего радиусу ядра, и формой высокочастотных зависимостей аргументов логарифмических слагаемых. При исследовании спектра собственных колебаний пайерлсовской дислокации установлено, что в длинноволновом пределе колебания дислокации происходят без взаимного смещения элементов с частотами, соответствующими линейной дислока-

ции, а в коротковолновом пределе колебания пайерлсовской дислокации имеют антифазный характер.

#### Литература

1. Батаронов И.Л. О линейном отклике дислокационного ансамбля на импульсное воздействие/ И.Л. Батаронов, Т.А. Бабенко, А.М. Рощупкин // Изв. АН, Сер. физ. – 1997. –Т.61.– №5. – С.877-885
2. Батаронов И.Л. Анализ обобщенной восприимчивости дислокационного ансамбля в рамках модели струны/ И.Л. Батаронов, Т.А. Надеина// Моделирование физических процессов в конденсированных средах и системах многих частиц: Междунар. семинар. Воронеж: ВГТУ, – 2005.- С.149-151

Воронежский государственный технический университет

## CRYSTAL OSCILLATIONS CAUSED BY THE PIERLS STRESS

I.L. Bataronov<sup>1</sup>, T.A. Nadeina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
email: [ibat@mail.ru](mailto:ibat@mail.ru)

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
email: [nadtana@mail.ru](mailto:nadtana@mail.ru)

Based on self-consistent dynamical theory of small oscillations of a dislocation clusters the “Lagrangian specifications” definition is extended to “the cluster of continuously distributed dislocations” in the paper presented. As a sample of this cluster the construction of the wave equation of the “Peierls Stress” (PS) is considered by the authors.

In the framework of the Peierls model the distribution of dislocations in a slip plane is determined by the energy mismatch insertion into the Lagrangian. As we convert it into quadratic in the dynamic variables of the form and then use the principle of stationary action it makes it possible to obtain the equation of oscillations of a crystal, which for a straight dislocation is converted to an integral equation of oscillations of a dislocation. For sinusoidal approximation of Peierls’ relief it is possible to reduce this equation it to a differential equation of the second order. The function, which appears in this case is the same as the extended inverse susceptibility of a duplex border.

Based on the numerical solution of equation spectra of oscillations in PS was investigated. Hence, it was discovered that for an edge dislocation within the limits of the high frequency limit the phase velocity of the oscillations approaches the speed of transverse sound, and the oscillations themselves obtain the anti-phase features, i.e. the PS edges fluctuate in anti-phase with its central part. Similar results were obtained for a local frequency of a screw dislocation, but in this case, the phase velocity slightly decreases. The calculation results for intermediate (mixed) dislocations show that in the long-wave asymptotics the PS gets shifted as a whole. Analysis of the dependence of the phase velocity from the changes in the share components shows an increase in phase velocity with increasing wave number.

The explicit expression of the extended susceptibility of PS in the long wavelength approximation is determined. The results obtained correlate well with the similar expression for a linear dislocation, however their correct definition of the parameter corresponding to the radius of the nucleus and form a high-frequency dependencies of the arguments of the logarithmic multipliers are different

Key words: Peierls Stress (PS), generalized susceptibility

#### References

1. Bataronov I. L., Babenko T. A., Roshchupkin A. M. “A linear response of dislocation ensemble to pulse the effect”, *Russian Academy of Sciences News, Physics Series*, 1997, vol. 61, no. 5, 877-885 pp.
2. Bataronov I.L., Nadeina T.A. “Analysis of extended susceptibility of a dislocation ensemble in the framework of a string model”, *International seminar on modeling of physical processes in condensed and multy-particle systems*”, Voronezh, 2005, 149-151pp.

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ Ni-MgO И $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А.А. Гребенников, О.В. Стогней, А.В. Ситников, О.В. Жилова, В.Н. Феклин

Исследованы особенности электрических свойств гранулированных композитов  $\text{Ni}_x(\text{MgO})_{100-x}$  и многослойной системы  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  при низких температурах. В образцах  $\text{Ni}_x(\text{MgO})_{100-x}$  до порога перколяции сопротивление возрастает с понижением температуры в интервале 77-280 К, что характерно для гранулированных систем металл-диэлектрик. При концентрации никеля, достаточной для образования перколяционного кластера на температурной зависимости сопротивления при ~190 К, наблюдается аномалия – смена знака температурного коэффициента сопротивления, обусловленная влиянием квантовых поправок к проводимости (эффект слабой локализации). Сопротивление образцов многослойной системы  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  с понижением температуры возрастает во всем интервале 280 – 77 К. Учитывая, что в аморфных пленках  $\text{In}_2\text{O}_3$  при 110 К наблюдается эффект слабой локализации, предполагается, что этот эффект проявляется и в образцах  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ . Температура его возникновения 280 К, поэтому рост сопротивления при охлаждении обусловлен проявлением данного эффекта. Существенное увеличение температуры возникновения эффекта слабой локализации по сравнению со значениями, характерными для аморфных пленок  $\text{In}_2\text{O}_3$ , обусловлено наличием большого числа центров рассеивания электронов на границе  $\text{In}_2\text{O}_3$  –  $\text{ZnO}$ . При этом электроперенос в образцах  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  осуществляется преимущественно слоями  $\text{In}_2\text{O}_3$

Ключевые слова: слабая локализация, композит, электропроводность, многослойная система

### Введение

Улучшение технических характеристик систем радиоэлектроники связано с созданием новых функциональных материалов, свойства которых существенно отличаются от используемых в настоящее время. Одним из направлений, в рамках которого возможна реализация данной задачи, является спинтроника. Важное отличие устройств, созданных при использовании материалов спинтроники, – быстроедействие и экономичность. Как известно, работа электронных устройств основана на управлении движением электронов. Устройства спинтроники функционируют еще и за счет управления спином электронов. Время, необходимое для смены состояния спина, существенно меньше времени установления упорядоченного движения электронов, кроме того, для смены состояния спина требуется меньше энергии, что с одной стороны обуславливает гораздо более высокую скорость работы устройств спинтроники, с другой – меньшее тепловыделение.

Для практического применения материалов в устройствах спинтроники требуется всестороннее изучение их свойств, а также эффектов, влияющих на переориентирование спинов. Одним из таких эф-

фектов является слабая локализация электронов проводимости, возникающая в материалах с сильным беспорядком. Данный эффект, как правило, наблюдается при низких температурах и обуславливает появление аномалий резистивных и магниторезистивных свойств материалов. Слабая локализация была ранее исследована в тонких пленках металлов и полупроводников. Однако для устройств спинтроники перспективными материалами являются гранулированные нанокompозиты и многослойные структуры, ввиду наличия в них гигантского магнитосопротивления, а также уникальных магнитных свойств. В таких материалах эффект слабой локализации малоизучен – не определены условия его возникновения, величина, зависимость от состава (элементного и фазового) и т.д. В этой связи настоящая работа представляется важной и актуальной.

В качестве объектов исследования использовались композиты  $\text{Ni}_x(\text{MgO})_{100-x}$  и многослойные структуры  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ .

### Методика

Образцы  $\text{Ni}_x(\text{MgO})_{100-x}$  были получены методом ионно-лучевого распыления составной мишени, состоящей из никелевой основы с навесками MgO, в атмосфере аргона. Распыляемые компоненты одновременно осаждались на ситалловую подложку, формируя пленку  $\text{Ni}_x(\text{MgO})_{100-x}$ , толщина которой, в зависимости от концентрации никеля, варьировалась от 3 до 4 мкм. Навески MgO были распределены на поверхности основы неравномерно, что позволило получить за один цикл напыления образцы в широком диапазоне концентрации металла (x: 21-48 ат.%). Многослойная система  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  была получена методом ионно-лучевого распыления двух мишеней на вращающуюся подложку. Толщины слоев определялись по контрольным напылениям однофазной пленки с помощью интерферометра МИИ-4, а также методом малоугловой рентгенов-

Гребенников Антон Александрович – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. физ.-мат. наук, преподаватель, e-mail: anton18885@yandex.ru

Стогней Олег Владимирович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sto@sci.vrn.ru

Ситников Александр Викторович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sitnikov04@mail.ru

Жилова Ольга Владимировна – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, e-mail: zhilova105@mail.ru

Феклин Виктор Николаевич – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: vfekl3@mail.ru

ской дифрактометрии. Суммарная толщина многослойной пленки составила 0,28 мкм. Более подробно технология получения образцов изложена в [1,2].

Структура и фазовый состав образцов исследовались методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Bruker D2Phaser. Температурные зависимости сопротивления изучались в интервале 77 – 280 К при помощи проточного криостата.

### Результаты

В работе [3] показано, что образцы  $Ni_x(MgO)_{100-x}$  являются гранулированными нанокompозитами, состоящими из двух основных кристаллических фаз Ni и MgO, причем, размер никельковых гранул не превышает 2-3 нм.

Согласно результатам малоугловой рентгеновской дифрактометрии (рис. 1), образцы  $(In_2O_3/ZnO)_{83}$  представляют собой многослойные структуры. Появление на рентгенограмме рис. 1 максимума в области малых углов свидетельствует о наличии в структуре материала неоднородностей, размер которых сопоставим с длиной волны рентгеновского излучения [4]. Оценка размера неоднородностей, выполненная по формуле Вульфа-Брэгга, показала значение  $\sim 2$  нм. Аналогичное значение получено в результате расчета толщины слоя  $In_2O_3/ZnO$ , выполненного по контрольным напылениям. Таким образом, можно сделать вывод, что образцы  $(In_2O_3/ZnO)_{83}$  состоят из чередующихся слоев оксидных полупроводников  $In_2O_3$  и ZnO толщиной  $\sim 1$  нм каждый, общее количество слоев составляет 83.

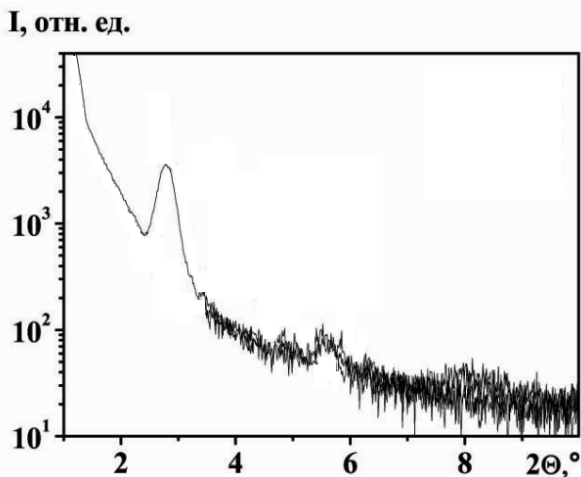


Рис. 1. Рентгенограмма образца  $(In_2O_3/ZnO)_{83}$  в области малых углов

В результате исследования температурных зависимостей сопротивления композитов  $Ni_x(MgO)_{100-x}$  до порога перколяции в интервале 77-280 К аномалий выявлено не было. Их сопротивление возрастает с понижением температуры. Однако при концентрации Ni достаточной для образования перколяционного кластера на зависимости  $R(T)$

наблюдается смена знака температурного коэффициента сопротивления (ТКС) при  $\sim 190$  К (рис. 2). Как известно, с образованием перколяционного кластера в композите металл-диэлектрик возникает металлический тип проводимости. Соответственно его сопротивление с уменьшением температуры должно уменьшаться. В этой связи рост сопротивления образца  $Ni_{41}(MgO)_{59}$  ниже 190 К не связан с механизмом электропереноса, а обусловлен эффектом слабой локализации, влияние которого начинает вносить определяющий вклад в электропроводность материала.

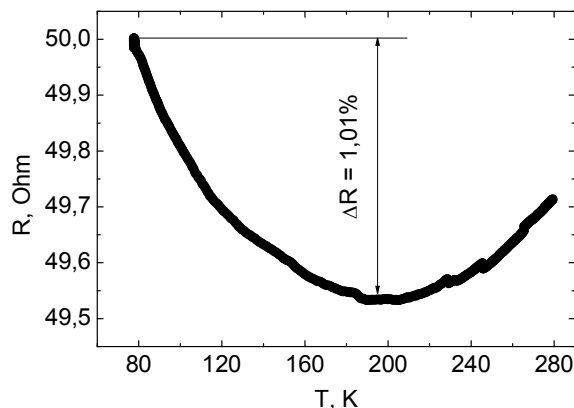


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления образца  $Ni_{41}(MgO)_{59}$

Иные результаты получены для образцов  $(In_2O_3/ZnO)_{83}$ . С понижением температуры их сопротивление возрастает во всем интервале, что характерно для полупроводников. Однако абсолютная величина изменения сопротивления в интервале 77 – 280 К невелика (рис. 3). Как известно, изменение температуры приводит к существенному изменению сопротивления полупроводника. В этой связи предполагается, что изменение сопротивления образцов  $(In_2O_3/ZnO)_{83}$  во всем интервале 77 – 280 К обусловлено эффектом слабой локализации.

Проявление эффекта слабой локализации в композитах  $Ni_x(MgO)_{100-x}$  и многослойной системе  $(In_2O_3/ZnO)_{83}$  согласуется с теорией [5]. Необходимым условием проявления данного эффекта является наличие в материале большого числа структурных дефектов. В исследованных образцах дефектность структуры обусловлена методом получения. В процессе напыления пленки атомы компонент, выбиваемые из мишени, случайным образом попадают на подложку. Обладая избыточной энергией, они начинают мигрировать по поверхности подложки, стремясь занять энергетическое выгодное состояние. Однако расстояния их перемещения невелики - порядка межатомных. В результате часть атомов металла попадают в диэлектрическую матрицу и растворяются в ней, а часть атомов, формирующих диэлектрическую фазу, соединяется с металлическими гранулами, образуя на их поверхности соединения различной стехиометрии. Кроме того, напы-

ление производится в атмосфере аргона, в связи с чем диэлектрическая матрица формируется нестехиометричной из-за недостатка кислорода. Совокупность рассмотренных факторов обуславливает большое число структурных дефектов в исследованных образцах. Также в многослойной системе  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  большое число дефектов образовано границами раздела между слоями  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZnO}$ .

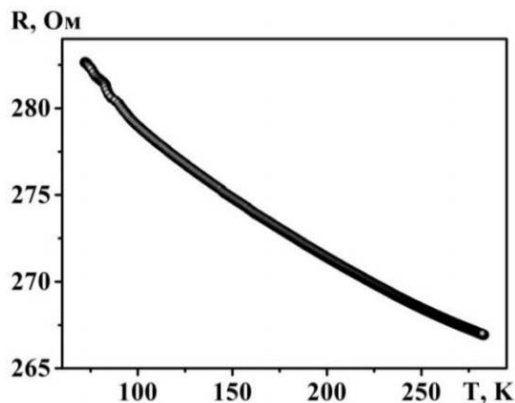


Рис. 3. Температурная зависимость сопротивления образца  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$

Удельное число дефектов в многослойной системе  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  больше, чем в композитах  $\text{Ni}_x(\text{MgO})_{100-x}$  за счет большой площади границ между слоями  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZnO}$ . Это позволяет предположить, что в образцах  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  рост сопротивления с уменьшением температуры от 280 до 77 К (рис. 3) обусловлен эффектом слабой локализации и объяснить возникновение данного эффекта при температуре близкой к комнатной, тогда как в композитах  $\text{Ni}_x(\text{MgO})_{100-x}$  он проявляется при  $\sim 190$  К.

Сравнивая температурные зависимости сопротивления образцов  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  (рис. 3) и аморфных пленок оксида  $\text{In}_2\text{O}_3$  [6] можно видеть общую тенденцию – при некоторой температуре наблюдается смена знака ТКС. В этой связи предполагается, что проявление эффекта слабой локализации в образцах  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  связано с особенностями электрических свойств оксида  $\text{In}_2\text{O}_3$ . Существенное изменение температуры его возникновения в системе  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  ( $\sim 280$  К) в сравнении с пленками  $\text{In}_2\text{O}_3$  ( $\sim 100$  К) обусловлено, как было показано выше, большой дефектностью  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ . При этом электроперенос в системе  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  осуществляется преимущественно слоями  $\text{In}_2\text{O}_3$ , слои  $\text{ZnO}$  создают дополнительные центры рассеивания электронов (для проверки этого предположения необхо-

димо исследовать электрические свойства в многослойной системе  $\text{In}_2\text{O}_3$ /диэлектрик).

### Заключение

1) В композитах  $\text{Ni}_x(\text{MgO})_{100-x}$  за порогом перколяции на температурных зависимостях сопротивления при  $\sim 190$  К наблюдается смена знака ТКС, связанная с возникновением эффекта слабой локализации.

2) В многослойной системе  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  эффект слабой локализации возникает при 280 К. Рост сопротивления при уменьшении температуры от 280 до 77 К обусловлен проявлением данного эффекта.

3) Электроперенос в образцах  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  осуществляется преимущественно слоями  $\text{In}_2\text{O}_3$ , слои  $\text{ZnO}$  создают дополнительные центры рассеивания электронов на границе  $\text{In}_2\text{O}_3 - \text{ZnO}$ , в результате температура возникновения эффекта слабой локализации существенно возрастает по сравнению со значениями, характерными для аморфных пленок  $\text{In}_2\text{O}_3$ .

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках проектной части государственного задания (проект № 3.1867.2017/4.6).

### Литература

1. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах / С.А. Гриднев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 352 с.
2. Effect of Thermal Treatment on the Electrotransport Properties of Thin-Film  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$  Materials and the Multilayer  $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$  Heterostructure / I.V. Babkina, K.S. Gabriel's, T.I. Epryntseva, O.V. Zhilova, V.A. Makagonov, A.V. Sitnikov, P.M. Hlopovskikh // Bulletin of the russian academy of sciences: physics. – 2016. – V. 80. – №9. – P. 1168-1171.
3. Grebennikov A.A. Size effect in  $\text{Ni}_x(\text{MgO})_{100-x}$  nanocomposites / A.A. Grebennikov, O.V. Stognei // Solid State Phenomena. – 2011. – V. 168-169. – P.361-364.
4. Low Angle X-ray Diffraction of Multilayered Structures / H. Vanderstraeten, D. Neerincx, K. Temst, Y. Bruynseraede // Journal of Applied Crystallography. – 1991. – V.24. – P.571-575.
5. Altshuler B.L. Electron-electron interaction in disordered conductors / B.L. Altshuler, A.G. Aronov. – Electron-Electron Interactions in Disordered Systems. – Elsevier Science Publisher, 1985. – Ch. 1. – P. 1-153.
6. Weak localization and size effects in thin  $\text{In}_2\text{O}_3$  films prepared by auto wave oxidation / I.A. Tambasov et al // Physica E. – 2016. – V. 84. – P. 162-167.

Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
Воронежский государственный технический университет

# ELECTRICAL EXERTION FEATURES IN Ni-MgO AND (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO)<sub>83</sub> HETEROGENEOUS SYSTEMS DISPLAYED AT LOW TEMPERATURES

A.A. Grebennikov<sup>1</sup>, O.V. Stognei<sup>2</sup>, A.V. Sitnikov<sup>3</sup>, O.V. Zhilova<sup>4</sup>, V.N. Feklin<sup>5</sup>

<sup>1</sup>PhD, Tutor, Lecturer, Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia Federation  
e-mail: [anton18885@yandex.ru](mailto:anton18885@yandex.ru)

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia Federation  
e-mail: [sto@sci.vrn.ru](mailto:sto@sci.vrn.ru)

<sup>3</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia Federation  
e-mail: [sitnikov04@mail.ru](mailto:sitnikov04@mail.ru)

<sup>4</sup>PhD, Researcher, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia Federation  
e-mail: [zhilova105@mail.ru](mailto:zhilova105@mail.ru)

<sup>5</sup>PhD, Associate Professor, Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Voronezh, Russia Federation  
e-mail: [yfekl3@mail.ru](mailto:yfekl3@mail.ru)

Paper studies the electrical features of the Ni<sub>x</sub>(MgO)<sub>100-x</sub> granular composites and the (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / ZnO)<sub>83</sub> multilayer system displayed at low temperatures. In samples of Ni<sub>x</sub>(MgO)<sub>100-x</sub> the resistance increases with decreasing temperature in the range of 77-280 K up to the percolation limit, which is typical for granular metal-dielectric systems. As nickel concentration reaches sufficient level to form a percolation cluster based on the temperature inter-dependence of the resistance at ~ 190 K, the following discrepancy is observed - temperature coefficient of resistance changes due to the effect of quantum corrections based on the conductivity (the effect of weak localization). The resistance of the samples of the (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO)<sub>83</sub> multilayer system reduces with decreasing temperature throughout the interval 280-77 K. Considering that the effect of weak localization is observed in amorphous In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films at 110 K, the same result is also anticipated in (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ ZnO)<sub>83</sub> samples. It occurs at 280 K temperature, so the increase in resistance during cooling is due to this effect as well. A significant increase in the temperature of the weak localization effect in comparison with the values characteristic of amorphous In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films is observed due to the presence of a large number of electron scattering centers at the In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - ZnO interface. In this case, the electronic transportation in the samples (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ZnO)<sub>83</sub> is carried out mainly by In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers

Key words: weak localization, composite, electrical conductivity, multilayer system

## References

1. Gridnev S.A., Kalinin Y.E., Sitnikov A.V., Stognei O.V. "Nonlinear phenomena in nano- and microheterogeneous systems" ("Nelineynyye yavleniya v nano- i mikroheterogennykh sistemakh"), Moscow, BINOM, *Laboratory of Knowledge*, 2012, 352 p.
2. Babkina I.V., Gabriel's K.S., Epryntseva T.I. et al. "Effect of Thermal Treatment on the Electronic Transportation Properties of Thin Film In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO Materials and the Multilayer (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO)<sub>83</sub> Heterostructure" ("Vliyaniye termicheskoy obrabotki na elektrotransportnyye svoystva tonkoplennochnykh materialov In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO i mnogosloynoy (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO)<sub>83</sub>" geterostruktury"), *Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Physics*, 2016, vol. 80, no. 9, 1168-1171 pp.
3. Grebennikov A.A., Stognei O.V. "Size effect in Ni<sub>x</sub>(MgO)<sub>100-x</sub> nanocomposites", *Solid State Phenomena*, 2011, vol. 168-169, 361-364 pp.
4. Vanderstraeten H., Neerincx D., Temst K., Bruynseraede Y. "Low Angle X-ray Diffraction of Multilayered Structures", *Journal of Applied Crystallography*, 1991, vol. 24, 571-575 pp.
5. Altshuler B.L., Aronov A.G. "Electrons interaction in disordered conductors", *Elsevier Science Publisher*, 1985, Chapter 1, 1-153 pp.
6. Tambasov I.A. et al "Weak localization and size effects in thin In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films produced by auto wave oxidation", *Physica E*, 2016, vol. 84, 162-167 pp.

## ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ВОДНЫХ ПЛЕНОК НА СТРУКТУРУ КОМПОЗИЦИОННОГО СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОСФОГИПСА

**С.Н. Золотухин, О.Б. Кукина, А.А. Абраменко, А.А. Гапеев, Е.А. Соловьева, Е.А. Савенкова**

На сегодняшний день существуют различные способы переработки фосфогипса. В настоящее время авторами статьи разрабатывается технология безобжиговых бесцементных строительных материалов на основе фосфогипса, требующая корректировки для запуска производства стеновых перегородок в промышленных объемах. Преимущество разрабатываемой технологии над существующими в более низких трудо-, энерго-, времязатратах, а также в снижении стоимости конечного материала за счет применения дешевых компонентов смеси. Проведен анализ технологии переработки фосфогипса с использованием обжига, варки в гипсоварочных котлах, автоклавирования. Эти исследования не привели к широкому использованию фосфогипса. Отход фосфогипса продолжает храниться в отвалах, что требует большого количества земли и является экологической проблемой. Технология безобжиговых бесцементных строительных материалов на основе фосфогипса, разрабатываемая авторами статьи, построена на представлении механизма влияния толщины водных пленок на процессы структурообразования между нано- и микроразмерными частицами строительного композита. Приведены данные дифференциально-сканирующей калориметрии, рентгенофазового и микроскопического анализа, подтверждающие гипотезу о том, что толщина водных пленок влияет на формирование нано- и микроструктур поверхностей минеральных компонентов при температурах 60 ... 65 °С и хорошо работает в любых гидратных гидрофильных системах композиционных строительных материалов

Ключевые слова: технология, безобжиговые бесцементные эффективные строительные материалы, фосфогипс, структура

### Введение

В структурообразовании композиционных строительных материалов (КСМ) наибольшее значение имеют электростатические и гравитационные взаимодействия, которые зависят от масс, величины зарядов частиц их образующих, от расстояния между частицами и среды их взаимодействия. Реализуются эти взаимодействия посредством чередующихся полей притяжения и отталкивания, образующихся вокруг частиц, входящих в структуру КСМ.<sup>1</sup>

Исследователи, изучающие структуру композиционных материалов, на микрофотографиях контактных слоев между взаимодействующими частицами наблюдают воздействие этих полей в виде чередующихся уплотнений и разряжений частиц матрицы, которое при удалении от частиц наполнителя

(наполнителя) затухает. Причем величина и размеры уплотнений, разряжений (полей) зависят от минерального состава наполнителей и их гранулометрии. Таким образом, внешние поля (ВП), образующиеся вокруг минеральных компонентов (МК) КСМ, имеют большое влияние на свойства получаемых материалов.

Хотелось бы отметить важность влияния именно ВПМК на процессы структурообразования КСМ, так как принцип полиструктурности подразумевает наличие структур, обладающих собственными полями притяжения и отталкивания, которые зависят от расстояния между рассматриваемыми объектами. Иными словами, частицы МК (гипса, песка и т. п.), как объект исследования КСМ, также многоструктурны, т. е. обладают большим числом собственных структур, имеющих собственные поля притяжения и отталкивания, которые, налагаясь друг на друга, образуют структуры внешних и внутренних полей частиц. Такая структурная иерархия обуславливает своеобразие возбужденных состояний, в котором находится весь композит в целом, так как наряду с внутренними состояниями отдельных структур существуют относительные движения этих структур, интенсивность и характер которых и определяют свойства получаемых материалов.

Особое место в формировании структуры гидратных КСМ принадлежит воде. Вода является средой, в которой происходят взаимодействия частиц, а среда, как уже отмечалось, предопределяет силы взаи-

Золотухин Сергей Николаевич - ВГТУ, канд. техн. наук, профессор, e-mail: ser6812@yandex.ru

Кукина Ольга Борисовна - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: lgkkn@rambler.ru

Абраменко Анатолий Александрович – ВГТУ, проректор по капитальному строительству, эксплуатации зданий и сооружений, e-mail: abramenko\_aa@mail.ru

Гапеев Артем Александрович – ВИ ГПС МЧС России, канд. хим. наук, преподаватель, e-mail: kgratos\_1987@mail.ru

Соловьева Екатерина Александровна – ВГТУ, техник, e-mail: sos71@list.ru

Савенкова Екатерина Александровна – ВГТУ, техник, e-mail: ser6812@yandex.ru



модействия между частицами.

Вода обладает многими замечательными свойствами, которые выделяют ее в один из основных структурообразующих компонентов, получаемых КСМ. Прочность, химическая стойкость, плотность и другие показатели КСМ зависят от положения, которое занимает вода в структуре рассматриваемого композита. Известно, что вода в структуре КСМ является химически связанной, адсорбционной, свободной. Кроме того, существует три различных вида координаций молекул воды: вода I имеет структуру типа льда с тетраэдрической координацией молекул; вода II характеризуется четвертой координацией молекул и имеет тетраэдрическую структуру типа кварца; вода III включает плотную упаковку молекул, возникающую в результате разрушения направленных водородных связей. Все три фазы находятся в термодинамическом равновесии и одна из них преобладает в зависимости от внешних условий.

Вода легко входит во взаимодействие с ВП составляющих КСМ, переходя в пленочное состояние. При этом под воздействием ВП нарушается термодинамическое равновесие всех трех видов координаций молекул воды и идет перестройка как ВПМК, так и воды с получением термодинамически стабильного состояния системы в целом [1].

Авторы статьи проводили исследования влияния толщины водных пленок, образующихся на поверхности различных наполнителей КСМ, с целью проверки теории, выдвинутой Б.В. Дерягиным [2, 3]. Влияние водных пленок на стабильность коллоидных систем, которые присутствуют в известково-песчано-фосфогипсовом материале (ИПФМ) с точки зрения химической термодинамики можно определить следующим образом: в гидрофильных системах при медленном сближении частиц дисперсной фазы прослойка жидкости между ними вначале будет уменьшаться без затраты работы и изменения свободной энергии системы  $\Delta F$ . Однако, начиная с некоторого расстояния  $\Delta = 2\delta$  ( $\delta$  – величина водной оболочки вокруг каждой из частиц), необходимо учитывать силы межмолекулярного взаимодействия дисперсионной среды и дисперсной фазы. Величина прослойки  $\Delta$  зависит от степени этого взаимодействия. Так, в случае значительных сил молекулярного сцепления, способствующих сближению частиц дисперсионной среды и дисперсной фазы при  $\Delta \geq 1 \cdot 10^{-7}$  м. Дальнейшее медленное сближение частиц вызывает увеличение избытка свободной поверхностной энергии  $\Delta F_u$ ,

следовательно, самопроизвольно протекать не может. Поэтому сближение частиц требует приложения энергии, которая в наших экспериментах создавалось за счет приложения внешнего давления.

В ранее выполненных исследованиях было замечено, что водные пленки в гидратных высокодисперсных системах становятся термодинамически нестабильными (резко меняют свою толщину) при изменении pH среды и при возрастании температуры более 60 °С [4 – 6].

Стабильность гидратной дисперсной системы обусловлена расклинивающим давлением, возникающим в прослойке жидкости между частицами дисперсной фазы.

По мере сближения частиц минеральных компонентов, под действием внешних сил, избыток свободной энергии систематически растет, достигая максимума при величине  $\Delta \approx 10^{-8} \dots 10^{-9}$  м.

Из вышесказанного было сделано предположение, что в высокодисперсных гидратных системах, обладающих избыточной свободной поверхностной энергией (фосфогипс-дигидрат, известь, высокодисперсная супесь являются такими материалами), создание условий с получением гидратных пленок оптимальной толщины будет способствовать получению ИПФМ с прочностью достаточной для использования в качестве несущих стеновых материалов.

### Материалы, оборудование и методы исследования

В качестве компонентов сырьевой смеси использовали:

- лежалый двуводный отвалный фосфогипс Уваровского химического завода с удельной поверхностью более 2500 см<sup>2</sup>/г. Площадь отвалов 6,4 км<sup>2</sup>, объем достигает порядка 35 млн.т;

- супесь с удельной поверхностью 4000 – 4500 см<sup>2</sup>/г из карьера Уваровского района Тамбовской области, находящегося в непосредственной близости от залежей фосфогипса;

строительную негашеную известь (производитель: г. Россось, «Придонхимстройизвесть»); расфасовано: г. Воронеж, «Стройторгсервис»), дисперсность после гашения составляет более 9000 см<sup>2</sup>/г [4, 7 – 10].

Смесь для формования готовилась следующим образом: в смеситель с температурой подогрева 60 ... 80 °С насыпали и перемешивали супесь с фосфогипсом,

параллельно в другой емкости горячей водой гасили известь, которую добавляли к сухим компонентам в процессе гашения. Затем все компоненты перемешивались до получения однородной массы с температурой не менее 60 °С. После чего полученная смесь прессовалась при давлении 1 т на образец. Выбор давления прессования был обоснован давлением типового оборудования по производству силикатного кирпича. Набор прочности образцов происходил в нормальновлажностных условиях твердения [4].

Водотвердое отношение (В/Т) исследуемых составов подбиралось из условия удобного формования и получения бездефектных образцов.

Механогидрохимическую активацию производили в лабораторной мешалке МЛА-30, с частотой вращения лопасти вокруг своей оси 126 об/мин, максимальная температура подогрева (200 ± 5) °С.

Водородный показатель рН определялся при помощи иономера И-160.

Физико-механические свойства образцов определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 23789-79, ГОСТ 8736-93, ГОСТ 5802-86, ГОСТ 310.4.81, ГОСТ 22688-77, ГОСТ 125-79.

Весовые характеристики определяли при помощи электронных лабораторных весов РН-3413 с точностью до 1 г.

Формование образцов (цилиндров размером 5 × 5 см) производилось при помощи гидравлического пресса ПСУ-125.

Предел прочности при сжатии образцов-цилиндров в возрасте 1, 3, 7, 14, 28 суток определяли при помощи универсальной электромеханической испытательной системы Instron 5982, погрешность по нагрузке ± 0,5 %.

Водопоглощение, водостойкость определялось по ГОСТ 6428-83, ГОСТ 8462-75

#### Свойства бесцементного безобжигового ИПФ композиционного строительного материала

Номер состава	Состав			Предел прочности при сжатии (28 суток), МПа	В/Т	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент водопоглощения	Коэффициент размягчения
	Известь, %	ФГ, %	Сульф, %					
1	10	60	30	4,76	0,30	1734	0,23	0,63
2	30	70	0	1,97	0,50	1565	0,32	0,57
3	50	50	0	2,35	0,78	1507	0,34	0,50

Дифференциально-сканирующая калориметрия проводилась на приборе синхронного термического анализа STA 449 F5 A-0082-M (NETSCH, Германия) с программным обеспечением NETSCH Proteus. При выполнении методом дифференциально-сканирующей калориметрии проба образца принималась постоянной и равной 5...7 мг. Скорость подъема температуры составила 10 °С/мин. Диапазон температур от 30°С до 1000 °С. На рис. 1 – 3 представлены результаты исследований на приборе синхронного термического анализа STA 449 F5 A-0082-M (NETSCH, Германия).

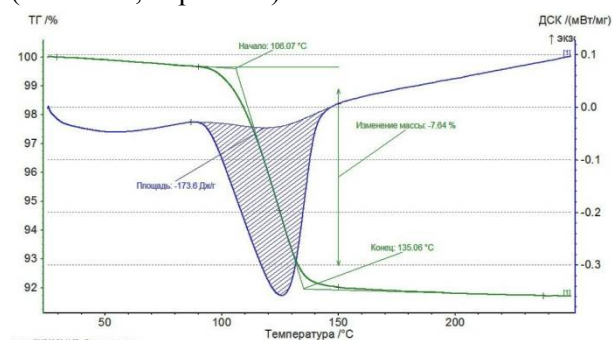


Рис. 1. Результаты термического анализа 1 состава

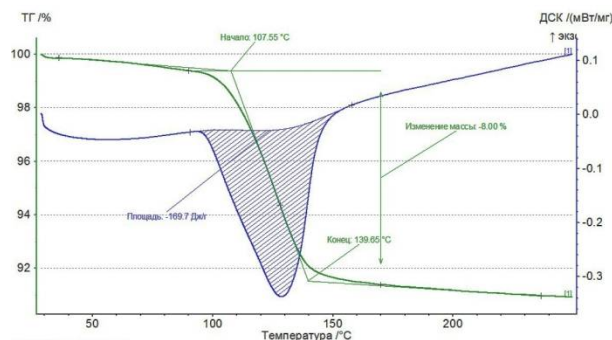


Рис. 2. Результаты термического анализа 2 состава

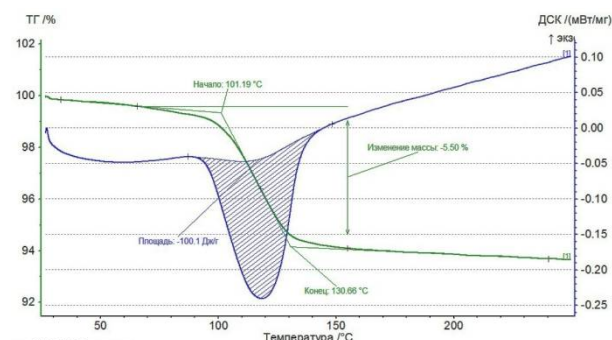


Рис. 3. Результаты термического анализа 3 состава

### Результаты исследований

Для термического анализа были выбраны составы 1, 2, 3, у которых коэффициенты размягчения имели значения соответственно

0,63; 0,57; 0,50. Оценка энергетической составляющей процессов дегидратации воды в процессе термического анализа показала, что у 1 состава энергия дегидратации воды составила 173,6 Дж/г, у 2 состава – 169,7 Дж/г, а у 3 состава – 100,1 Дж/г. Таким образом, величина коэффициента размягчения увеличивается с увеличением массовой доли фосфогипса в сырьевой смеси ИПФМ. При этом увеличивается плотность материала. Это говорит о существенном вкладе фосфогипса при процессах структурообразования ИПФМ.

Для подтверждения полученной зависимости образцы ИПФМ были исследованы на автоматическом дифрактометре PANalytical EMPYREAN с использованием излучения  $\text{Cu K}\alpha_1$  (гибридный  $\text{Ge}\{111\}$  монохроматор на первичном пучке) и позиционно-чувствительного детектора PIXcel<sup>1D</sup>. Измерение проводили в режиме отражения,  $\theta/2\theta$  сканирование с шагом  $0.026^\circ$  по  $2\theta$ . Диапазон измерения  $15 - 80^\circ 2\theta$ . Расчет межплоскостных расстояний и интегральных интенсивностей, используемых для уточнения параметров ячейки, проводился по данным профильного анализа экспериментальных дифрактограмм (метод Паули). Фазовый анализ (полуколичественный) проводился с использованием «порошковой» базы данных PDF-2 ICDD (международного центра дифракционных данных). Все расчеты по уточнению дифрактограмм, определению и уточнению параметров ячеек, определению фазового состава проводились с использованием комплекса программ HighScore Plus, Version:3.0.t (3.0.5), Date 30-01-2012. Produced by: PANalytical B.V. Amelo, The Netherland.

При сравнении дифрактограмм исходных сырьевых компонентов и безцементного безобжигового ИПФМ можно сделать вывод, что в композите исчезла фаза полуводного гипса, наблюдающаяся у фосфогипса из-за процессов гидратации полуводного гипса с превращением его в двуводный. Часть фазы портландита тоже перешла в ходе химических процессов за счет карбонизации в фазу карбоната кальция.

Рентгенофазовый анализ фосфогипса дигидрата и ИПФМ не показал наличие продуктов нейтрализации остатков кислот известью – водорастворимых соединений фосфора и фтора, которые в составе кристаллической решетки могли влиять на процессы структурообразования композита [11].

На рис. 4 представлены множественные контакты примыкания, срастания, прорастания между отдельными кристаллами различных фаз: портландита (в виде призм), кварца (в виде слоистых плоскостей) и фосфогипса (в виде игл).

Частицы извести, глины, фториды, фосфаты, сульфаты, гидросульфаты, благодаря своей высокой дисперсности, заполняют пространство между кристаллами фосфогипса дигидрата, создавая оптимальные толщины водных пленок, что хорошо видно на микрофотографии (рис. 4).



Рис. 4. Микрофотография структуры ИПФМ

На микрофотографии структуры ИПФМ видно, что расстояния между некоторыми плоскостями кристаллизации достигают приблизительно  $1 \times 10^{-7}$  м. Полученные микрофотографии хорошо подтверждают гипотезу о влиянии водных пленок на стабильность коллоидных систем, которые присутствуют в ИПФМ.

## Выводы

1. Наилучшими физико-механическими свойствами, коэффициентами водопоглощения и размягчения обладают системы ИПФМ с содержанием фосфогипса дигидрата 50 ... 60 %, извести 10 %, супеси 40 ... 30 %.

2. Величина коэффициента размягчения увеличивается с увеличением массовой доли фосфогипса в сырьевой смеси ИПФМ.

3. При твердении ИПФМ фаза полуводного гипса, превращается в фазу двуводного гипса. При прессовании между плоскостями кристаллов портландита, фосфогипса, кварца, глины, фторидов, фосфатов, сульфатов, гидросульфатов происходят процессы срастания с появлением контактов срастания, прорастания, примыкания с образованием

кристаллизационных структур и ван-дер-ваальсовых сил взаимодействия.

4. Расстояния между некоторыми плоскостями кристаллизации достигают приблизительно  $1 \times 10^{-7}$  м. Это хорошо подтверждает гипотезу о том, что если толщина водных пленок на поверхности гидратированных гидрофильных частиц составляет  $10^{-7} \dots 10^{-9}$  м, то при этом происходит переход через порог от расклинивающего давления к преобладанию сил, способствующих притяжению частиц друг к другу и появлению у этих материалов прочностных свойств.

5. Сушка при температурах 60 ... 65 °С полученных материалов приводит к уменьшению толщины водных пленок между частицами и способствует дальнейшему росту прочности. Твердение в сухих условиях ведет к уменьшению толщины водных пленок, увеличению силы кристаллизационных контактов между частицами разной дисперсности (от 50 мкм до наноразмерных) и значительному росту прочности получаемого ИПФМ.

6. По данным рентгенофазового анализа эффект роста кристаллогидратов новообразований не был замечен, следовательно, можно предположить, что прочность создается за счет наличия водных пленок с наноразмерной толщиной.

7. Предположение о том, что толщина водных пленок влияет на формирование нано- и микроструктур для кварцевых поверхностей при температурах 60 ... 65 °С подтвердилось и хорошо работает в любых гидратных гидрофильных системах.

8. Понимание механизма влияния толщины водных пленок на процессы структурообразования гидратных гидрофильных систем позволяет прогнозировать, что различные технологические приемы, приводящие к уменьшению их толщины, будут приводить к росту прочностных и иных показателей

материалов, полученных по безобжиговым технологиям.

#### Литература

1. Золотухин С.Н. К вопросу о структурообразовании и технологии некоторых эффективных композиционных строительных материалов / С.Н. Золотухин // Строительные материалы. - 1993. - № 5. - С. 26.
2. Дерягин Б.В. Поверхностные силы / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, В.П. Муллер. - М.: Наука. - 1985. - 398 с.
3. Вода в дисперсных системах / Б.В. Дерягин, Н.В. Чуров, Ф.Д. Овчаренко и др. - М.: Химия, 1989. - 288 с.
4. Патент на изобретение 2584018 Российской Федерация, МПК С04В11/26 (2006.01). Сырьевая смесь для изготовления строительных изделий по безобжиговой технологии / Золотухин С.Н., Ибрагим Ф., Савенкова Е.А., Соловьева Е.А., Лобосок А.С., Абраменко А.А., Драпалюк А.А., Потапов Ю.Б.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. № 2015106177/03; заяв. 24.02.15 г.; опубл. 20.05.2016 г.
5. Pat. CN105524325 (A) People's Republic of China, Int. Cl. B32B33 / 00 ; C04B24 / 26 ; C04B28 / 14 ; C04B41 / 50 ; C08K3 / 30 ; C08L23 / 06 ; C09D167 / 04 ; C09D7 / 12 ; E04F13 / 077. Novel utilization method of phosphogypsum / YANG GANG; applicant YANG GANG. - № CN20141502977; appl. 28.09.14; publ. 27.04.16. - 8 p.
6. Pat. CN105399392 (A) People's Republic of China, Int. Cl. C04B18 / 08 ; C04B28 / 14. Bricks made from semi-hydrate phosphogypsum and making method thereof / LI JIANQIU; LONG HUI; HUANG ZHENGPING; ZHANG JIAYUN; MA YONGQIANG; applicant GUIZHOU CHANHEN CHEMICAL CI LTD. - № CN20151852570; appl. 30.11.15; publ. 16.03.16. - 7 p.
7. Семенов В.Н. Строительные растворы на основе фосфогипса и безобжиговой технологии: Дис... канд. техн. наук. - Воронеж, 2002 - 144с.
8. Шмелев Г.Д. Эффективные фосфогипсовые композиции для строительных изделий из многотоннажных техногенных отходов химического производства: Дис... канд. техн. наук. - Воронеж, 1998 - 256 с.
9. Бачаускене М.К. Дегидратация фосфогипса и технология его тепловой обработки для получения β-полугидрата сульфата кальция: Дис... канд. техн. наук. Каунас, 1985 - 286с.
10. Стонис С.Н. Проблемы производства экстракционной фосфорной кислоты и охраны природы / С.Н. Стонис. - М.: НИУИФ, - 1985. С. 106-107.
11. Абраменко А.А. Строительные материалы на основе фосфогипса / А.А. Абраменко // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. 2017. № 1. С. 65 -70.

Воронежский государственный технический университет

Воронежский институт государственной противопожарной службы МЧС России

## INFLUENCE OF THICKNESS OF WATER FILMS ON THE STRUCTURE OF COMPOSITE BUILDING MATERIAL BASED ON PHOSPHOGYPSUM

S.N. Zolotukhin<sup>1</sup>, O.B. Kukina<sup>2</sup>, A.A. Abramenko<sup>3</sup>, A.A. Gapeev<sup>4</sup>, E.A. Solov'eva<sup>5</sup>, E.A. Savenkova<sup>6</sup>

<sup>1</sup>PhD, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

e-mail: ser6812@yandex.ru

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: lgkkn@rambler.ru

<sup>3</sup>Provost of capital construction, operation of buildings and structures, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

e-mail: abramenko\_aa@mail.ru

<sup>4</sup>PhD, Assistant Professor, Voronezh Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Voronezh, Russian Federation

e-mail: kratos\_1987@mail.ru

<sup>5</sup>Technician, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

e-mail: sos71@list.ru

<sup>6</sup>Technician, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

e-mail: ser6812@yandex.ru

There are various ways of phosphogypsum processing nowadays. At present, the authors of this article are developing the technology of unfired cement-free building materials based on phosphogypsum. That requires adjustments to start the production of wall partitions in industrial volumes. The advantage of the developed technology is lower labor, energy, and time costs, as well as lower cost of the final material due to the use of cheap components of the mixture. The analysis of phosphogypsum processing technology with the use of firing, boiling in gypsum boilers and autoclaving is carried out. These studies did not lead to widespread use of phosphogypsum. The waste of phosphogypsum continues storing in dumps, which requires a large amount of land and is an environmental problem. The technology of unfired cement-free building materials based on phosphogypsum, developed by the authors of this article, is based on the mechanism of influence of the thickness of water films on the processes of structure formation between nano- and micro-sized particles of the building composite. The data of differential scanning calorimetry, X-ray phase, and microscopic analysis confirm the hypothesis that the thickness of water films influences the formation of nano- and microstructures for quartz surfaces at temperatures of 60 - 65 °C and works well in any hydrated hydrophilic systems

Key words: technology, unfired cement-free effective building materials, phosphogypsum, structure

## References

1. Zolotukhin S.N. "On the question of the structure formation and technology of some effective composite building materials" ("K voprosu o strukturoobrazovanii i tekhnologii nekotorykh effektivnykh kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov"), *Stroitel'nye Materialy*, 1993, 26 p.
2. Deryagin B.V., Churaev N.V., Muller V.P. "Surface forces" ("Poverkhnostnye sily"), Moscow, Nauka, 1985, 398 p.
3. Deryagin B.V., Churov N.V., Ovcharenko F.D. "Water in disperse systems" ("Voda v disperstnykh sistemakh"), Moscow, Khimiya, 1989, 288 p.
4. Zolotukhin S.N., Ibragim F., Savenkova E.A., Solov'yova E.A., Lobosok A.S., Abramenko A.A., Drapalyuk A.A., Potapov Yu.B. "Raw material mixture for the manufacture of building products by using non-firing technology" ("Syr'evaya smes' dlya izgotovleniya stroitelnykh izdeliy po bezobzhigovoy tekhnologii"), Patent RF 2584018, 2016.
5. Pat. CN105524325 (A) People's Republic of China, Int. Cl. B32B33 / 00; C04B24 / 26; C04B28 / 14; C04B41 / 50; C08K3 / 30; C08L23 / 06; C09D167 / 04; C09D7 / 12; E04F13 / 077. Novel utilization method of phosphogypsum / YANG GANG; Applicant YANG GANG. - No. CN20141502977; Appl. September 28, 1944; Publ. 27.04.16. - 8 p.
6. Pat. CN105399392 (A) People's Republic of China, Int. Cl. C04B18 / 08; C04B28 / 14. Bricks made from semi-hydrate phosphogypsum and making method thereof. LI JIANQIU; LONG HUI; HUANG ZHENGPING; ZHANG JIAYUN; MA YONGQIANG; Applicant GUIZHOU CHANHEN CHEMICAL CI LTD. - No. CN20151852570; Appl. 30.11.15; Publ. 16.03.16. - 7 p.
7. Semenov V.N. "Construction solutions based on phosphogypsum and non-firing technology" ("Stroitel'nye rastvory na osnove fosfogipsa i bezobzhigovoy tekhnologii"), *Dissertatsiya*, Voronezh, 2002, 144 p.
8. Shmelev G.D. "Effective phosphogypsum compositions for building products from multiple-tonnage technogenic wastes of chemical production" ("Effektivnye fosfogipsovye kompozitsii dlya stroitel'nykh izdeliy iz mnogotonazhnykh tekhnogennykh otkhodov khimicheskogo proizvodstva"), *Dissertatsiya*, Voronezh, 1998, 256 p.
9. Bachauskene M.K. "Dehydration of phosphogypsum and its heat treatment technology for the production of  $\beta$ -hemihydrate calcium sulfate" ("Degidratatsiya fosfogipsa i tekhnologiya yego teplovy obrabotki dlya polucheniya  $\beta$ -polugidrata sul'fata kal'tsiya"), *Dissertatsiya*, Kaunas, 1985, 286 p.
10. Stonis S.N. "Problems of production of extraction phosphoric acid and conservancy" ("Problemy proizvodstva ekstraktsionnoy fosfornoj kisloty i okhrany prirody"), Moscow, NIUIF, 1985, pp. 106 - 107.
11. Abramenko A.A. "Building materials based on phosphogypsum" ("Stroitel'nye materialy na osnove fosfogipsa"), VGTU, 2017.