

Негосударственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Камский институт гуманитарных и инженерных технологий»



# **ВЕСТНИК КИГИТ**

СЕРИЯ 1. Механика и физика: фундаментальные  
и прикладные исследования

№ 01 (43) • 2014

Ижевск 2014

ББК 60  
УДК 378

**Редакционный совет:** председатель – докт. техн. наук, канд. физ.-мат. наук, проф., академик **Никулин В.А.**; зам. председателя – канд. экон. наук, PhD, доцент, академик РИА **Дегтева О.А.**; докт. техн. наук, член-корр. Королевской академии (Испания), профессор **Митюков Н.В.**

**Ответственный редактор серии:** проф., канд. физ.-мат. наук, докт. техн. наук, Заслуженный деятель науки УР, Почетный работник высшей школы РФ, Почетный работник науки и техники РФ **Никулин В.А.**

**Члены совета:** докт. техн. наук, проф., чл.-корр. РАН, лауреат Государственный премий и премий Правительства СССР и РФ **Гусев Б.В.**; канд. техн. наук, академик МИА, засл. работник аварийно-спасат. службы УР, лауреат Госпремии УР, генерал-майор **Фомин П.М.**; докт. техн. наук, ст.н.с., чл.-корр. РИА, лауреат премии Правительства РФ **Толстых А.В.**; докт. техн. наук, проф., чл.-корр. РАН, академик РИА, лауреат премии Правительства РФ **Григорьев Б.А.**; докт. техн. наук, профессор, засл. деятель науки РФ **Касаткин В.В.**; докт. техн. наук, профессор, засл. работник высшей школы РФ, Почетный работник высшего проф. образования РФ, засл. работник народного образования УР **Сенилов М.А.**; докт. экон. наук, профессор, Почетный работник ВПО РФ, заслуженный деятель науки УР **Павлов К.В.**; докт. техн. наук **Спиридонов С.В.**

**Рецензенты:** Российская инженерная академия (РИА); Удмуртское отделение Российской инженерной академии, секция РИА «Проблемы инженерного и научного образования».

**Вестник КИГИТ:** СЕРИЯ 1. Механика и физика: фундаментальные и прикладные исследования. Ижевск: Издательство КИГИТ, 2014. 68 с.

**ISSN 2308-6769**

© НОУ ВПО «Камский институт гуманитарных и инженерных технологий», 2014

© Авторы, постатейно, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Никулин В.А.</i> Об одной модели теплообмена в пристенной турбулентности..4	
<i>Личагин И.Ю., Ким С.Л.</i> Разработка интегральных схем на основе эффекта размерного квантования .....	13
<i>Новгородцев С.П., Телегина М.В.</i> Модернизация метода Лавса для разпознавания текстуры объектов аэрофотоснимков.....	18
<i>Логвин В.В., Козлов А.В., Рожков Андр.И., Рожков Ант.И., Грудницкий О.М., Феклистов А.В.</i> Об эффективности системы статических тиристорных компенсаторов на примере БМЗ.....	24
<i>Дейниченко Г.В., Погребняк А.В.</i> Динамика растворов полимеров во время протекания через струеформирующую головку при гидрорезании пищевых продуктов.....	32
<i>Афанасьев В.А.</i> Задание допустимой ошибки измерений .....	45
<i>Сократов А.В., Телегина М.В.</i> Использование интеллектуального анализа для определения ситуации на потенциально опасном объекте .....	51
<i>Архипов И.О., Гитлин В.Б.</i> Нормированный коэффициент корреляции с единичной задержкой как мера спектра шума.....	55
<i>Коробейников А.В.</i> Трехмерные целочисленные вейвлеты Хаара .....	61

**В.А. Никулин**, докт. техн. наук, проф., академик РИА и МИА,  
Камский институт гуманитарных и инженерных технологий

## ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООБМЕНА В ПРИСТЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

*На основе модели регулярной пристенной турбулентности рассмотрены основные осредненные и интегральные характеристики процессов теплопереноса на примере течения жидкости с теплообменом в гладкой трубе.*

*Based on the model of regular near wall turbulence and describes the main averaged and integral characteristics of heat transfer processes on the example of the fluid flow with heat transfer in a smooth tube.*

**Ключевые слова:** турбулентность, теплообмен, пограничный слой

**Keywords:** turbulence, heat exchange, boundary layer

Процессы турбулентного переноса по-прежнему являются наиболее сложной областью механики жидкости и газа. Помимо незамкнутости основной системы уравнений турбулентного движения, задача осложняется отсутствием точной картины микроструктуры течения вблизи стенки.

Анализ известных экспериментальных исследований структуры турбулентного пограничного слоя показал:

- 1) течение в вязком подслое неламинарно и существенно нестационарно;
- 2) в пристенной области происходит обновление течения вследствие внезапного разрушения подслоя под воздействием некоторого механизма неустойчивости, при этом замедленная жидкость из подслоя выбрасывается во внешнюю область пограничного слоя, а оттуда ускоренная жидкость вторгается почти до самой стенки;
- 3) выбросы представляют собой трехмерные возмущения, происходящие локально и беспорядочно во времени и пространстве, но частота и скорость выбросов, их характерный поперечный размер представляют измеримую функцию параметров среднего течения;
- 4) количественные характеристики периода обновления подслоя противоречивы и требуют дальнейших исследований и совершенствования методики измерений;
- 5) отрицательные продольные градиенты давления увеличивают период обновления подслоя, т.е. ламинаризуют потоки [1, 2].

Теоретические исследования позволяют заключить, что выбросы являются случайным процессом в пространстве и во времени, но имеют регулярную периодическую структуру, причем частота выбросов определенным образом зависит от условий течения. (Характерный временной масштаб обновления течения целесообразно определять через внутренние (динамические) параметры, а характерный поперечный масштаб выбросов зависит в основном от параметров осредненного течения [3 – 5]). Наиболее интенсивная генерация турбулентности происходит в момент выбросов жидкости из подслоя.

Установившаяся регулярная микроструктура течения практически полностью определяет процессы турбулентного тепло- и массообмена в пограничном слое. Для получения основных осредненных и интегральных характеристик тепло- и массопереноса вблизи стенки используем модель турбулентного пограничного слоя с регулярно обновляющимся течением в вязком подслое.

В цикле разрушения подслоя и нового его развитие (процессе обновления течения) выделяются следующие стадии: турбулентные пульсации переносят жидкие частицы из внешней области к стенке, что вызывает локальное увеличение момента количества движения жидкости; скорость движения частиц тормозится, при этом в результате их взаимодействия со стенкой появляется дополнительный градиент скорости; внутри подслоя развивается дополнительное вязкое движение, обусловленное этим градиентом скорости, нарушается стабильность потока, происходит нарастание неустойчивости, сопровождающееся быстрым разрушением («взрывом») вязкого течения у стенки и выбросом объема жидкости в виде отрыва пристеночной струйки вязкой жидкости, при удалении от стенки перерастающей в подковообразный или поперечно ориентированный вихрь – зарождение нового вязкого движения. Затем все циклично повторяется.

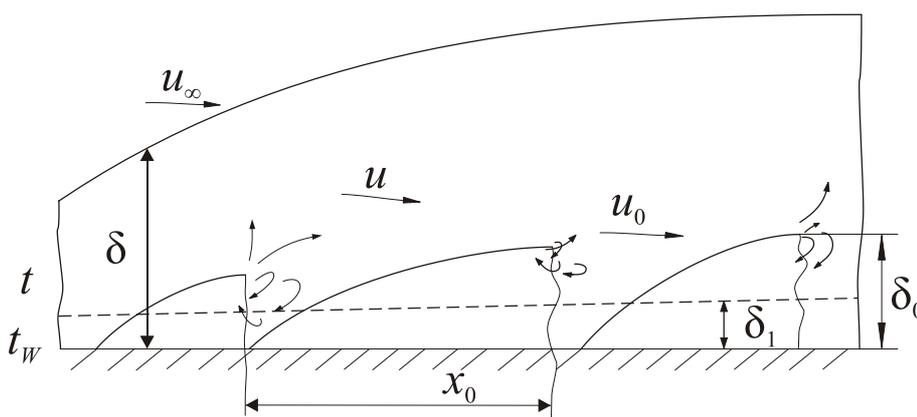


Рис. 1. Схема турбулентного пограничного слоя

В расчетной модели, разработанной в работах [5 – 8], в структуре пограничного слоя выделены области: пристеночная (периодически разрушающийся вязкий подслой) и внешняя, (рис. 1), и сделаны следующие основные допущения:

- развитие вязкого подслоя можно описать как ламинарное течение, на которое накладывается дополнительный градиент скорости, обусловленный проникновением в подслой турбулентных вихревых образований, т.е. применяется принцип суперпозиции течения в пристеночной области;

- время разрушения подслоя пренебрежимо мало по сравнению со временем развития подслоя;

- процесс квазистационарный, т.е. проникающие пульсации имеют одинаковые размеры и интенсивность;

- основная часть пульсаций и переносимых ими жидких молей подходит на близкие расстояния к стенке, но не входит с ней в контакт.

Таким образом, считается, что подслоем ( $0 \leq y \leq \delta_1$ ) состоит из нарастающих участков ламинарного течения, толщина которых в момент разрушения  $\delta_0$  определяется локальной неустойчивостью потока.

В пределах развивающегося участка вязкого подслоя напряжение определяется как вязкими силами, так и проникающими к стенке турбулентными пульсациями:

$$\tau_\omega = \mu \frac{du}{dy} + \mu_1 g, \quad (0 \leq y \leq \delta) \quad (1)$$

В турбулентном ядре основную роль играют вихревые системы, размеры которых существенно больше размеров молекул, поэтому по принципу суперпозиции

$$\tau_2 = \mu_\varepsilon \frac{du}{dy} = (\mu + \mu_2) \frac{du}{dy}, \quad (\delta_1 \leq y \leq \delta) \quad (2)$$

Здесь  $\tau_\omega = \rho u_*^2$  – касательное напряжение на стенке;  $\tau_2 = \rho l_\varepsilon^2 (du/dy)^2$  – напряжение трения во внешней области;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  $\mu_1 = \rho u_* l$  и  $\mu_2 = \rho \mu_\varepsilon (y - \delta_1)$  – соответственно коэффициенты турбулентной вязкости в подслое и во внешней области, а  $\mu_\varepsilon = \mu + \mu_2$  – коэффициент эффективной вязкости, которому соответствует понятие эффективной длины пути перемешивания  $l_\varepsilon \sim y$ ;

$g \sim \langle T \rangle \sim \frac{U_*}{\nu}$  – дополнительный градиент скорости в подслое, характеризующийся динамическими параметрами течения, т.е. внутренним временным масштабом.

После несложных преобразований из соотношений (1) – (2) находим

$$\varphi_1 = u/u_* = \eta - G_1 \eta^2 \quad (0 \leq \eta \leq \eta_1); \quad (3)$$

$$\varphi_2 = u/u_* = \frac{1}{x} \ln \eta + B + \frac{G_2}{\eta} \quad (\eta_1 \leq \eta \leq \eta_\delta); \quad (4)$$

где  $\eta = \frac{yu_*}{\nu}$ ,  $\eta_1 = \frac{\delta_1 u_*}{\nu}$ ,  $\eta_\delta = \frac{\delta u_*}{\nu}$ .

Сопряжем профили (3) и (4) условием максимальной гладкости

$$\left( \varphi_1 = \varphi_2, \frac{d\varphi_1}{d\eta} = \frac{d\varphi_2}{d\eta}, \frac{d^2\varphi_1}{d\eta^2} = \frac{d^2\varphi_2}{d\eta^2} \right)_{\eta=\eta_1}. \quad (5)$$

и найдем

$$B = \eta_1 - \frac{1}{\kappa} \ln \eta_1 - \frac{1}{2\kappa}; \quad (6)$$

$$G_1 = \frac{1}{3\eta_1} \left( 1 - \frac{1}{2\kappa\eta_1} \right); \quad G_2 = \frac{2\eta_1}{3} \left( \frac{1}{\kappa} - \frac{\eta_1}{2} \right). \quad (7)$$

Период существования участка разрушающегося подслоя можно определить как  $T_0 = \frac{x_0}{U_0}$  (см. рис. 1). Тогда из выражения для толщины ламинарного пограничного слоя:

$$\delta_0 = 5 \sqrt{\frac{\nu x_0}{U_0}} = 5 \sqrt{\nu T_0}. \quad (8)$$

А так как  $\delta_0 = 1/2G_1$  определяется из условия  $\frac{du}{dy} \Big|_{y=\delta_0} = 0$ , то нормированные выражения периода обновления подслоя примут вид (рис. 2):

$$T^* = \frac{T_0 u_*^2}{\nu} = \frac{1}{100G_1^2}; \quad (9)$$

$$T = \frac{T_0 U_\infty}{\delta^*} = \frac{u_*^2 T_0}{\nu} \left( \frac{U_\infty}{u_*} \right)^2 \frac{\nu}{U_\infty \delta^{**}} \cdot \frac{\delta^{**}}{\delta^*} = T^* \frac{\delta^{**}}{\delta^*} \cdot \frac{\varphi_\delta^2}{\text{Re}^{**}}, \quad (10)$$

и, соответственно, безразмерная частота обновления подслоя

$$f = \frac{1}{T^*} = 100G_1^2. \quad (11)$$

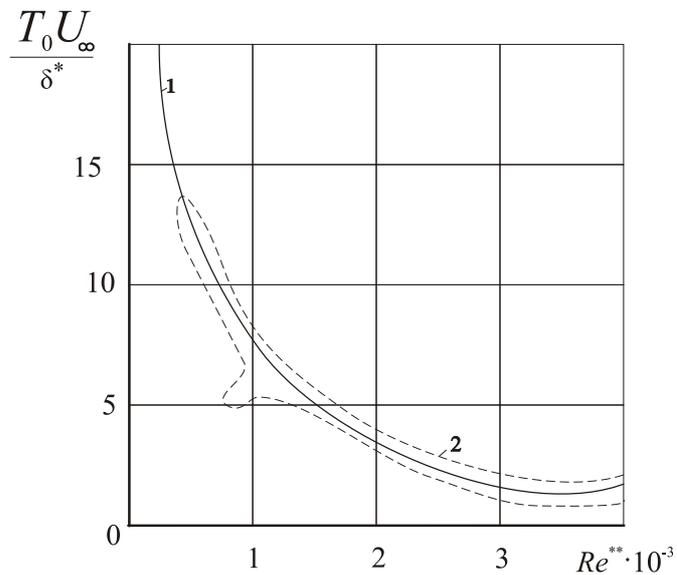


Рис. 2. Зависимость безразмерного периода обновления подслоя  $\bar{T}$  от числа  $Re^{**}$ :  
 1 – расчет по формуле (10); 2 – результаты расчета Е.У. Репика по экспериментально определенным характеристикам течения вязкой жидкости [1, 2].

В работе [6] получены численные значения всех параметров, входящих в выражения (3) – (11) для случаев течения в трубах, на плоской пластине и на криволинейной поверхности (теле вращения), а также основные пульсационные характеристики (вторые моменты) турбулентных течений.

Хорошее совпадение расчетных зависимостей для данной модели пристенного турбулентного течения с многочисленными экспериментальными данными разных авторов позволило использовать полученные соотношения для основных осредненных и интегральных характеристик процессов теплопереноса.

Наиболее распространенный в технических устройствах случай – течение несжимаемой жидкости с теплообменом в гладкой трубе. Для этого случая рассчитанные параметры:  $x = 0,4$ ;  $B = 5,5$ ;  $G_1 = 0,02286$ ;  $G_2 = -36,08$ ,  $\eta_1 = 13,2$ ,  $\eta_0 = 21,9$ ,  $T^r = 19,14$  и  $f = 0,052$ .

Распределение осредненной температуры при турбулентном течении несжимаемой жидкости в трубе можно получить из уравнения энергии. В случае одномерного движения без учета диссипативного члена имеем [7, 8]:

$$c_p \rho u \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\varepsilon + \varepsilon_t) y \frac{\partial t}{\partial y} \right]. \quad (12)$$

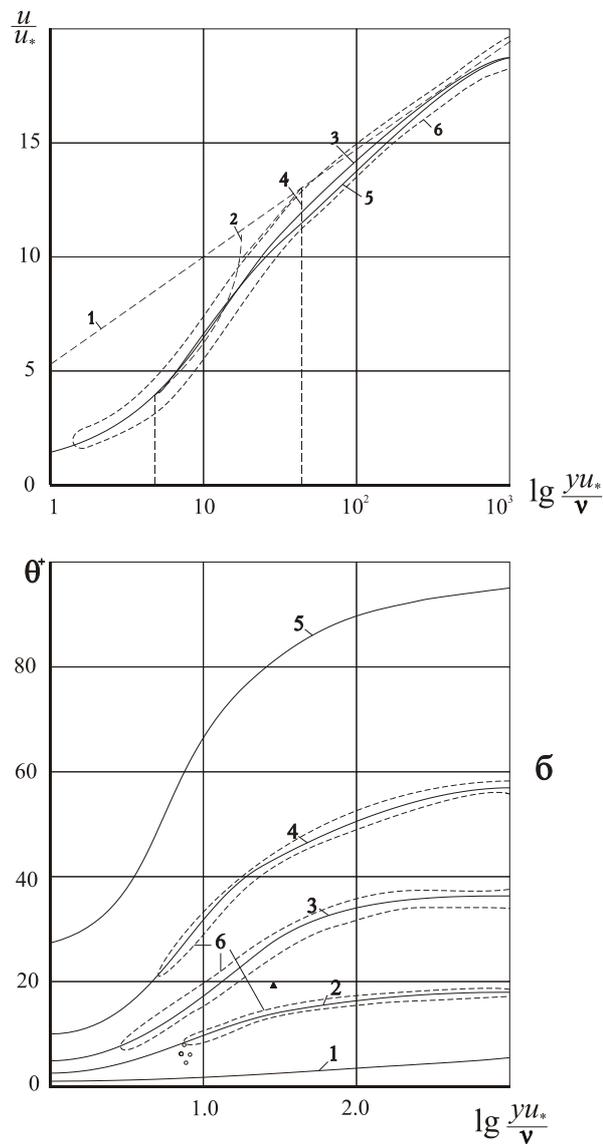


Рис. 3. Универсальные профили скорости (а) и температуры (б):

(а): 1 – логарифмический «закон стенки»; 2 – линейный профиль в подслое; 3 – бес-  
 слойная схема Ван-Дрифта; 4 – трехслойная схема по Карману (переходная зона); 5 – расчет  
 по формулам (3), (4); 6 – обобщение известных экспериментальных данных;  
 (б): 1 –  $Pr = 0,1$ ; 2 –  $Pr = 1,0$ ; 3 –  $Pr = 3,0$ ; 4 –  $Pr = 10$ ; 5 –  $Pr = 50$ ; 6 – обобщение извест-  
 ных экспериментальных данных.

Для течения с установившимся теплообменом  $\left(\frac{\partial t}{\partial x} = a_x = \text{const}\right)$  из уравнения (12) имеем:

$$q_w = (\varepsilon + \varepsilon_\tau) \frac{\partial t}{\partial y} = a_x c_p \rho \int_0^{R_0} u y dy. \quad (13)$$

После интегрирования и преобразований к безразмерному виду получены выражения для профиля температуры и безразмерного коэффициента теплопередачи (числа Нуссельта Nu):

$$t_w - t = \frac{2q_w D}{\lambda} \int_0^1 \left( \int_0^{\bar{R}} \frac{u}{U} \bar{R} d\bar{R} \right)^2 / \left( 1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_\tau} \right) \bar{R} \cdot d\bar{R}; \quad (14)$$

$$\text{Nu} \cong 2 \left[ \int_0^1 \frac{\bar{R}^3 d\bar{R}}{1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_\tau}} \right]^{-1}, \quad \bar{R} = 1 - \frac{y}{R_0}. \quad (15)$$

Откуда окончательно находятся искомые выражения:

$$\text{Nu} = \frac{2 \text{Re} \cdot \text{Pr} \sqrt{\xi}}{123,7 \ln|1 + 0,6 \text{Pr}| + 14,14 \ln \left| 1 + 0,08 \frac{\text{Pr}}{\sqrt{\xi}} + 0,07 \text{Pr} \right|}; \quad (16)$$

$$\Theta^+ = \begin{cases} 21,87 \ln|1 + 0,046 \text{Pr} \eta|, & 0 \leq \eta \leq 13,2; \\ 21,87 \ln|1 + 0,6 \text{Pr}| + 2,5 \ln|1 + 0,4 \text{Pr} \eta - 5,28 \text{Pr}|, & \eta \geq 13,2. \end{cases} \quad (17)$$

(Обработка экспериментальных данных, выполненная в работе /8/, показала, что при течении в трубах турбулентное число Прандтля близко к единице, поэтому принято  $\text{Pr}_T \approx 1$ .)

Полученные по данной модели зависимости  $\frac{\text{Re} \cdot \text{Pr} \sqrt{\xi/8}}{\text{Nu}} = f(\text{Pr})$  и  $\Theta^+ = f_1(\eta_1, \text{Pr})$  в сравнении с некоторыми известными экспериментальными данными показаны на рис. 3, а и 4. На рис. 3, а для сравнения приведены расчетные

профили скорости  $\frac{u}{u_*} = f\left(\frac{yu_*}{\nu}\right)$ . Наблюдается сохранение известных (по аналогичным расчетным работам) особенностей поведения кривых, однако, более точный учет поля скоростей вблизи стенки приводит к улучшению представления экспериментальных результатов [7, 8].

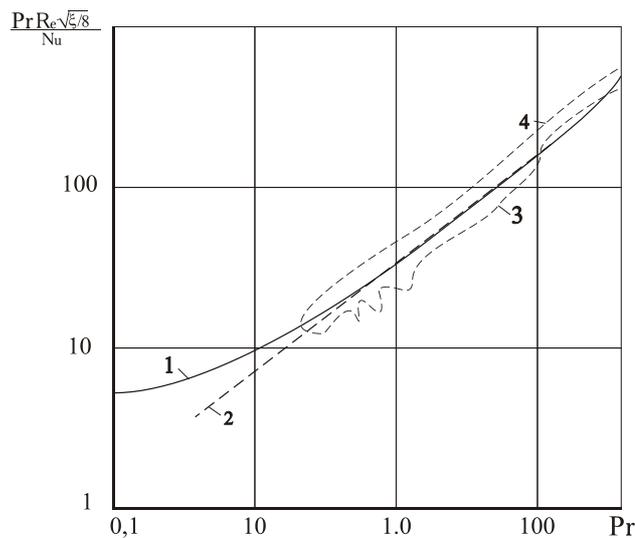


Рис. 4. Влияние числа Прандтля на турбулентный конвективный теплообмен:

- 1 – расчет по формуле (16); 2 – расчет по формуле  $Nu = \frac{0,023Pr \cdot Re^{0,8}}{1 + 2,14 Re^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)}$ ;  
 3 – расчет по формуле  $Nu = 0,035 Pr^{1/4} Re \sqrt{\epsilon}$ ; 4 – экспериментальные данные, систематизированные Сполдингом и Джайятиллаком [10].

Анализ связи характеристики теплопереноса с параметрами обновления течения

$$\Theta^+ = 5\sqrt{T^*} \ln \left| 1 + 66 Pr \sqrt{T^*} \right| + 2,5 \ln \left| 1 + 0,4 Pr (\eta - \eta_1) \right| \quad (\text{при } \eta \geq \eta_1) \quad (18)$$

показывает, что интенсивность процессов теплопереноса возрастает с увеличением частоты «взрывов» в подслое. Это логически вытекает и из физической картины процессов обновления течения у стенки. Для расчета процессов теплообмена при обтекании плоской пластины необходимо также учесть перемежаемость тече-

ния в турбулентном пограничном слое с ядром потока (поправка Коулса в профиле скорости).

#### Список литературы

1. Репик Е.У., Соседко Ю.П. Обзор экспериментальных исследований пристеночной турбулентности // Сб. трудов 3-го Всесоюзного семинара по моделям механики сплошной среды. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд. пис, 1976. – С. 7–35.
2. Репик Е.У., Соседко Ю.П., Тронина Н.С. Исследование структуры течения в пристеночной области турбулентного пограничного слоя // Пристенное турбулентное течение. – Ч. 2. – Новосибирск: Институт теплофизики/СО АН СССР, 1975. – С. 186–202.
3. Молло-Кристенсен Е. Физика турбулентных течений. – Ракетная техника и космонавтика. – № 7, 1971. – С. 3–16.
4. Репик Е.У., Соседко Ю.П. Исследование пространственно-временной картины течения в пристеночной области турбулентного пограничного слоя // Аэромеханика. – М.: Наука, 1976. – С. 170–179.
5. Никулин В.А., Повх И.Л. Модель пристеночной турбулентности вязкой жидкости // Теоретическая и прикладная механика. Киев Донецк: Вища школа, 1978. – Вып. 9. – С. 110–115.
6. Никулин В.А. Управление пристенной турбулентностью с целью энергосбережения. Монография. – Ижевск: РИО КИГИТ, 2011. – 166 с.
7. Зысина-Моложен Л.М. Тепло- и массоперенос в турбулентном пограничном слое // Тепло- и массоперенос. – Т. 10. – Ч. 1. – Минск: ИТМО АН БССР, 1973. – С. 19–55.
8. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск. Наука, 1970. – 660 с.

УДК 621.38(075)

**И.Ю. Личагин**, аспирант  
Московский институт электронной техники  
**С.Л. Ким**, кандидат физико-математических наук  
Институт механики УрО РАН

## РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА РАЗМЕРНОГО КВАНТОВАНИЯ

*До недавнего времени инженеры-разработчики электронных приборов в своих расчетах использовали только законы классической физики. И это было вполне оправданно, поскольку, например, в обычном кинескопе телевизора электроны движутся так же, как классические материальные точки – бильiardные шары или мячи. В сложнейшем микропроцессоре компьютера движение микроскопических электронов подобно движению классических тел. Однако ситуация меняется. Логика развития современной полупроводниковой электроники такова, что интегральные схемы становятся все более сложными и объединяют все большее число элементов.*

*Until recently, developers of electronic devices in their calculations used only the laws of classical physics. And it was quite justified, since, for example, in a conventional CRT TV electrons move in the same way as classic material point - billiard balls or footballs. In the most complex computer's microprocessor microscopic movement of electrons as the movement classic tel. However, the situation changes. The logic of the development of modern semiconductor electronics is such that integrated circuits have become more complex and incorporate more elements.*

**Ключевые слова:** интегральная схема, длина волны, квант, энергия.

**Keywords:** integrated circuits, wave length, quantum, energy.

До недавнего времени изготовителям интегральных схем удавалось увеличивать плотность размещения транзисторов, диодов и других элементов за счет уменьшения их размеров. Вероятно, что в недалеком будущем эти размеры станут порядка нескольких долей микрона. В тот момент, когда это произойдет, описание на языке классической физики потеряет всякий смысл и создатели электронных приборов будут вынуждены обратиться к квантовой механике. Электрон обладает корпускулярно-волновым дуализмом. Следовательно, он может испытывать интерференцию, проникать через узкие щели и барьеры, но вместе с тем сохраняет признаки обычной частицы. Он имеет строго определенную массу и заряд. Кроме

того, электрон, подобно классической частице, обладает импульсом и энергией. Необходимо отметить главную особенность квантово-механического описания. Если в некоторый момент времени частица находилась в ограниченной области пространства, то в будущем невозможно достоверно предсказать ее местоположение. Можно рассуждать о распределении частицы в пространстве и о вероятности этого распределения. Величина, описывающая это распределение, получила название  $\Psi$ -функции, или волновой функции. Она не описывает усредненное поведение большого числа электронов или одного электрона, заряд которого «размазан» по всему пространству, она дает вероятностное, статистическое описание отдельного электрона. Интенсивность этой функции, а точнее, ее квадрат  $|\Psi|^2$ , определяет вероятность обнаружить частицу в той или иной области – вероятность в интервале  $\Delta x$  равна  $|\Psi|^2 \Delta x$ . Волновая функция – это основная характеристика квантовой системы. Она содержит полную информацию об электронах или других частицах в атоме, молекуле, кристалле.

Рассмотрим одно из проявлений чисто квантовой природы электрона. Известно, что волны различной физической природы, возбуждаемые в ограниченном объеме, имеют строго определенную длину волны и частоту. В том случае, когда движение электрона происходит в ограниченной области, его энергия имеет строго определенные, дискретные значения. Говорят, что спектр энергий квантован. Если электрон заперт в атоме, молекуле или любой потенциальной яме, то волновая функция  $\Psi$  представляет стоячую волну. Если речь идет о прямоугольной потенциальной яме, то по своей форме волна будет такой же, как и в случае натянутой струны. Однако, во-первых, природа волны здесь иная, а во-вторых, дискретным в этом случае будет не спектр частот, а спектр энергий. Стоячие волны, описывающие электронные состояния в яме – это синусоиды, обращающиеся в точках  $x = 0$  и  $x = a$  в нуль.

$$\Psi_n(x) = (2/a) \sin(\pi x n/a),$$

где  $n$  – номер квантового состояния;  $a$  – размер ямы.

Видно, что электронная плотность в яме распределяется неравномерно, есть максимумы и минимумы плотности вероятности. Также следует, что длины волн  $\Psi$ -функций, описывающих электронные состояния с различными  $n$ , удовлетворяют условиям

$$\lambda n/2 = a/n,$$

т.е. в яме укладывается целое число полуволен.

Для наблюдения квантовых размерных эффектов расстояние между энергетическими уровнями должно быть достаточно велико. В первую очередь оно должно значительно превосходить тепловую энергию носителей:

$$E_{n+1} - E_n \gg kT,$$

иначе наблюдение эффектов будет невозможным.

Если электронный газ характеризуется энергией Ферми  $EF$ , то желательно также выполнение условия

$$E_{n+1} - E_n \geq EF,$$

при этом первое условие выполняется автоматически, так как  $kT \ll EF$ ; иначе квантовые эффекты имеют весьма малую относительную величину.

Существуют и другие условия, связанные с рассеянием носителей на примесях, фононах и др. Примером структуры с двумерным электронным газом являются тонкие пленки. В такой структуре одно из направлений ( $z$ ) очень мало, следовательно, энергетический спектр в этом направлении можно описать формулой

$$E_n = (\hbar n/a)^2 / 8m,$$

где  $m$  – эффективная масса электрона;  $a$  – толщина пленки, так как в данном направлении образуется потенциальная яма.

В оставшихся двух направлениях электроны могут передвигаться свободно. Образованную потенциальную яму надо считать бесконечно глубокой, следовательно,  $E_n$  должны быть малы по сравнению с действительной глубиной ямы. Данное условие приводит к толщине пленки порядка нанометров, что соответствует нескольким межатомным расстояниям. Полная энергия носителей в квантовразмерной пленке носит смешанный дискретно-непрерывный спектр:

$$E = E_n + (p_x^2 + p_y^2) / 2m,$$

где  $p_x$  и  $p_y$  – компоненты импульса в плоскости слоя.

Производство таких тонких пленок в явном виде весьма проблематично, поэтому наблюдения в основном проводят на МДП-структурах, где в качестве тонкой пленки выступает диэлектрик. Однако в настоящее время эффекты наблюдают на гетероструктурах (контакты между полупроводниками с различной шириной запрещенной зоны). На таком контакте края энергетических зон испытывают скачки, ограничивающие движение носителей и играющие роль стенок квантовой ямы. В структуре с одномерным электронным газом два направления ( $y$  и  $z$ ) очень малы, следовательно, энергетический спектр в каждом направлении можно описать формулой

$$E_n = (\hbar n/a)^2 / 8m,$$

где  $a$  – толщина пленки в данном направлении, так как в этом направлении образуется потенциальная яма.

В оставшемся направлении ( $x$ ) электроны могут передвигаться свободно. Образованную потенциальную яму надо считать бесконечно глубокой, следовательно,  $E_n$  должны быть малы по сравнению с действительной глубиной ямы. Данное условие приводит к толщине нити порядка нанометров. Полная энергия носителей в квантоворазмерной нити, аналогично тонким пленкам, носит смешанный дискретно-непрерывный спектр:

$$E = E_n + p_x^2 / 2m,$$

где  $p_x$  – компонента импульса в направлении нити ( $x$ ).

В структуре с нуль мерным электронным газом все направления ( $x$ ,  $y$  и  $z$ ) очень малы, следовательно, энергетический спектр в каждом направлении можно описать формулой:

$$E_n = (h\pi/a)^2 / 8m,$$

где  $a$  – толщина пленки в данном направлении, так как в этом направлении образуется потенциальная яма.

Образованную потенциальную яму надо считать бесконечно глубокой, следовательно,  $E_n$  должны быть малы по сравнению с действительной глубиной ямы. Данное условие приводит к размеру точки порядка нанометров. Полная энергия носителей квантовой точки также носит смешанный дискретно- непрерывный спектр:

$$E = E_n m l.$$

Такие структуры особенно интересны тем, что их свойства аналогичны свойствам дискретного атома, поэтому их иногда называют искусственными атомами. С появлением сканирующего микроскопа началось широкое развитие нанотехнологий – способов обработки частиц, размеры которых находятся в пределах от одного до ста нанометров ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ). Чтобы лучше представить данный порядок величин, достаточно вообразить Земной шар и футбольный мяч – именно так соотносятся в размерах последний и наночастицы. Эффект размерного квантования (ЭРК) – явление, связанное с квантованием энергии носителей заряда, движение которых ограничено в одном, двух или трех направлениях. При ограничении бесконечного кристалла потенциальными барьерами или при создании границ возникают дискретные уровни квантования. В принципе, дискретный спектр возникает в любом ограниченном потенциальными стенками объеме, но практически наблюдается только при достаточно малом размере тела. Для наблюдения квантовых размерных эффектов расстояние между энергетическими уровнями должно быть достаточно велико. В первую очередь оно должно значительно превосходить тепловую энергию носителей:

$$E_{n+1} - E_n \gg kT,$$

иначе наблюдение эффектов будет невозможным. Если электронный газ вырожден и характеризуется энергией Ферми  $E_F$ , то желательно также выполнение условия

$$E_{n+1} - E_n \geq E_F,$$

при этом первое условие выполняется автоматически, так как  $kT \ll E_F$ .

Существуют и другие условия, связанные с рассеянием носителей на примесях, фононах и др. Типичным примером ЭРК может служить двойная гетероструктура AlGaAs/GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом, где электроны, находящиеся в слое GaAs, ограничены высокими потенциальными барьерами AlGaAs,

т.е. для электронов формируется потенциальная яма, описываемая дном зон проводимости двух материалов, малого размера (обычно порядка 10 нм) и возникают дискретные уровни, которые соответствуют движению электронов поперёк слоя GaAs, хотя продольное движение остаётся свободным. Эти уровни эффективно сдвигают зону проводимости вверх по энергии. В результате изменяется ширина запрещённой зоны GaAs и соответственно происходит сдвиг в синюю область края межзонного поглощения. Аналогично, но с большим изменением запрещённой зоны ЭРК наблюдается в квантовых точках, где электрон ограничен по всем трём координатам.

### **Вывод**

Ещё в 1918 г. Бор сформулировал важный для новой атомной теории принцип соответствия, показывающий, когда именно существенны квантовые ограничения. С позиций квантовой механики электрон может быть представлен волной, описываемой соответствующей волновой функцией. Распространение этой волны в наноразмерных твердотельных структурах контролируется эффектами, связанными с квантовым ограничением.

### **Список литературы**

1. Шелованова Т.Н. Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники. Красноярск: ИПК СФУ, 2009.
2. Соболев В. В., Бусыгина Е. Л. Электронная структура пленок  $C_{60}$  // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. №. 1. С. 31–35.
3. Бусыгина Е.Л. Оптические функции монокристаллов и пленок фуллерита  $C_{60}$  // Химическая физика и мезоскопия. 2010. Т. 12. № 3. С. 417–424.

УДК 004.932

**С.П. Новгородцев**, студент

**М.В. Телегина**, кандидат технических наук, доцент  
Ижевский государственный технический университет

## МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА ЛАВСА ДЛЯ РАЗПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТУРЫ ОБЪЕКТОВ АЭРОФОТОСНИМКОВ

*Предложен метод текстурной сегментации, основанный на текстурных характеристиках Лавса с учетом цветовой составляющей изображений, который способствует более достоверному выделению текстуры на изображениях.*

*A method for texture segmentation based on texture characteristics Loves given color component images, which promotes more meaningful allocation of texture on images.*

**Ключевые слова:** распознавание изображений, текстура, фотоснимок.

**Keywords:** image recognition, texture, photograph.

В рамках выполнения работ по проекту "Разработка и экспериментальное исследование системы аэрокосмического и геоинформационного мониторинга для визуализации результатов геоэкологических исследований северных экосистем» (СВФУ-ИжГТУ) необходимо выделять и анализировать динамику областей антропогенного воздействия. Площадные объекты на аэрофотоснимках, в подавляющем большинстве являются текстурными. Измерение ее признаков текстуры ограничено областями, обладающими относительной однородностью и характеризующуюся площадью и формой.

Известны разные подходы к измерению и описанию текстуры изображения – статистические, геометрические, структурные [1]. Важное свойство многих текстур – повторяющийся характер расположения текстурных элементов в изображении. Автокорреляционная функция изображения может использоваться для оценивания степени регулярности, а также мелкозернистости грубой структуры текстуры.

Класс геометрических методов анализа текстуры характеризуется по определению текстуры как составленный из «элементов текстуры» или примитивов. Метод анализа обычно зависит от геометрических свойств этих текстурных элементов. Как только элементы текстуры идентифицированы, имеется два основных подхода к анализу текстуры. Один вычисляет статистические признаки извлеченных эле-

ментов текстуры и использует их как элементарные текстурные признаки. При другом подходе стараются выделить принцип расположения примитивов, который описывает текстуру. Последний подход может включать в себя геометрический или синтаксические методы анализа текстуры, например анализ диаграмм полигонов Вороного [1–3].

Особый интерес представляет сегментация с использованием энергетическим карт Лавса [2, 3], в котором для любого пикселя получают описание характеристик текстуры в некоторой его окрестности. Энергетические характеристики Лавса используют только яркость пикселей в виде исходных данных, поэтому в вычислениях имеются значительные погрешности.

Предлагается система выделения текстурных областей на аэрофотоснимках на основе модернизации метода Лавса. Модернизация этого метода позволит учитывать кроме энергетических составляющих пикселей, и цветовую составляющую. Текстура имеет неоднородный цветовой диапазон, что осложняет цветовое описание конкретной текстуры. Для устранения данной проблемы (устранения шумов на изображении) использован медианный фильтр, что позволило существенно сократить диапазон используемых цветов за счет расчета средней составляющей области матрицы, используемой в медианных фильтрах. Система выполняет функции:

- предварительную обработку изображений; формирование эталонов текстур;
- распознавания текстурных областей на основе модернизированного метода Лавса с определением энергетических и цветовых характеристик;
- создания и обработки векторных объектов по выделенным текстурным областям и импорт векторных объектов в формат XML.

Для описания цветовой составляющей текстуры используются следующие процедуры: на первом этапе по изображению текстуры расставляются контрольные точки, на втором этапе в контрольных точках рассчитываются значения для медианной фильтрации. По полученным данным определяются: средние, максимальные и минимальные значения. Все цвета представляются в виде сплайна из 3-х значений: отклонение красного, относительно зеленого, зеленый, принятый за 0, и отклонение синего, относительно зеленого. Данный вид кодирования цвета исключает ошибочное определение пределов изменения цветовой составляющей изображения, за счет того, что из цветового кода удалено освещение. Таким образом, мы получаем описание текстуры в виде, среднего сплайна цветовой составляющей, средней яркости изображения, и 2 параметров отклонения сплайна цвета и яркости.

Предлагается алгоритмическая модель, реализующая распознавание текстуры на изображении:

*Входные данные:*

$Dev \in \mathbb{R}$  – Максимальное отклонение

$TB-spline \in B - spline$  –

Описание текстуры

$DevR \in \mathbb{R}$  – Отклонение R

$DevB \in \mathbb{R}$  – Отклонение B

$DevL \in \mathbb{R}$  – Отклонение освещения

$A = \{a_{ij}\}$ ,  $a_{ij} \in [0..255]$ ,  $i \in [0..N]$ ,  $j \in [0..M]$ ,  $N$  – ширина,  $M$  – высота – исходное изображение, с удаленным освещением

$B = \{a_{ij}\}$ ,  $a_{ij} = \{r, g, b\}$ ,  $r, g, b \in [0..255]$ ,  $i \in [0..N]$ ,  $j \in [0..M]$ ,  $N$  – ширина,  $M$  – высота

– исходное изображение, с информацией о цвете

*Выходные данные:*

$P = \{Index_{ij}\}$ ,  $Index, i, j \in \mathbb{Z}$

*Алгоритм*

$n \in \mathbb{Z}$  – количество контрольных точек по ширине

$m \in \mathbb{Z}$  – количество контрольных точек по высоте

$Mas = \{B - spline_{ij}, Col\}$ ,  $B - spline$  – приведен в п.2.2.3.1.,  $i, j \in N$ ,

$Col = \{DivR, DivB, L\}$ ,  $DivR, DivB, L$  – отклонение цвета п.2.2.3.2

Расставить контрольные точки в количестве  $m*n$  в пределах  $[0..N, 0..M]$

Для каждого  $x=0$  по  $n$  цикл

Для каждого  $y=0$  по  $m$  цикл

$Mas[x,y].B-spline =$  получить сплайн в точке  $(x,y)$

$Mas[x,y].Col =$  Получить цвет в точке  $(x,y)$

Конец цикла

$Index = \{0..3\}$  – индекс принадлежности текстуры

Для каждого  $i=0$  по  $n$  цикл

Для каждого  $j=0$  по  $m$  цикл

$Index = 0$

Если  $Mas[i,j].B-spline - TB-spline < Dev$  тогда

$Index = Index + 1$

Конец если

Если  $Mas[i,j].R$  лежит в пределах  $DivR$  и

$Mas[i,j].B$  лежит в пределах  $DivB$  и

$Mas[i,j].L$  лежит в пределах  $DivL$

тогда  $Index = Index + 2;$

КонецЕсли

$P[i,j].Index = index;$

Конец цикла

При использовании метода Лавса с определением энергетических и цветовых характеристик получаем массив контрольных точек на изображении принадлежащих текстуре, в дальнейшем эти точки объединяются в области, области с площадью меньше заданной удаляются, что обеспечивает устранение шумов при сегментации.

Для создания векторных объектов происходит представление границы сегментированных областей в виде полилинии. Построение полилинии выполняется поэтапно: определение граничных точек сегмента, объединение точек в линии состоящих из двух точек, замыкание линий в контур или построение полилинии. Определение граничных точек происходит за счет поиска соседних точек, с различным индексом определения текстуры строго вдоль осей X и Y. Таким образом, если точка граничит с точкой, которая находится по вертикали или горизонтали от нее, и индекс определения текстур различается, то данная точка находится на границе сегментированной области.

На рис. 1 представлено главное окно интерфейса программы, которое содержит 3 области.

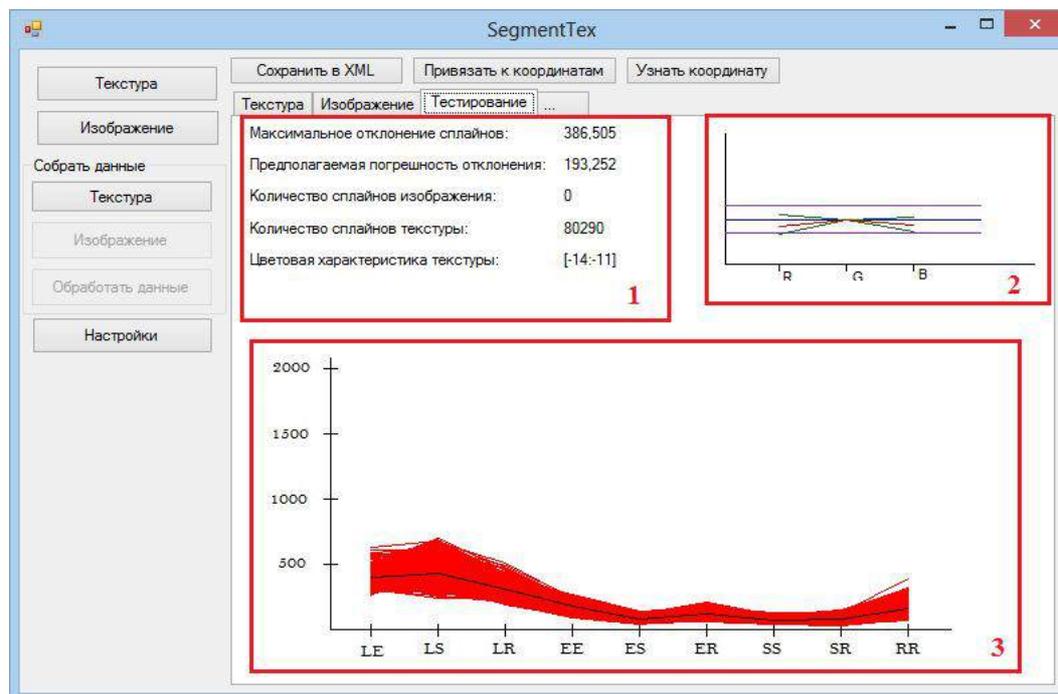


Рисунок 1 – Информация о текстуре

Область статистических данных (1) отображает максимальное отклонение В-сплайнов, предполагаемую погрешность в вычислениях, количество сплайнов, которые использовались при анализе текстуры, и определенные параметры цветовой составляющей, в виде вектора. Первое число среднее отклонение  $R$ , второе число среднее отклонение  $V$ . Подробные характеристики текстуры отображаются на последней вкладке области 3 (рис. 2). На рисунке 2 область отображения цветowych характеристик текстуры (2) отображает средний вектор отклонения цвета, максимальные отклонения цветов, среднюю яркость и отклонения яркостей. Область отображения энергетических характеристик текстуры (3) представляет собой изображения В-сплайнов.

Экспериментальные исследования модернизированного метода Лавса показали результативность внесенных изменений сравнением результата работы метода, исключительно на энергетических характеристиках Лавса и модифицированного метода [4]. На рис. 2 приведен пример обработки снимка [5] модифицированным методом, основанного на энергетических характеристиках Лавса и цветовой составляющей изображения.

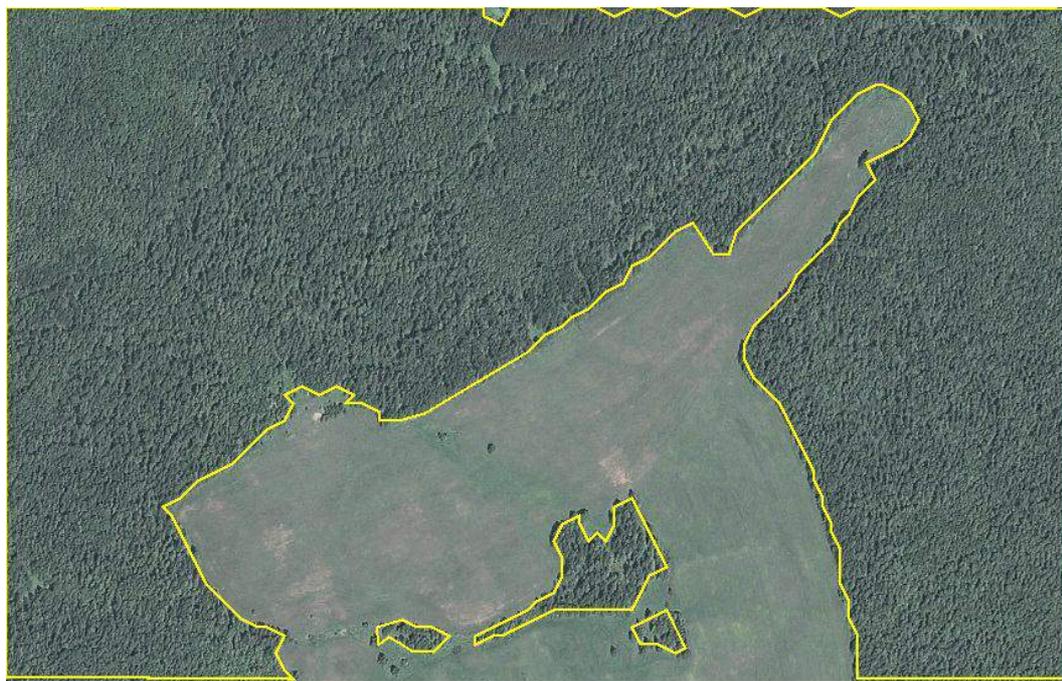


Рисунок 2 – Результат обработки участка территории Удмуртии модифицированным методом Лавса

Из результатов видно, что модифицированный метод выделяет непосредственно искомую текстуру, в то время как не модифицированный метод ошибочно захватывает области, не принадлежащие текстуре леса.

Таким образом, предложен метод текстурной сегментации, основанный на текстурных характеристиках Лавса с учетом цветовой составляющей изображений, который способствует более достоверному выделению текстуры на изображениях.

Применение данного метода при распознавании аэрофотоснимков в рамках многоуровневого анализа изображений естественных и искусственных объектов, с динамически подстраиваемой базой знаний позволит проследить динамику изменения площадей природно-территориальных комплексов с антропогенными нарушениями. Несомненно, данный метод будет востребован не только при анализе аэрофотоснимков, но и при обработке других текстурированных изображений.

#### **Список литературы**

1. *Haralick R.M.* Textural Features for Image Classification. // IEEE. Trans. Syst. Man and Cybernetics. 1973 № 3 (6). P. 610–621.
2. *Scholkopf B., Smola A.J.* Learning with Kernels Support Vector Machines, Regularization, Optimization and Beyond. MIT Press, 2001. 644 p.
3. *Boykov Y., Veksler O., Zabih R.* Fast Approximate Energy Minimization via Graph Cuts // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2001. V. 23. № 11.
4. *Новгородцев С.П., Телегина М.В.* Автоматизация выделения сегментированных по текстуре областей на космических снимках. Ижевск: ИЖГТУ, 2013.
5. Снимок территории Як-Бодьинского района Удмуртии. Карты Google. [Электронный ресурс] URL: <https://www.google.ru/maps/@57.1064599,53.4532919,1213m/data=!3m1!1e3> (дата обращения: 27.03.2014).

УДК 621.316.761.2

**В.В. Логвин**, кандидат технических наук, доцент

**А.В. Козлов**, кандидат технических наук, доцент

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (Беларусь)

**Андр.И. Рожков**, кандидат технических наук

**Ант.И. Рожков**, кандидат технических наук

**О.М. Грудницкий**, инженер-технолог

**А.В. Феклистов**, инженер-технолог

Белорусский металлургический комбинат (Жлобин, Берарусь)

### ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ СТАТИЧЕСКИХ ТИРИСТОРНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ НА ПРИМЕРЕ БМЗ

*В статье рассматриваются вопросы технической и экономической эффективности системы статических тиристорных компенсаторов на примере Белорусского металлургического завода.*

*The article deals with the technical and economic efficiency of static thyristor compensators on the example of the Belarusian Steel Works.*

**Ключевые слова:** система статических тиристорных компенсаторов, фликкер-эффект, высшие гармоники, дуговая сталеплавильная печь, печь-ковш, электроды.

**Keywords:** static thyristor compensators, flicker effect, harmonics, electric arc furnace, ladle furnace, electrodes.

Белорусский металлургический завод является одним из самых мощных потребителей электроэнергии в Гомельской области. Две трети электроэнергии потребляется тремя дуговыми сталеплавильными печами (в дальнейшем ДСП), и двумя установками печь-ковш (ПК). Мощность печных трансформаторов – по 95 МВА, печи-ковша – 20 МВА [1].

Описанный в любом учебнике по электроснабжению пример, когда на металлургическом заводе три печи, то их график работы составляется так, что бы две работали, а третья в это время не работала, с целью уменьшения пиковой потребляемой мощности, на БМЗ не выполняется. Выплавка стали в ДСП процесс настолько непредсказуемый, и трудно прогнозируемый, что выполнение вышеописанного алгоритма практически невыполнимо. Второй момент: экономически выгодно загру-

жать ДСП по максимуму, чем не включать одну из трёх печей, пока работают две другие.

Сотрудниками БМЗ совместно с другими организациями, была проведена работа по определению эффективности работы системы статических тиристорных компенсаторов. На рисунках 1-3 показаны графики изменения электрических параметров ДСП за время одной плавки. В таблице 1 приведены значения токов высших гармоник ДСП и ПК в % относительно тока первой гармоники. Как видно из рисунков, ДСП является достаточно сложным электроприёмником: токи, мощности, доля высших гармоник токов изменяются в широких пределах и очень быстро. Только система статических тиристорных компенсаторов может оперативно снизить негативное воздействие на питающую сеть.

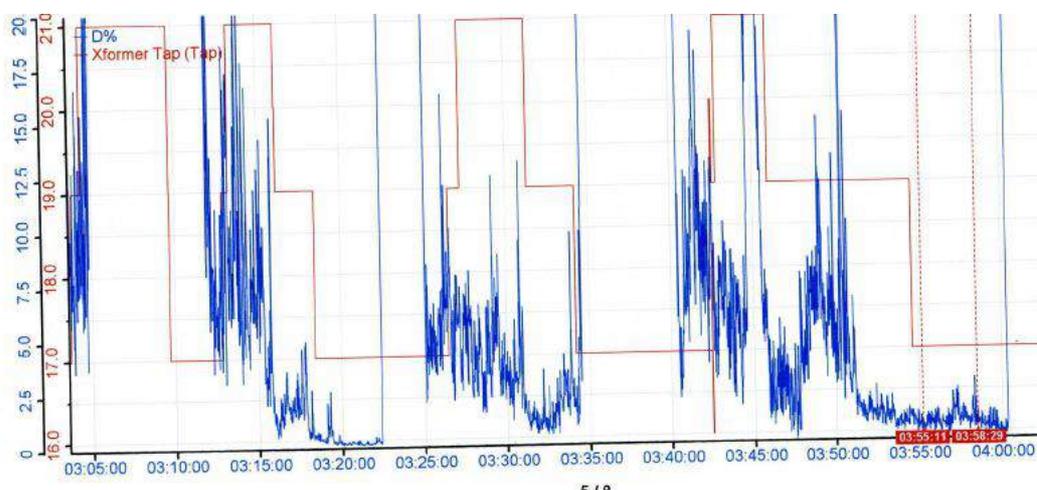


Рисунок 1 – Изменение доли высших гармоник токов (синий график) и номера работающей ступени (красный график) за время одной плавки

Таблица 1 – Гармоники тока ДСП и ПК в % относительно тока первой гармоники: среднее значение/максимальное значение

№	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ДС	5,2/12,	7/15,1	2,5/5,	4/6,7	1,3/2,	1,5/3,	0,8/1,	0,9/1,	0,6/1,	0,6/1,
П	8		1		8	6	5	8	1	2
ПК	1,5/2,8	3,2/4,	0,6/1,	2,3/3,	0,5/1,	1,2/2	0,2/0,	0,3/0,	0,1/0,	0,2/0,
		9	1	6	0		4	7	2	5

Так как мощность трансформатора ПК почти в 5 раз меньше мощности печного трансформатора, потребление электроэнергии гораздо более равномерное, высших гармоник тока меньше, то влияние работы ПК на электрическую сеть не рассматривается.

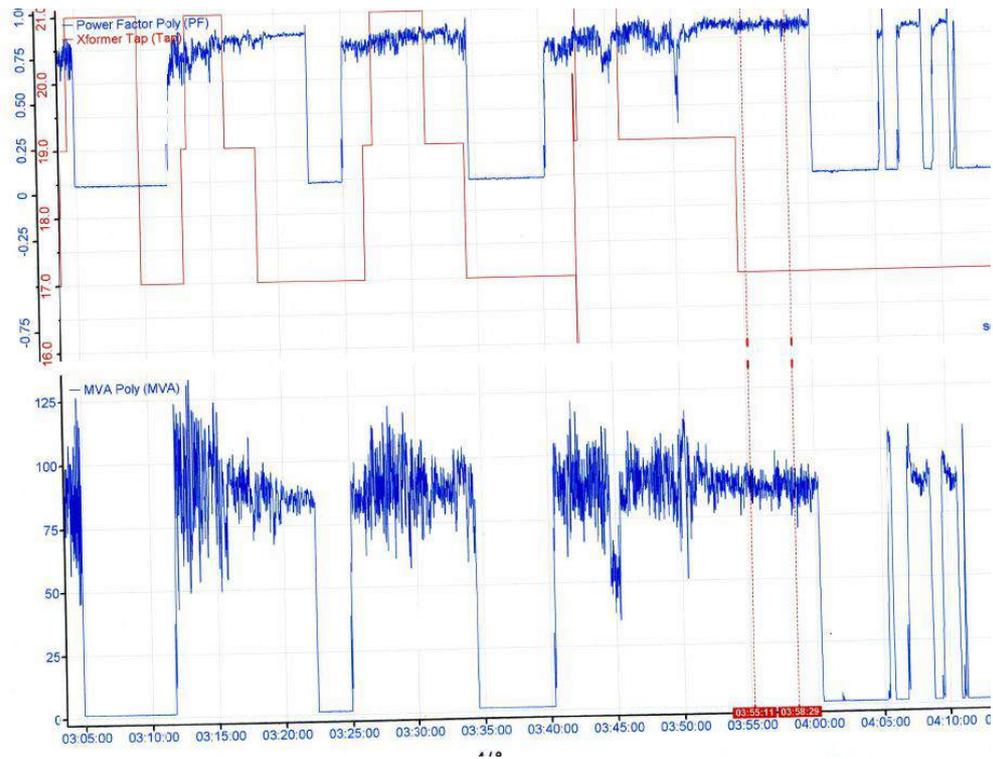


Рисунок 2 – Изменение коэффициента мощности (синий график сверху), и полной мощности S (синий график внизу), за время одной плавки

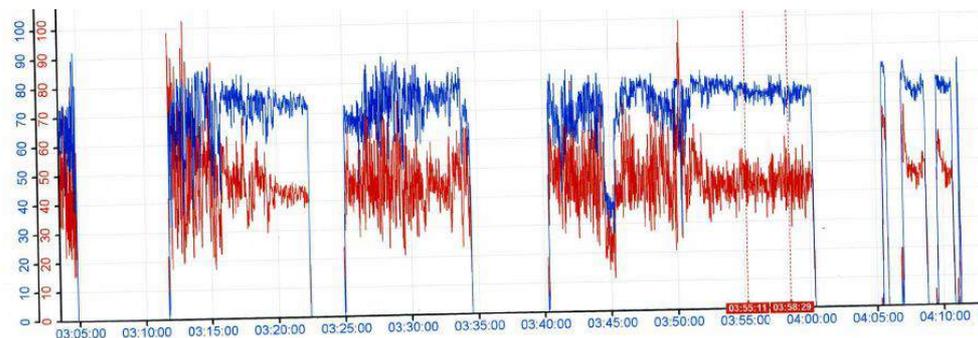


Рисунок 3 – Изменение активной (синий график) и реактивной мощностей (красный график) за время одной плавки

После оценки работы ДСП и ПК, как электроприёмников, была произведена оценка системы электроснабжения. Для этого было произведено два опыта по набросу реактивной нагрузки на сеть, которая до этого работала в режиме холостого хода. Испытания в режимах эксплуатационных коротких замыканий проводились при отключенном тиристорном компенсаторе реактивной мощности.

Экспериментальные и расчетные данные испытаний системы электроснабжения ДСП приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Определение параметров электрической сети

Номер испытания	Режим сети	$U_{AB}$ , В	$U_{BC}$ , В	$U_{CA}$ , В	$U_{ср}$ , В	Q, квар	$X_c$ , Ом	$S_{кз}$ , МВА
1	х.х.	33 207	33 242	33 144	33 198	-	2,04	534
	наброс	28 658	28 349	28 584	28 530	65 274		
2	х.х.	33 207	33 333	33 099	33 213	-	2,06	529
	наброс	28 778	28 275	28 458	28 504	64 944		

Пояснения к таблице 1:  $U$  – линейные напряжения на шинах 33 кВ,  $Q$  – реактивная мощность,  $X_c$  – реактивное сопротивление сети,  $S_{кз}$  – мощность трехфазного короткого замыкания на шинах 33 кВ

Затем были проведены эксперименты, когда вместо потребителей реактивной энергии подключались ДСП и ПК при отключенном СТК. На рис. 4 представлены результаты измерений напряжения на шинах 33 кВ, активной, реактивной и полной мощности, потребляемой ДСП №1 и ДСП №2, и дозы фликера  $Pst$  при отключенном СТК. Как видно из рисунка, напряжение на шинах 33 кВ в режиме холостого хода составляет 32,8-33,1 кВ. Включение любой из ДСП приводит к снижению среднего значения напряжения до 30-31 кВ в зависимости от режима работы ДСП и ступени напряжения трансформатора ДСП. Одновременная работа двух ДСП и ПК вызывает снижение среднего значения напряжения до 28 кВ. Дальнейшее увеличение нагрузки не имеет смысла, так как это приведёт к значительному ухудшению работы ДСП и ПК как технологических агрегатов. Суммарная активная мощность электропечной нагрузки в режиме работы без СТК составляет 127-130 МВт, потребляемая реактивная мощность 95-100 Мвар.

На рис. 5 приведены результаты измерений дозы фликера  $Pst$  при отключенном СТК. Максимальные значения дозы фликера  $Pst$  составляют около 3,5.

Далее были проведены исследования по оценке влияния работы ДСП и ПК на электрическую сеть с включенной и выключенной СТК. Результаты измерений электрических нагрузок ДСП №1, ДСП №2, АПК и показателей качества электроэнергии сведены в табл. 3.

Таблица 3 – Параметры электрической сети с работающим и отключённым СТК при различной нагрузке

Нагрузка	P, МВт	Q, МВАр	$U_{33 \text{ кВ}}$ , %	$P_{st}$	СТК
ДСП №1	65-70	45-50	99,5	2,3-2,5	Работает
ДСП №2	75-80	55-60	99,5	2,7-2,8	Работает
ПК	11-12	7	-	-	Работает
ДСП №1+ДСП №2+ ПК	140-150	100-112	94,5	3,5	Работает
ДСП №1			91	3-3,2	Отключен
ДСП №2			91	3-3,2	Отключен
ПК	12	7	99,7	-	Отключен
ДСП №1+ДСП №2+ ПК	127-130	95-100	86	3,5	Отключен

На рис. 6 приведены графики изменения напряжения питающей сети при включенном (а, б) и выключенном (в, г) СТК. К сожалению, замеры проводились в разное время и на разных печах, поэтому полученные результаты не являются абсолютно достоверными. Вместе с тем, хорошо видно, настолько СТК сглаживает колебания и просадки напряжения.

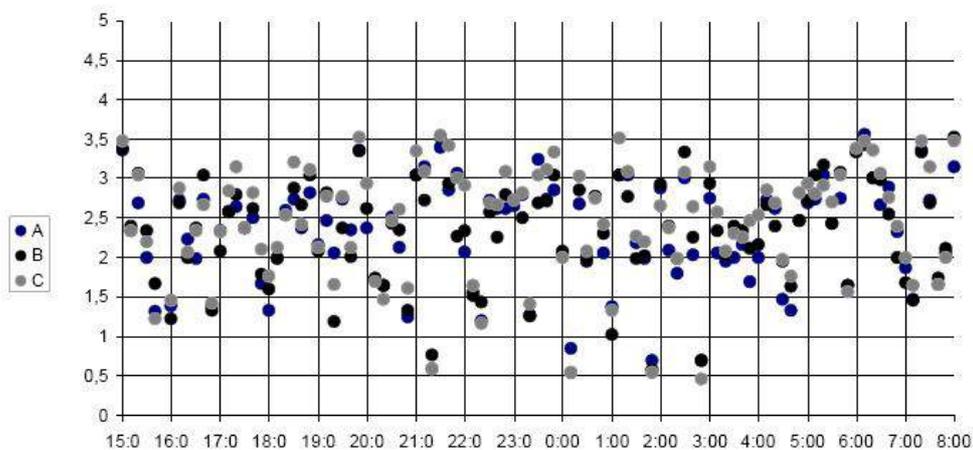
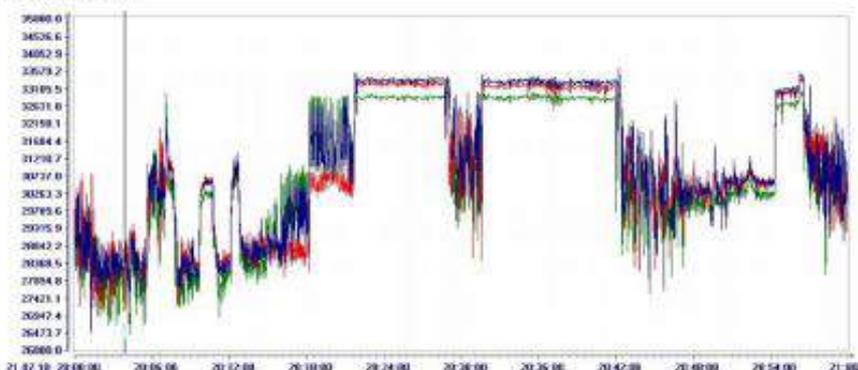
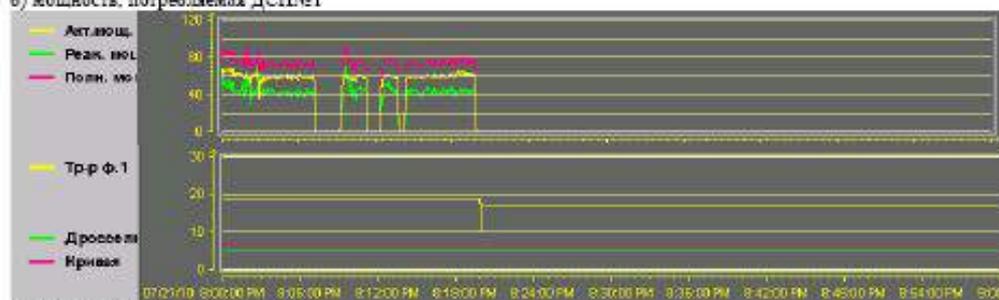


Рисунок 5 – Результаты измерений дозы фликера Pst на интервале измерения 10 мин

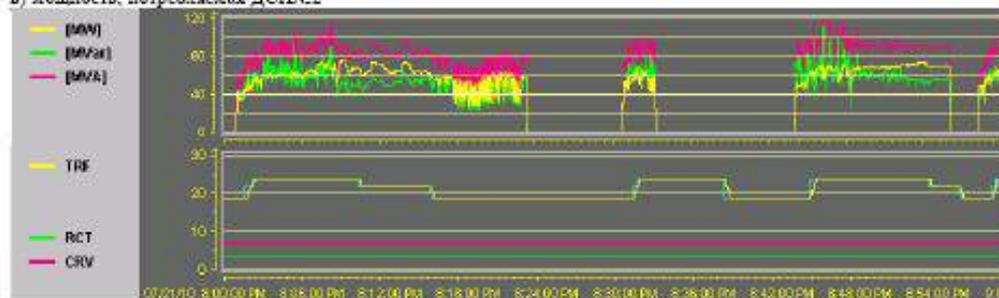
а) напряжение на шинах 33кВ



б) мощность, потребляемая ДСП№1



в) мощность, потребляемая ДСП№2



г) доза фликера Pst (10 мин) на шинах 330 кВ

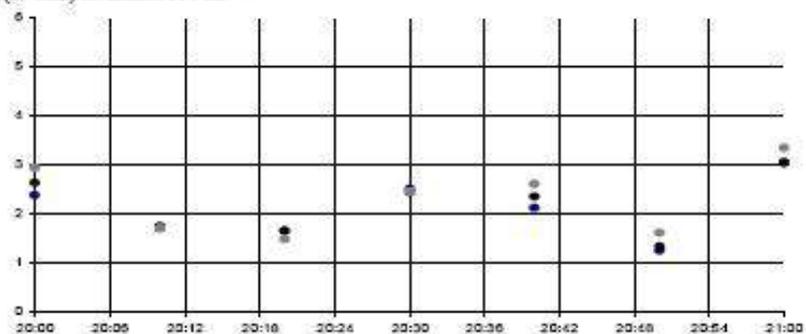
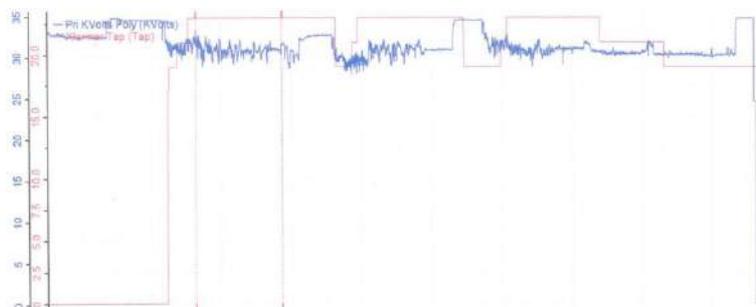
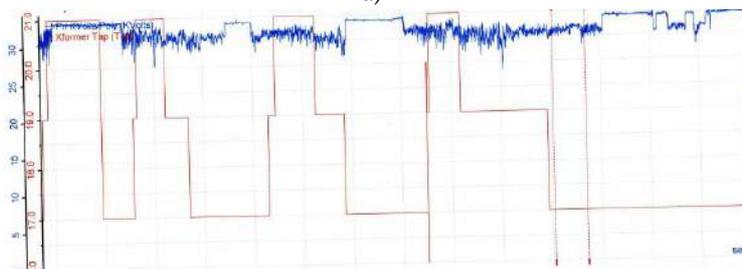


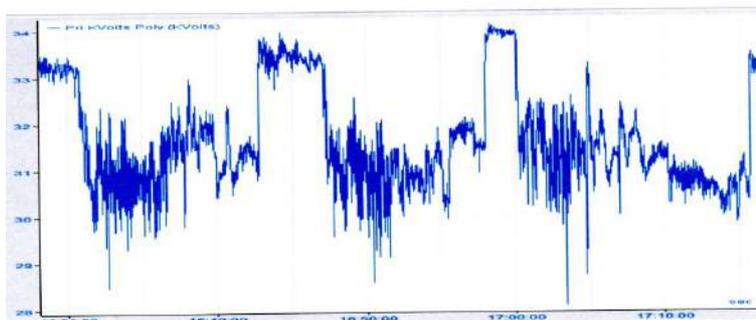
Рисунок 4 – Работа ДСП без СТК. а) - напряжения на шинах 33 кВ; б) и в) – мощность активная, реактивная, полная ДСП№1 и ДСП№2 соответственно; с) – доза фликера Pst на интервале измерения 10 мин



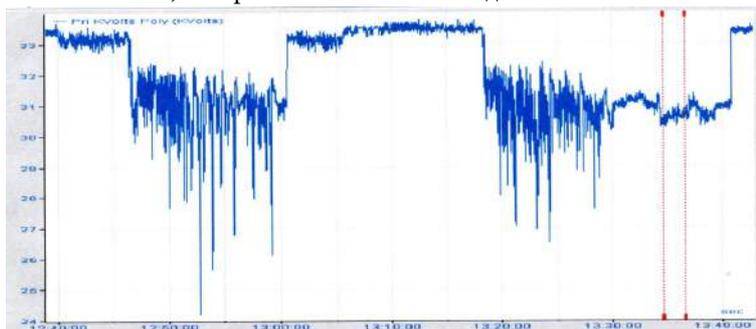
а)



б)



в) Напряжение холостого хода: 34 673 В



г) Напряжение холостого хода: 33 240 В

Рисунок 6 – Графики изменения напряжения питающей сети при включенном (а, б) и выключенном (в, г) СТК

С целью оценки экономической эффективности был проведён сравнительный анализ изменения технологических параметров одной и той же ДСП за один и тот же месяц 2013 и 2014 годов, при похожем сортаменте (13 - 15% - кордовые марки сталей, остальные – рядовые). Он показал, что применение СТК позволяет снизить расход электроэнергии на ДСП на 13,6%, время под током уменьшается на 1,73%, расход электродов марки УНР одного и того же производителя уменьшается на 5,64%. Расход электродов на ПК различных производителей уменьшается на 6,89%. Полученные данные несколько отличаются от опубликованных в открытых источниках. Согласно [2] время работы под током снижается на 11%. Количественные характеристики эффективности использования СТК по снижению удельных расходов электроэнергии и электродов приводятся компаниями АВВ, Nokian Capacitors и даны в публикациях [3, 4]. При установке компенсатора в схемах электроснабжения ДСП минимальный эффект по снижению удельных расходов электродов оценивается на уровне 6 – 8%, а удельных расходов электроэнергии - 10 – 12%. На наш взгляд, это объясняется различным сортаментом, марками электродов, различиями в системах электроснабжения.

#### **Список литературы**

1. *Бондарьков А.П.* 20 миллионов кВт·ч! Для БМЗ это лишь 1 % электропотребления! // Энергия и менеджмент. 2014. № 3.
2. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения / Под ред. М.Я. Смелянского и Р.В. Минеева М.: Энергия, 1975. 184 с.
3. *Чуприков В.С.* Расчет влияния тиристорного компенсатора реактивной мощности на длительность плавки в ДСП // Новые разработки в области проектирования электроснабжения и электрооборудования электротермических установок: Сб. научн. тр. ВНИПИ Тяжпромэлектропроект. М.: Энергоатомиздат, 1992.
4. Повышение мощности электропередачи при помощи статических систем компенсации реактивной мощности: Доклад на Шведском энергетическом симпозиуме. М., декабрь 1983.

**Г.В. Дейниченко**, доктор технических наук, профессор

**А.В. Погребняк**, кандидат технических наук, доцент

Харьковский государственный университет питания и торговли (Харьков, Украина)

**ДИНАМИКА РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРОВ ВО ВРЕМЯ ПРОТЕКАНИЯ  
ЧЕРЕЗ СТРУЕФОРМИРУЮЩУЮ ГОЛОВКУ  
ПРИ ГИДРОРЕЗАНИИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**

*Цель – установить особенности поведения растворов полимеров в условиях струеформирующей головки, которые позволят подойти к решению вопроса о механизме увеличения режущей способности гидроструи с полимерными добавками.*

*Приведены результаты численного моделирования течения простой и вязкоупругой (раствора полимера) жидкостей через струеформирующую головку при гидрорезке пищевых продуктов. Установленные закономерности поведения вязкоупругой жидкости при течении с продольным градиентом скорости и проявляющиеся при этом эффекты упругих деформаций имеют определяющее значение в понимании механизма «аномально» высокой режущей способности водно-полимерной струи. Понимание природы увеличения режущей способности водно-полимерной гидроструи позволит разработать рекомендации по выбору режимов гидроструйной водно-полимерной обработки пищевых продуктов резанием.*

*Objective – to determine peculiarities polymer solution behaviour under conditions of a jet-shaping head that would allow to solve the issue related to the mechanism of increasing water-jet cutting power with polymer additions.*

*Presents the results of computational modeling of common and viscous-elastic (polymer solution) liquid flow through a jet-shaping head while hydrocutting foodstuffs. The determined regularities of viscous-elastic (polymer solution) liquid behavior in the flow with longitudinal velocity gradient and manifested in this case effects of elastic deformations have paramount importance in understanding the mechanism of “anomalously” high cutting power of water-polymer jet. Understanding the nature of increased cutting power of water-polymer jet will make it possible to develop recommendations on choosing regimes for water-polymer jet processing of foodstuffs by cutting.*

**Ключевые слова:** полимерный раствор, пищевые продукты, полиэтиленоксид, скорость, гидродинамическое поле, градиент скорости, деформационные эффекты.

**Keywords:** polymer solution, foodstuff, velocity, hydrodynamic field, velocity gradient, deformation effects.

Установление особенностей поведения растворов полимеров в условиях струеформирующей головки, с одной стороны, позволит подойти к решению вопроса о механизме увеличения режущей способности гидроструи с полимерными добавками, а с другой, - позволит предложить рекомендации по выбору режимов гидроструйной водно-полимерной обработки пищевых продуктов резанием.

Гидродинамический расчет режимов течения раствора полимера основан на использовании установленного критерия перехода макромолекулярного клубка из гидродинамически непроницаемого “сегментального геля”, где значительная часть сегментов заэкранирована, в протекаемый “сегментальный раствор”, в котором уже все сегменты гидродинамически взаимодействуют с растворителем. Условия этого перехода определяются выражением (1),

$$\varepsilon\theta_c \geq D_{кр} . \quad (1)$$

при выполнении которого в растворах полимеров, таких как полиэтиленоксид, полиакриламид и др., формируются динамические надмолекулярные структуры [1–3].

Соотношение (1) следует трактовать как число Деборы, т.к. обратная величина продольного градиента скорости это не что иное, как временной масштаб течения [4]. Таким образом, расчет сводится к определению времени релаксации (характерного времени полимерного раствора) и реализуемых продольных градиентов скорости при течении полимерного раствора через струеформирующую головку установки для гидроструйной водно-полимерной обработки пищевых продуктов резанием.

Следует отметить, что в настоящее время в литературе отсутствуют аналитические выражения, с помощью которых можно было бы рассчитать продольный градиент скорости при втекании в отверстие или щель раствора полимера. Известно, что растворы полимеров обладают упруговязкими свойствами. Поэтому, для оценки деформационных характеристик (функций тока, распределений продольного градиента скорости и нормальных напряжений) потока, приводящих к проявлению аномальных, по сравнению с поведением ньютоновской жидкости, эффектов, можно выбрать хорошо зарекомендовавшую максвелловскую модель упруговязкой жидкости [5-10] с использованием оператора Яумана [11]. Выбор этой модели был обусловлен тем, что, согласно Лоджу [10], исследование непрямолинейных, неустановившихся, с точки зрения Лагранжа, течений упруговязких жидкостей не добавляет какой-либо новой информации к уже полученной при изучении однородных или квазиоднородных сдвиговых деформаций. По его мнению, “...единственная причина детальных расчетов различных типов непрямолинейных течений - убедиться в их практической реализуемости”. Это утверждение Лоджа можно интерпретировать таким образом, что для описания сходящихся потоков не следует при-

думывать новые реологические уравнения состояния, достаточно воспользоваться полученными при изучении куэттовского течения или, по крайней мере, определить, не могут ли они объяснить закономерности сходящегося течения.

Установившиеся течения несжимаемых сред описываются следующими уравнениями:

- уравнением неразрывности

$$\vartheta_{,i}^i = 0, \quad (2)$$

- уравнением движения Коши

$$\rho \vartheta^k \vartheta_{,k}^i = -g^{ik} p_{,k} + T_{,k}^{ij}, \quad (3)$$

где  $g^{ik}$  – метрический тензор, а  $T_{,k}^{ij}$  – вычисляется при ковариантном дифференцировании  $T^{ij}$ :

$$T_{,k}^{ij} = \frac{\partial T^{ij}}{\partial x^k} + \left\{ \begin{matrix} i \\ k \ m \end{matrix} \right\} T^{mj} + \left\{ \begin{matrix} i \\ k \ m \end{matrix} \right\} T^{im},$$

где  $\left\{ \begin{matrix} i \\ k \ m \end{matrix} \right\}$  представляет собой трехкомпонентный символ Кристоффеля и выражается зависимостью:

$$\left\{ \begin{matrix} i \\ k \ m \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} g^{i\ell} \left( \frac{\partial g_{k\ell}}{\partial x^m} + \frac{\partial g_{m\ell}}{\partial x^k} - \frac{\partial g_{km}}{\partial x^\ell} \right).$$

Обозначив время релаксации через  $\theta_c$ , а вязкость через  $3\eta_c$ , запишем структурное реологическое уравнение модели жидкости Максвелла:

$$T^{ij} + \theta_c \frac{D_j T^{ij}}{Dt} = 2\eta_c D^{ij}, \quad (4)$$

где  $\frac{D_j}{Dt}$  – производная Яумана, выражаемая следующим уравнением:

$$\frac{D_j T^{ij}}{Dt} = \frac{\partial T^{ij}}{\partial t} + \vartheta^k T_{,k}^{ij} - W_k^i T^{kj} - T^{ik} W_k^j,$$

в котором

$$D_{km} = \frac{1}{2} (\vartheta_{k,m} + \vartheta_{m,k}), \quad W_{km} = \frac{1}{2} (\vartheta_{k,m} - \vartheta_{m,k}).$$

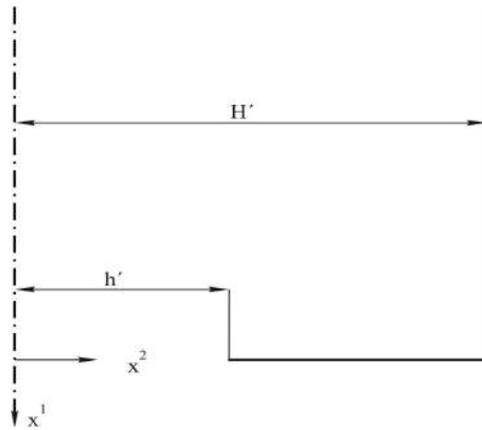


Рисунок 1 – Форма канала и декартовы координаты

Рассмотрим случай, когда несжимаемая жидкость движется между двумя параллельными плоскостями и вытекает через щель, длина которой значительно превышает ее ширину. Течение плоское и стационарное. На рис. 1 показана форма канала и декартовы координаты.

Компоненты метрического тензора в декартовых координатах имеют вид:

$$g_{11} = g_{22} = 1,$$

$$g_{12} = g_{21} = 0.$$

Трехкомпонентный символ Кристоффеля  $\left\{ \begin{matrix} i \\ k \ m \end{matrix} \right\}$  равен нулю, т.к. компоненты метрического тензора  $g_{ik}$  не зависят от координат.

Выразим в безразмерном виде и введем в уравнения (2), (3) и (4) следующие величины:

$$\begin{aligned} x_1^* &= \frac{x^1}{H'}, & x_2^* &= \frac{x^2}{H'}, \\ V_1^* &= \frac{\psi^1}{\bar{u}}, & V_2^* &= \frac{\psi^2}{\bar{u}}, \\ T_{11}^* &= \frac{H'}{3_c \bar{u}} T^{11}, & T_{22}^* &= \frac{H'}{3_c \bar{u}} T^{22}, \\ T_{12}^* &= \frac{H'}{3_c \bar{u}} T^{12}, & T_{21}^* &= \frac{H'}{3_c \bar{u}} T^{21}, \\ P^* &= \frac{H'}{3_c \bar{u}} P, \end{aligned} \tag{5}$$

где  $\bar{u}$  – средняя скорость течения;  $2H'$  – ширина канала.

С учетом преобразований (2), (3), (4) приводятся к виду

$$\frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_1^*} + \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_2^*} = 0, \quad (6)$$

$$\text{Re} \left( \mathcal{V}_1^* \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_1^*} + \mathcal{V}_2^* \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_2^*} \right) = -\frac{\partial P^*}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{11}^*}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{12}^*}{\partial x_2^*}, \quad (7,a)$$

$$\text{Re} \left( \mathcal{V}_1^* \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_1^*} + \mathcal{V}_2^* \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_2^*} \right) = -\frac{\partial P^*}{\partial x_2^*} + \frac{\partial T_{21}^*}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{22}^*}{\partial x_2^*}, \quad (7,b)$$

$$T_{11}^* + We \left\{ \mathcal{V}_1^* \frac{\partial T_{11}^*}{\partial x_1^*} + \mathcal{V}_2^* \frac{\partial T_{11}^*}{\partial x_2^*} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_1^*} \right) \left( T_{12}^* + T_{21}^* \right) \right\} = 2 \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_1^*}, \quad (8,a)$$

$$T_{22}^* + We \left\{ \mathcal{V}_1^* \frac{\partial T_{22}^*}{\partial x_1^*} + \mathcal{V}_2^* \frac{\partial T_{22}^*}{\partial x_2^*} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_1^*} \right) \left( T_{12}^* + T_{21}^* \right) \right\} = 2 \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_2^*}, \quad (8,b)$$

$$T_{12}^* + We \left\{ \mathcal{V}_1^* \frac{\partial T_{12}^*}{\partial x_1^*} + \mathcal{V}_2^* \frac{\partial T_{12}^*}{\partial x_2^*} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_1^*} \right) \left( T_{11}^* - T_{22}^* \right) \right\} = \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_2^*} + \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_1^*}, \quad (8,b)$$

$$T_{21}^* + We \left\{ \mathcal{V}_1^* \frac{\partial T_{21}^*}{\partial x_1^*} + \mathcal{V}_2^* \frac{\partial T_{21}^*}{\partial x_2^*} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_1^*} \right) \left( T_{11}^* - T_{22}^* \right) \right\} = \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_2^*} + \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_1^*}, \quad (8,r)$$

где  $\text{Re} = \frac{c \bar{u} H'}{3c}$  – число Рейнольдса;  $We = \frac{\mu_c \bar{u}}{H'}$  – число Вейсенберга.

Если ограничиться течением, при котором инерционными членами можно пренебречь, то левая часть уравнений (7) станет равной нулю. Применяя уравнение неразрывности (6), введем функцию тока:

$$\mathcal{V}_1^* = \frac{\partial \Psi}{\partial x_2^*}, \quad \mathcal{V}_2^* = -\frac{\partial \Psi}{\partial x_1^*}. \quad (9)$$

Полагая параболическим профиль скорости на входе в канал, а скорость на поверхности твердой стенки (условие прилипания) равной нулю и считая, что в потоке, покинувшем канал, скорость постоянна, граничные условия будут иметь следующий вид:

$$x_1^* = -\infty, \quad \mathcal{V}_1^* = \frac{3}{2}(1 - x_2^{*2}), \quad \mathcal{V}_2^* = 0, \quad (10,a)$$

$$x_1^* = 0, \quad 0 \leq x_2^* \leq h^*, \quad \mathcal{V}_1^* = \mathcal{V}_0^*, \quad \mathcal{V}_2^* = 0, \quad (10,b)$$

$$x_1^* = 0, \quad h^* \leq x_2^* \leq 1, \quad \mathcal{V}_1^* = \mathcal{V}_2^* = 0, \quad (10,b)$$

$$x_2^* = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_2^*} = \mathcal{V}_2^* = 0, \quad (10,r)$$

$$x_2^* = 1, \quad \mathcal{V}_1^* = \mathcal{V}_2^* = 0, \quad (10,d)$$

где  $\mathcal{V}_0^* = \text{const}$ , определяемая расходной скоростью;  $h^*$  – безразмерная величина, равная  $\frac{h'}{H}$ ;  $2h'$  – ширина щели.

Для определения полей течения и напряжений необходимо решить уравнения (6), (7) и (8), используя граничные условия (10). Решить эти уравнения в общем случае не представляется возможным. Поэтому ограничимся лишь медленными течениями. Тогда можно пренебречь не только инерционными членами, но и считать, что число Вейсенберга меньше единицы.

Следует напомнить, что число Вейсенберга характеризует меру проявления неньютоновского эффекта при сдвиговом течении. В рассматриваемой задаче реализуется сложное течение, когда имеется и сдвиговый, и продольный градиенты скорости. С ростом скорости истечения через щель, как было показано в работе [12], доля продольного течения возрастает, а сдвигового – уменьшается. Поэтому более оправдано использовать не число  $We$ , а число Деборы, которое характеризует проявление неньютоновских свойств при течении с растяжением [13]. Однако если учесть, что для стационарных течений отношение  $\frac{De}{We} = Re^{0,75}$  [13, 14], то оба критерия ( $We$  и  $De$ ) становятся равноинформационными, т.к. они взаимозависимы в пределах геометрически подобных полей течения.

Поэтому для тех ограничений, которые наложены на рассматриваемое течение, можно записать скорости, напряжения и функции тока в виде разложения по числу  $We$ :

$$\begin{aligned} \mathcal{V}_i^* &= \mathcal{V}_i^{(0)} + We \mathcal{V}_i^{(1)} + We^2 \mathcal{V}_i^{(2)} + \dots, \\ P^* &= P^{(0)} + We P^{(1)} + We^2 P^{(2)} + \dots, \\ T_{ij}^* &= T_{ij}^{(0)} + We T_{ij}^{(1)} + We^2 T_{ij}^{(2)} + \dots, \\ \psi^* &= \psi^{(0)} + We \psi^{(1)} + We^2 \psi^{(2)} + \dots \end{aligned} \quad (11)$$

Подставив (11) в уравнения (6), (7), (8) и условия на границе (10), проведем упорядочение относительно числа Вейсенберга.

Запишем члены уравнений, не включающие число Вейсенберга:

$$\frac{\partial \mathcal{V}_1^{(0)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial \mathcal{V}_2^{(0)}}{\partial x_2^*} = 0, \quad (12,а)$$

$$\frac{\partial T_{11}^{(0)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{12}^{(0)}}{\partial x_2^*} = \frac{\partial P^{(0)}}{\partial x_1^*}, \quad (12,б)$$

$$\frac{\partial T_{21}^{(0)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{22}^{(0)}}{\partial x_2^*} = \frac{\partial P^{(0)}}{\partial x_2^*}, \quad (12,в)$$

$$T_{11}^{(0)} = 2 \frac{\partial \mathcal{V}_1^{(0)}}{\partial x_1^*}, \quad T_{22}^{(0)} = 2 \frac{\partial \mathcal{V}_2^{(0)}}{\partial x_2^*}, \quad (12,г)$$

$$T_{12}^{(0)} = \frac{\partial \varphi_1^{(0)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial \varphi_2^{(0)}}{\partial x_1^*}, \quad (12,д)$$

$$T_{21}^{(0)} = \frac{\partial \varphi_1^{(0)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial \varphi_2^{(0)}}{\partial x_1^*}, \quad (12,ж)$$

$$\varphi_1^{(0)} = \frac{\partial \Psi^{(0)}}{\partial x_2^*}, \quad \varphi_2^{(0)} = -\frac{\partial \Psi^{(0)}}{\partial x_1^*}. \quad (12,з)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} x_1^* = -\infty, \quad \varphi_1^{(0)} &= \frac{3}{2}(1 - x_2^{*2}), \quad \varphi_2^{(0)} = 0, \\ x_1^* = 0, \quad 0 \leq x_2^* \leq h^*, \quad \varphi_1^{(0)} &= \varphi_0^*, \quad \varphi_2^{(0)} = 0, \\ x_1^* = 0, \quad h^* \leq x_2^* \leq 1, \quad \varphi_1^{(0)} &= \varphi_2^{(0)} = 0, \\ x_2^* = 0, \quad \frac{\partial \varphi_1^{(0)}}{\partial x_2^*} &= \varphi_2^{(0)} = 0, \\ x_2^* = 1, \quad \varphi_1^{(0)} &= \varphi_2^{(0)} = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Учитывая уравнения (12), выразив  $\frac{\partial P^{(0)}}{\partial x_1^*}$ ,  $\frac{\partial P^{(0)}}{\partial x_2^*}$  через  $\Psi^{(0)}$  и ее производные и исключив  $P^{(0)}$ , получим:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x_1^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^{*2}} \right) \Psi^{(0)} = 0. \quad (14)$$

Для граничных условий (13) решение уравнения (14)

$$\Psi^{(0)} = \Psi^{(0)}(x_1^*, x_2^*)$$

описывает течение ньютоновской жидкости.

Подставив уравнения (11) в уравнения (8) и сгруппировав члены, содержащие число Вейсенберга в первой степени, получим:

$$\begin{aligned} T_{11}^{(1)} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \varphi_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \varphi_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left( T_{12}^{(0)} + T_{21}^{(0)} \right) + \\ &+ 2 \frac{\partial \varphi_1^{(1)}}{\partial x_1^*} - \varphi_1^{(0)} \frac{\partial T_{11}^{(0)}}{\partial x_1^*} - \varphi_2^{(0)} \frac{\partial T_{11}^{(0)}}{\partial x_2^*}, \end{aligned} \quad (15,а)$$

$$\begin{aligned} T_{22}^{(1)} &= 2 \frac{\partial \varphi_2^{(1)}}{\partial x_2^*} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \varphi_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \varphi_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left( T_{12}^{(0)} + T_{21}^{(0)} \right) - \\ &- \varphi_1^{(0)} \frac{\partial T_{22}^{(0)}}{\partial x_1^*} - \varphi_2^{(0)} \frac{\partial T_{22}^{(0)}}{\partial x_2^*}, \end{aligned} \quad (15,б)$$

$$\begin{aligned} T_{12}^{(1)} = & \frac{\partial v_1^{(1)}}{\partial x_2^*} + \frac{\partial v_2^{(1)}}{\partial x_1^*} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial v_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left( T_{11}^{(0)} - T_{22}^{(0)} \right) - \\ & - v_1^{(0)} \frac{\partial T_{12}^{(0)}}{\partial x_1^*} - v_2^{(0)} \frac{\partial T_{12}^{(0)}}{\partial x_2^*}, \end{aligned} \quad (15,в)$$

$$\begin{aligned} T_{21}^{(1)} = & \frac{\partial v_1^{(1)}}{\partial x_2^*} + \frac{\partial v_2^{(1)}}{\partial x_1^*} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial v_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left( T_{11}^{(0)} - T_{22}^{(0)} \right) - \\ & - v_1^{(0)} \frac{\partial T_{21}^{(0)}}{\partial x_1^*} - v_2^{(0)} \frac{\partial T_{21}^{(0)}}{\partial x_2^*}, \end{aligned} \quad (15,г)$$

где  $v_i^{(0)}, T_{ij}^{(0)}$  представляют собой составляющие скорости и напряжений членов уравнений, которые содержат число Вейсенберга в нулевой степени и являются известными.

Преобразуя аналогичным образом уравнение неразрывности, уравнение движения и граничные условия, получим:

$$\frac{\partial v_1^{(1)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial v_2^{(1)}}{\partial x_2^*} = 0, \quad (16,а)$$

$$\frac{\partial T_{11}^{(1)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{12}^{(1)}}{\partial x_2^*} = \frac{\partial P^{(1)}}{\partial x_1^*}, \quad (16,б)$$

$$\frac{\partial T_{21}^{(1)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{22}^{(1)}}{\partial x_2^*} = \frac{\partial P^{(1)}}{\partial x_2^*}. \quad (16,в)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} x_1^* = -\infty, & \quad v_1^{(1)} = v_2^{(1)} = 0, \\ x_1^* = 0, & \quad v_1^{(1)} = v_2^{(1)} = 0, \\ x_2^* = 1, & \quad v_1^{(1)} = v_2^{(1)} = 0, \\ x_2^* = 0, & \quad v_1^{(1)} = v_2^{(1)} = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Функция тока (9) приобретает вид:

$$v_1^{(1)} = \frac{\partial \psi^{(1)}}{\partial x_2^*}, \quad v_2^{(1)} = -\frac{\partial \psi^{(1)}}{\partial x_1^*}. \quad (18)$$

Учитывая (18) и исключая из уравнения (16)  $P^{(1)}$ , получим:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x_1^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^{*2}} \right) \psi^{(1)} = 0. \quad (19)$$

Решение уравнения (19) с граничными условиями (17) имеет вид  $\psi^{(1)} = 0$ , т.е. члены уравнения, содержащие число Вейсенберга в первой степени, не оказывают влияния на распределение скорости. Однако, как видно из уравнения (15), напря-

жения  $\Gamma_{11}^{(1)}, \Gamma_{22}^{(1)}, \Gamma_{12}^{(1)}, \Gamma_{21}^{(1)}$  отражают влияние упругости членов уравнения, содержащих число Вейсенберга в первой степени.

Подставляя уравнения (11) в уравнения (18), учитывая, что  $\varphi_1^{(1)} = \varphi_2^{(1)} = 0$ , и сгруппировав члены, содержащие число Вейсенберга во второй степени, получим:

$$\Gamma_{11}^{(2)} = 2 \frac{\partial \varphi_1^{(2)}}{\partial x_1^*} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \varphi_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \varphi_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left( \Gamma_{12}^{(1)} + \Gamma_{21}^{(1)} \right) - \varphi_1^{(0)} \frac{\partial \Gamma_{11}^{(1)}}{\partial x_1^*} - \varphi_2^{(0)} \frac{\partial \Gamma_{11}^{(1)}}{\partial x_2^*}, \quad (20,а)$$

$$\Gamma_{22}^{(2)} = 2 \frac{\partial \varphi_2^{(2)}}{\partial x_2^*} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \varphi_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \varphi_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left( \Gamma_{12}^{(1)} + \Gamma_{21}^{(1)} \right) - \varphi_1^{(0)} \frac{\partial \Gamma_{22}^{(1)}}{\partial x_1^*} - \varphi_2^{(0)} \frac{\partial \Gamma_{22}^{(1)}}{\partial x_2^*}, \quad (20,б)$$

$$\Gamma_{12}^{(2)} = \frac{\partial \varphi_1^{(2)}}{\partial x_2^*} + \frac{\partial \varphi_2^{(2)}}{\partial x_1^*} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \varphi_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \varphi_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left( \Gamma_{11}^{(1)} - \Gamma_{22}^{(1)} \right) - \varphi_1^{(0)} \frac{\partial \Gamma_{12}^{(1)}}{\partial x_1^*} - \varphi_2^{(0)} \frac{\partial \Gamma_{12}^{(1)}}{\partial x_2^*}, \quad (20,в)$$

$$\Gamma_{21}^{(2)} = \frac{\partial \varphi_1^{(2)}}{\partial x_2^*} + \frac{\partial \varphi_2^{(2)}}{\partial x_1^*} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \varphi_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \varphi_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left( \Gamma_{11}^{(1)} - \Gamma_{22}^{(1)} \right) - \varphi_1^{(0)} \frac{\partial \Gamma_{21}^{(1)}}{\partial x_1^*} - \varphi_2^{(0)} \frac{\partial \Gamma_{21}^{(1)}}{\partial x_2^*}. \quad (20,г)$$

Уравнение неразрывности, уравнение движения, граничные условия и функция тока имеют такой же вид, как и уравнения (16), (17) и (19) после замены в последних индекса (1) на (2).

Далее исключая  $P^{(2)}$ , получим:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial^2}{\partial x_1^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^{*2}} \right) \Psi^{(2)} = \frac{\partial^2 \varphi_1^{(0)}}{\partial x_2^* \partial x_1^*} \left( \frac{\partial A}{\partial x_1^*} + \frac{\partial A}{\partial x_2^*} \right) + \\ & + \frac{\partial \varphi_1^{(0)}}{\partial x_2^*} \left( \frac{\partial^2 A}{\partial x_1^{*2}} + 2 \frac{\partial^2 \Gamma_{12}^{(1)}}{\partial x_2^* \partial x_1^*} \right) + \frac{\partial \varphi_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \left( \frac{\partial^2 A}{\partial x_2^{*2}} - 2 \frac{\partial^2 \Gamma_{12}^{(1)}}{\partial x_1^* \partial x_2^*} \right) - \\ & - C \frac{\partial^2 B}{\partial x_1^* \partial x_2^*} - \frac{B}{2} \left( 2 \frac{\partial^2 C}{\partial x_1^* \partial x_2^*} - \frac{\partial^2 A}{\partial x_2^{*2}} + \frac{\partial^2 A}{\partial x_1^{*2}} \right) - \\ & - \frac{\partial B}{\partial x_1^*} \left( \frac{\partial C}{\partial x_2^*} + \frac{\partial A}{\partial x_1^*} \right) + \frac{\partial B}{\partial x_2^*} \left( \frac{\partial A}{\partial x_2^*} - \frac{\partial C}{\partial x_1^*} \right) + \frac{\partial^2 \varphi_1^{(0)}}{\partial x_2^{*2}} \cdot \frac{\partial \Gamma_{12}^{(1)}}{\partial x_1^*} + \\ & + \frac{\partial^2 \varphi_2^{(0)}}{\partial x_1^{*2}} \cdot \frac{\partial \Gamma_{12}^{(1)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial^2 \varphi_1^{(0)}}{\partial x_1^{*2}} \cdot \frac{\partial \Gamma_{12}^{(1)}}{\partial x_1^*} - \frac{\partial^2 \varphi_2^{(0)}}{\partial x_2^{*2}} \cdot \frac{\partial \Gamma_{21}^{(1)}}{\partial x_2^*} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2 \frac{\partial \psi_2^{(0)}}{\partial x_2^{*2}} \left( \frac{\partial^2 T_{12}^{(1)}}{\partial x_2^{*2}} + \frac{\partial^2 T_{12}^{(1)}}{\partial x_1^{*2}} \right) + \frac{A}{2} \left( \frac{\partial^2 B}{\partial x_2^{*2}} - \frac{\partial^2 B}{\partial x_1^{*2}} \right) + \\
& + \psi_1^{(0)} \left( \frac{\partial^3 T_{12}^{(1)}}{\partial x_2^{*2} \partial x_1^*} - \frac{\partial^3 T_{12}^{(1)}}{\partial x_1^{*3}} + \frac{\partial^3 A}{\partial x_1^{*2} \partial x_2^*} \right) + \\
& + \psi_2^{(0)} \left( \frac{\partial^3 T_{12}^{(1)}}{\partial x_2^{*3}} - \frac{\partial^3 T_{12}^{(1)}}{\partial x_2^{*2} \partial x_2^*} + \frac{\partial^3 A}{\partial x_2^{*2} \partial x_1^*} \right).
\end{aligned} \tag{21}$$

Здесь  $A = T_{11}^{(1)} - T_{22}^{(1)}$ ;  $B = \frac{\partial \psi_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \psi_2^{(0)}}{\partial x_1^*}$ ;  $C = T_{12}^{(1)} + T_{21}^{(1)}$ .

Поскольку правая часть уравнения (21) известна, то, решив уравнение (21), включающее в себя граничные условия, определим члены, содержащие число Вейсберга во второй степени, характеризующие распределение скоростей и напряжений.

Реализация задачи была осуществлена численным методом [15, 16] с использованием ПЭВМ. Следует отметить, что правая часть уравнения (21) в отличие от работы [11] содержит производные более высокого порядка.

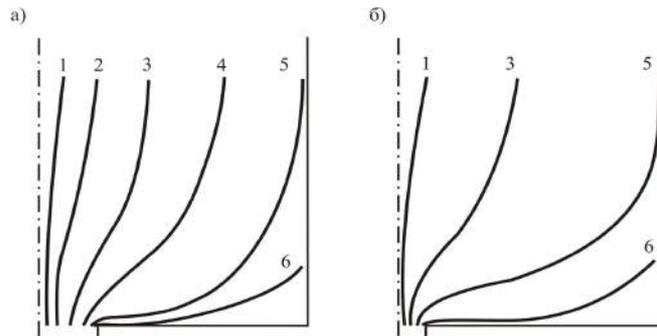


Рисунок 2 – Функция тока при истечении через щель ньютоновской жидкости:  $We = 0$ ,  $\Psi$ :  
1 – 0,125, 2 – 0,375, 3 – 0,625, 4 – 0,875, 5 – 0,9715, 6 – 1,0; а)  $h'/H' = 0,2$ ; б)  $h'/H' = 0,07$

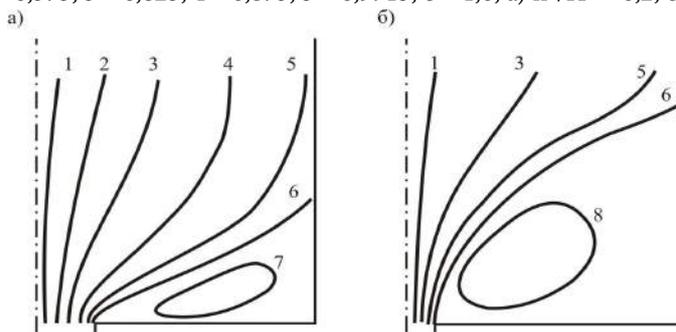


Рисунок 3 – Функция тока при истечении через щель упруговязкой жидкости:  $We = 0,1$ ,  $\Psi$ :  
1 – 0,125, 2 – 0,375, 3 – 0,625, 4 – 0,875, 5 – 0,9715, 6 – 1,0, 7 – 1,01, 8 – 1,1;  
а)  $h'/H' = 0,2$ ; б)  $h'/H' = 0,07$

На рис. 2 и 3 показана функция тока при истечении через щель ньютоновской ( $We = 0$ ) и упруговязкой ( $We = 0,1$ ) жидкостей. Видно, что при уменьшении коэффициента сжатия канала влияние входа в щель на функцию тока возрастает.

Циркуляционная зона (рис. 3,б), возникающая при втекании в щель упруговязкой жидкости, от правого угла канала доходит до щели и занимает область треугольной формы, а линии тока образуют входную струю. Следовательно, уменьшение коэффициента сжатия канала (и увеличение  $We$ ) приводит к возникновению входной затопленной струи.

На рис. 4 показано распределение безразмерного продольного градиента скорости на оси потока при втекании в щель ньютоновской (кривые 1 и 2) и упруговязкой (кривая 3) жидкостей.

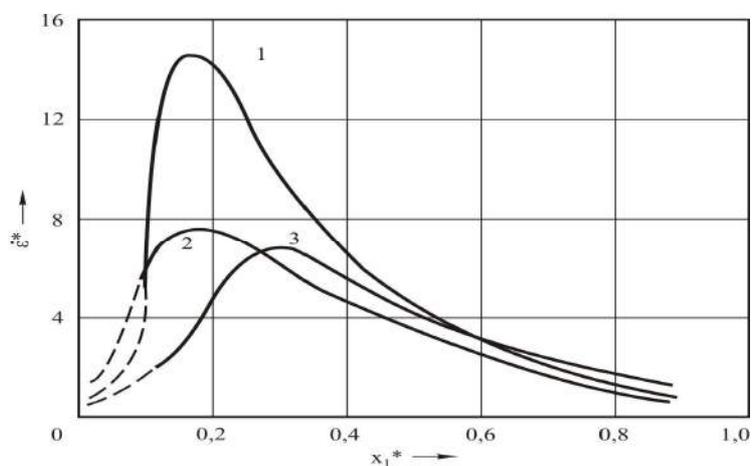


Рисунок 4 – Распределение безразмерного продольного градиента скорости на оси потока жидкости, втекающей в щель: 1:  $h'/H' = 0,07, We = 0$ ; 2:  $h'/H' = 0,2, We = 0$ ; 3:  $h'/H' = 0,2, We = 0,1$

Видно, что максимальное значение градиента скорости при течении ньютоновской жидкости достигается на расстоянии  $3h'$  и  $h'$  ( $x_1^* = 1,5$ ) от щели для коэффициентов сжатия 0,2 и 0,07 соответственно. Появление у текущей жидкости упруговязких свойств смещает максимум на кривой  $\dot{\epsilon}^* = f(x_1^*)$  в область больших  $x_1^*$  и понижает величину  $\dot{\epsilon}_{\max}^*$ . Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчета показывает, что рассчитанные линии тока и распределение градиента скорости соответствуют экспериментально полученным в области относительно малых скоростей.

Распределение безразмерных нормальных напряжений для коэффициента сжатия канала 0,07 и числа Вейсенберга 0,1 приведено на рис. 5, а.

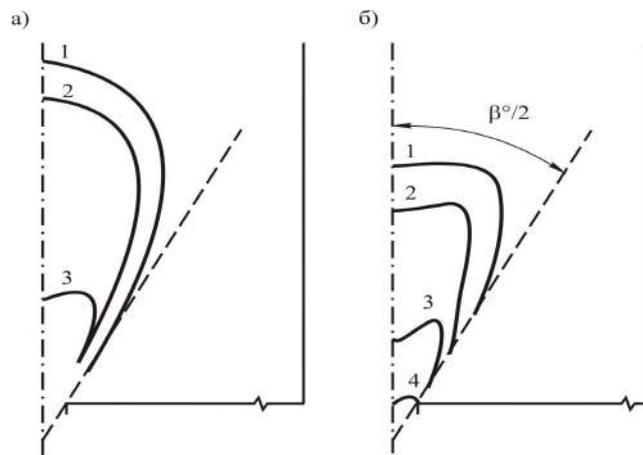


Рисунок 5 – Распределение безразмерных нормальных напряжений (а) и изохром (б) во входной области щели: угловая полуширина струи ( $\beta^\circ/2$ ) –  $30^\circ$ ; а)  $We = 0,1$ ,  $h'/H' = 0,07$ ;  $T^*$  : 1 – 5, 2 – 7, 3 – 45; б)  $\Delta n$ : 1 –  $10^{-4}$ , 2 –  $7 \cdot 10^{-4}$ , 3 –  $15 \cdot 10^{-4}$ , 4 –  $62 \cdot 10^{-4}$

Эти результаты довольно хорошо отражают экспериментальные данные по распределению изохром во входной области щели (см. рис. 5,б [17]). Поскольку в исследуемой системе (полистирол-бромформ) полимер и растворитель имели равные показатели преломления, то полученные линии равных значений двулучепреломления (изохромы) внутри затопленной входной струи пропорциональны первой разности нормальных напряжений.

Таким образом, рассчитанные линии тока, поля скоростей и их градиентов, а также распределение напряжений при истечении через щель ньютоновской и упруговязкой жидкостей согласуются с имеющимися экспериментальными данными, если ограничиться относительно малыми скоростями, т.е. теми режимами течения, когда упруговязкие свойства только начинают проявляться.

Полученные результаты можно рассматривать как указание на то, что численный метод анализа сходящегося течения упруговязкой жидкости Максвелла можно использовать для расчета продольных градиентов скорости, реализуемых во входной области струеформирующей головки гидрорежущей установки при докритических ( $\dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_{кр}$ ) режимах течения полимерного раствора. Следует, однако, заметить, что в общем случае необходимо учитывать влияние угла входа в канал, что можно сделать, рассмотрев задачу в прямонаклонных или криволинейных координатах.

Результаты расчета позволяет приблизиться к пониманию природы увеличения режущей способности гидроструи с полимерными добавками и предложить

рекомендации по выбору режимов гидроструйной водно-полимерной обработки пищевых продуктов резанием.

### Список литературы

1. *De Gennes P.G.* Coil–stretch transition of dilute flexible polymers under ultrahigh velocity gradients // *J. Chem. Phys.* 1974. Vol. 60. № 12. P. 5030–5042.
2. *Peterlin A.* Hydrodynamics of macromolecules in a velocity field with longitudinal gradient // *J. Polym. Sci. Pt. Polym. Letters.* 1966. Vol. 4. № 4. P. 287–291.
3. *Pogrebnyak V.G.* Polymer Macromolecules as a Tool for Studying Wall–Adjacent Turbulence Flow // *Proceedings of the 2nd International Symposium on Seawater Drag Reduction / ASERC, Korea – Busan, 2005.* P. 79–90.
4. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology / Ed. By Mark H.* New York: John Wiley, 1967. V. 6. 818 p.
5. *Войткунский Я.И. и др.* Уравнения движения жидкости с учетом ее релаксационных свойств // *Сб. науч. тр. Ленингр. кораблестр. ин-та.* Л., 1970. № 69. С. 19–25.
6. *Виноградов Г.В., Малкин А.Я.* Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 438 с.
7. *Ферри Дж.Д.* Вязкоупругие свойства полимеров. Пер. с англ. под ред. [и с предисл.] Гуля В. Е. М.: Иностран. лит., 1963. 535 с.
8. *Мидлман С.* Течение полимеров. Пер. с англ. Панова Ю. Н.; под ред. Малкина А.Я. М.: Мир, 1971. 259 с.
9. *Кристенсен Р.* Введение в теорию вязкоупругости. Пер. с англ. Рейтмана М.И.; под ред. Шапиро Г. С. М.: Мир, 1974. 338 с.
10. *Лодж А.С.* Эластичные жидкости. Введение в реологию конечнодеформируемых полимеров. Пер. с англ. Берковского Б. М. и Шульмана З.П. М.: Наука, 1969. 463 с.
11. *Накамура К. и др.* Медленное истечение вязкоупругой жидкости по коническому каналу через щель // *Сэнкэи кикай гаккай си.* 1978. Т. 31. № 8. С. 49–55; перевод № Б-31876 / Завьялов С.К. М.: Всесоюз. центр перевод. научно-техн. литер. и докумен., 1979 18 с.
12. *Погребняк В.Г., Иванюта Ю.Ф., Наумчук Н.В.* Деградация растворов полимеров // *Изв. вузов СССР. Сер. Нефть и газ.* 1988. № 11. С. 52–57.
13. *Астарита Дж., Маруччи Дж.* Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. М.: Мир, 1978. 309 с.
14. *Хинце И.О.* Турбулентность. Ее механизм и теория. Пер. с англ. Яковлевского О.В.; под ред. Абрамовича Г.Н. М.: физ.–мат. гос. из-во, 1963. 680 с.
15. *Коллатц Л.* Задачи на собственные значения с техническими приложениями: пер. со 2-го нем. изд.; под общ. ред. Никольского В.В. М.: Наука, 1968. 503 с.
16. *Шуп Т.* Решение инженерных задач на ЭВМ: практ. рук. Пер. с англ. Хохрякова В.А.; под ред. Миносцева В.Б. М.: Мир, 1981. 235 с.
17. *Бресткин Ю. В., Амрибахшов Д.Х., Холмуминов А.А., Френкель С.Я.* Разворачивание макромолекул при сходящемся течении // *Изв. АН УзССР. Сер. физ.–мат. наук.* 1988. № 6. С. 80–84.

**В.А. Афанасьев**, кандидат технических наук, доцент  
Камский институт гуманитарных и инженерных технологий

### ЗАДАНИЕ ДОПУСТИМОЙ ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЙ

*Рассматривается задача определения погрешности при измерениях траекторных параметров полета пули в допустимых пределах, которая характеризуется случайным исходом каждого испытания изделия и невозпроизводимостью результатов испытаний изделий.*

*Considered the problem of determining the error of measurement of trajectory parameters of the bullet in the acceptable range, which is characterized by a random outcome of each test and can't produce test results of products*

**Ключевые слова:** оценка параметров, риск потребителя, риск изготовителя, распределение, гипотеза о среднем, гипотеза о дисперсии, погрешность, измерения, пространство параметров, вероятностное пространство.

**Keywords:** parameter estimation, risk consumer, producer's risk, the distribution, the hypothesis of average, the hypothesis of dispersion, error, measurement, space parameters, probability space.

При решении этой задачи следует отталкиваться от необходимости точного вычисления оценок для случайных величин траекторных параметров полета пули изделия и мощности критерия проверки гипотезы о годности изделия.

При проверке гипотезы о годности изделия риск потребителя определить нельзя, если распределение дефектной продукции неизвестно. А риск изготовителя  $\alpha$  можно обеспечить заданным путем изменения критического значения. Поэтому необходимо ограничить вероятность противоположных решений  $\varepsilon$  о качестве продукции. Такие решения принимаются по выборке с реальными измерениями при сравнении с выборкой для идеальных измерений без погрешностей. Критерий допустимой погрешности измерений принимает вид

$$\delta\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\alpha} \leq 0,1. \quad (1)$$

Известна идеальная выборка распределения случайной величины  $X$ . Оценкой параметра  $\xi_0$  случайной величины  $X$  является функция  $\xi$ . Аналогичным образом существует реальная выборка распределения случайной величины  $Z$ . Оценкой параметра  $\eta_0$  случайной величины  $Z$  является функция  $\eta$ . Гипотезы для случая идеаль-

ной выборки и реальной выборки запишем в виде

$$H_{0x} = \xi = \xi_0 \quad H_{0z} = \eta = \eta_0 \quad (2)$$

Для уровня значимости  $\alpha$  можно построить критические области проверки гипотез, которые представим в виде

$$\xi \geq \xi_\alpha; \quad (3)$$

$$\eta \geq \eta_\alpha \quad (4)$$

против альтернатив  $\xi > \xi_0$  и  $\eta > \eta_0$ .

где  $\xi_\alpha, \eta_\alpha$  – критические значения, соответствующие уровню значимости  $\alpha$ .

Границы критических областей разделяют плоскость параметров  $\xi, \eta$  на четыре области  $N_g, N_\delta, N_\varepsilon, N_\gamma$ . Вероятности попадания выборочной случайной точки  $(\xi, \eta)$  в эти области равны соответственно  $\vartheta, \delta, \varepsilon, \gamma$ , причем

$$\alpha = \varepsilon + \gamma = \delta + \gamma \quad \text{или} \quad \varepsilon = \delta \quad (5)$$

и  $\varepsilon \leq \alpha$ , т. к. вероятности неотрицательны. Соотношение (5) справедливо, если критические значения гипотез  $H_{0x}$  и  $H_{0z}$  соответствуют одному и тому же уровню значимости. Предположим теперь, что по выполнению неравенства (4) делается заключение о выполнении неравенства (3). В области  $N_g$  оба неравенства одновременно не выполняются, в области  $N_\gamma$  – одновременно выполняются. В областях  $N_\delta$  и  $N_\varepsilon$  выполнение одного неравенства означает невыполнение другого и наоборот. Следовательно, в этих областях ошибки суждения о выполнении (3) по (4) имеют противоположный характер. Поэтому решающее правило: «Гипотеза  $H_{0x}$  принимается, если принимается гипотеза  $H_{0z}$ , и отвергается, если отвергается  $H_{0z}$ » обеспечивает уровень  $\alpha$  при проверке гипотезы о годности продукции по реальной выборке вместо идеальной, которую мы могли бы иметь в случае точных измерений.

В случае точных измерений  $\varepsilon = 0$ , а с ухудшением точности  $\varepsilon$  увеличивается. Одновременно увеличивается риск потребителя. Поэтому вероятность противоположных решений может служить мерой допустимой точности измерений, и мы применим критерий (1) для проверки гипотез о среднем и дисперсии.

Если измеряемая случайная величина  $X$  и аддитивная ошибка измерений  $Y$  имеют нормальные законы  $N(\mu_x, \sigma_x^2)$  и  $N(0, \sigma_y^2)$ , то результат измерения  $Z$  имеет закон  $N(\mu_x, \sigma_x^2 + \sigma_y^2)$  и двусторонние критические области проверки гипотезы о среднем имеют вид

$$|\bar{x} - \mu_x| > \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} u_{\frac{\alpha}{2}} = \sigma_{\bar{x}} u_{\frac{\alpha}{2}}; \quad |\bar{z} - \mu_x| > \frac{\sigma_z}{\sqrt{n}} u_{\frac{\alpha}{2}} = \sigma_{\bar{z}} u_{\frac{\alpha}{2}}. \quad (6)$$

где  $\frac{u_\alpha}{2}$  – критическое значение закона  $N(0,1)$  для уровня значимости  $\frac{\alpha}{2}$ ,  $\bar{x}$ ,  $\bar{z}$ ,  $\sigma_{\bar{x}}^2$ ,  $\sigma_{\bar{z}}^2$  – выборочные средние и их дисперсии. Совместное распределение выборочных средних  $\bar{x}$ ,  $\bar{z}$  является нормальным. Коэффициент корреляции равен

$$\rho = \frac{M[(\bar{x} - \mu_x)(\bar{z} - \mu_z)]}{\sigma_{\bar{x}}\sigma_{\bar{z}}} = \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}}; \quad \lambda = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}. \quad (7)$$

Вероятность противоположных решений  $\varepsilon$  определена интегрированием совместной плотности по двусвязной области  $N_\varepsilon$  и приведена в табл. 1. По результатам численного интегрирования на ЭВМ для различных значений  $\alpha$  и  $\lambda$  подобрано аппроксимирующее выражение

$$\varepsilon = 0,148 \ln\left(\frac{\alpha}{0,136} + 1\right) \quad (8)$$

с относительной ошибкой не более 1%. При  $\alpha < 0,136$  имеем

$$\varepsilon \approx 1,1\lambda\alpha. \quad (9)$$

По критерию (4) с учетом (9) получим

$$\lambda \leq 0,09. \quad (10)$$

Перейдем к проверке гипотезы о дисперсии. Предположим, что качество продукции контролируется по величине выборочной дисперсии. Критические области гипотезы о годности продукции имеют вид

$$s_x^2 > \sigma_{\text{доп}}^2; \quad s_z^2 > \sigma_{\text{доп}}^2. \quad (11)$$

Совместное распределение элементов выборочной матрицы рассеивания в случае исходного нормального распределения величин  $X$  и  $Z$  дается плотностью Уишарта, которую можно представить в виде

$$\varphi(u_1, u_2) = \frac{(u_1 u_2)^{\frac{n-3}{2}} \exp\left\{-\frac{u_1 + u_2}{2(1-\rho^2)}\right\}}{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right) 2^{n-1} (1-\rho^2)^{\frac{n-1}{2}-1}} \int_0^1 (1-r^2)^{\frac{n-4}{2}} \exp\left\{-\frac{r\rho\sqrt{u_1 u_2}}{1-\rho^2}\right\} dr, \quad (12)$$

или

$$\varphi(u_1, u_2) = \frac{(u_1 u_2)^{\frac{n-3}{4}} \exp\left\{-\frac{u_1 + u_2}{2(1-\rho^2)}\right\}}{(1-\rho^2)\rho^{\frac{n-3}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) 2^{\frac{n+1}{2}}} I_{\frac{n-3}{2}}\left(\frac{\rho\sqrt{u_1 u_2}}{1-\rho^2}\right), \quad (13)$$

Таблица 1 – Значение вероятности противоположных решений  $\varepsilon$  и отношения  $\varepsilon/\alpha$  для проверки гипотезы о среднем по реальной выборке

$\lambda$	$\alpha = 0,005, x_{кр} = 2,807$		$\alpha = 0,01, x_{кр} = 2,576$	
	$\varepsilon$	$\varepsilon/\alpha$	$\varepsilon$	$\varepsilon/\alpha$
0,1	0,0005644	0,113	0,001173	0,117
0,2	0,001151	0,213	0,002282	0,228
0,3	0,001696	0,338	0,003316	0,332
0,4	0,002183	0,436	0,004251	0,425
0,5	0,002608	0,520	0,005076	0,508
0,6	0,002972	0,594	0,005790	0,579
0,7	0,008277	0,654	0,006398	0,640
0,8	0,003531	0,706	0,006910	0,691
0,9	0,003741	0,748	0,007340	0,734
1,0	0,003913	0,782	0,007698	0,770
$\lambda$	$\alpha = 0,02, x_{кр} = 2,326$		$\alpha = 0,025, x_{кр} = 2,24$	
	$\varepsilon$	$\varepsilon/\alpha$	$\varepsilon$	$\varepsilon/\alpha$
0,1	0,002077	0,104	0,002667	0,107
0,2	0,004120	0,206	0,005162	0,207
0,3	0,006036	0,302	0,007506	0,300
0,4	0,007784	0,389	0,009651	0,386
0,5	0,009343	0,467	0,01157	0,462
0,6	0,01071	0,535	0,01325	0,528
0,7	0,01188	0,549	0,01472	0,588
0,8	0,01289	0,645	0,01597	0,636
0,9	0,01375	0,687	0,01704	0,680
1,0	0,01447	0,723	0,01796	0,717
$\lambda$	$\alpha = 0,05, x_{кр} = 1,960$		$\alpha = 0,1, x_{кр} = 1,645$	
	$\varepsilon$	$\varepsilon/\alpha$	$\varepsilon$	$\varepsilon/\alpha$
0,1	0,004636	0,092	0,008169	0,081
0,2	0,009143	0,182	0,01614	0,161
0,3	0,01340	0,268	0,02372	0,237
0,4	0,01733	0,346	0,03075	0,308
0,5	0,02089	0,417	0,03719	0,372
0,6	0,02403	0,480	0,04297	0,430
0,7	0,02680	0,536	0,04810	0,481
0,8	0,02921	0,584	0,05264	0,526
0,9	0,03130	0,626	0,05662	0,566
1,0	0,03311	0,667	0,06010	0,601

Таблица 2 – Значения отношения  $\varepsilon/\alpha$  для проверки гипотезы о дисперсии по реальной выборке

n	$\lambda$	$\alpha$						
		0,001	0,005	0,01	0,02	0,05	0,10	0,20
1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	0,01	0,01137	0,00958	0,00875	0,00790	0,00672	0,00672	0,00524
	0,025	0,03506	0,03013	0,02775	0,02518	0,02132	0,01795	0,01398
	0,05	0,07482	0,06493	0,06014	0,05494	0,04716	0,04034	0,03225
	0,10	0,15298	0,13345	0,12397	0,11363	0,09815	0,08452	0,06829
	0,15	0,22865	0,20000	0,18600	0,17071	0,14774	0,12741	0,10312
	0,25	0,36968	0,32514	0,30312	0,27880	0,24189	0,20886	0,16890
	0,35	0,49345	0,43711	0,40870	0,37695	0,32805	0,28360	0,22900
8	0,01	0,01149	0,00967	0,00884	0,00795	0,00674	0,00586	0,00519
	0,025	0,03538	0,03039	0,02800	0,02537	0,02145	0,01804	0,01401
	0,05	0,07542	0,06541	0,06057	0,05528	0,04738	0,04045	0,03223
	0,10	0,15402	0,13422	0,12461	0,11410	0,09836	0,08447	0,06793
	0,15	0,22998	0,20091	0,18671	0,17114	0,14773	0,12699	0,10216
	0,25	0,37130	0,32604	0,30362	0,27879	0,24104	0,20717	0,16610
	0,35	0,49508	0,43771	0,40872	0,37621	0,32601	0,28021	0,22381
10	0,01	0,01168	0,00983	0,00894	0,08043	0,00679	0,00586	0,00510
	0,025	0,03588	0,03080	0,02833	0,02565	0,02166	0,01816	0,01401
	0,05	0,76330	0,06611	0,06113	0,05573	0,04764	0,04053	0,03207
	0,10	0,15646	0,13520	0,12532	0,11453	0,09834	0,08404	0,06695
	0,15	0,23168	0,20185	0,18722	0,17118	0,14701	0,12554	0,09977
	0,25	0,37292	0,32626	0,30304	0,27729	0,23799	0,20560	0,15951
	0,35	0,49618	0,43678	0,40658	0,37262	0,31991	0,27156	0,21167
14	0,01	0,01194	0,01001	0,00911	0,00816	0,00683	0,00583	0,00498
	0,025	0,03652	0,03128	0,02875	0,02598	0,02184	0,01823	0,01395
	0,05	0,07739	0,06683	0,06170	0,05609	0,04770	0,04032	0,03155
	0,10	0,15677	0,13572	0,12545	0,11418	0,09727	0,08230	0,06441
	0,15	0,23263	0,20146	0,18615	0,16929	0,14384	0,12117	0,09392
	0,25	0,37202	0,32272	0,29808	0,27061	0,22852	0,19042	0,14383
	0,35	0,49287	0,49236	0,39682	0,36001	0,36246	0,24926	0,18286
21	0,01	0,01221	0,01020	0,00925	0,00825	0,00685	0,00578	0,00485
	0,025	0,03710	0,03167	0,02903	0,02616	0,02188	0,01812	0,01370
	0,05	0,07809	0,06708	0,06173	0,05588	0,04712	0,03942	0,03029
	0,10	0,15650	0,13435	0,12352	0,11163	0,09375	0,77920	0,05901
	0,15	0,23019	0,19705	0,18072	0,16270	0,13543	0,11109	0,08179
	0,25	0,36325	0,30962	0,28262	0,25243	0,20590	0,16355	0,11153

	0,35	0,47713	0,40615	0,36942	0,32759	0,26164	0,20008	0,12257
28	0,01	0,01236	0,01031	0,00932	0,00830	0,00880	0,00672	0,00473
	0,025	0,03736	0,03179	0,02908	0,02613	0,02174	0,01789	0,01336
	0,05	0,07807	0,06672	0,06120	0,05516	0,04614	0,03821	0,02880
	0,10	0,15457	0,13152	0,12023	0,10778	0,08919	0,07267	0,05294
	0,15	0,22502	0,19016	0,17293	0,15391	0,12508	0,09932	0,06829
	0,25	0,34933	0,29146	0,26220	0,22938	0,17863	0,13225	0,07509
	0,35	0,45386	0,37473	0,33357	0,28646	0,21170	0,14146	0,05240

где  $I_\gamma(\mu)$  - модифицированная функция Бесселя,

$$u_1 = \chi_1^2 = \frac{(n-1)s_x^2}{\sigma_x^2}; \quad u_2 = \chi_2^2 = \frac{(n-1)s_z^2}{\sigma_z^2}; \quad \rho = \frac{1}{1+\lambda^2}; \quad \lambda = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}. \quad (14)$$

Распределение (13) симметрично относительно аргументов, т.е. относительно биссектрисы угла между координатными осями  $u_1, u_2$ . Поэтому в случае одинаковых уровней значимости  $u_{1\hat{c}on} = u_{2\hat{c}on}$  и

$$\sigma_{z\hat{c}on}^2 = \sigma_{x\hat{c}on}^2 (1 + \lambda^2). \quad (15)$$

Интегрированием (12) по области  $N_\varepsilon$  составлена таблица 2 вероятности противоположных решений для различных  $\lambda, \alpha$  и  $n$ .

Анализ результатов вычислений показывает, что для наиболее употребительных вероятностей  $\alpha = 1 \dots 5\%$  и  $n \leq 28$  по критерию (1) имеем

$$\lambda = 0,09 \dots 0,16. \quad (16)$$

В заключение отметим, что при проверке гипотезы о рассеивании по сравнению со случаем проверки гипотезы о среднем (10) к допустимой относительной погрешности измерений предъявляются менее жесткие требования по (16). Критерий малой погрешности измерений  $\lambda = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \leq 0,3 \dots 0,4$ , который известен из метрологии предъявляет к точности измерений менее жесткие требования и соответственно менее жесткие требования в вероятностном пространстве.

### Список литературы

1. Уилкс С. Математическая статистика. М.: Наука, 1967. 532 с.
2. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Физматгиз, 1963. 1100 с.

**А.В. Сократов**, студент

**М.В. Телегина**, кандидат технических наук, доцент

Ижевский государственный технический университет

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИТУАЦИИ НА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОМ ОБЪЕКТЕ

*Статья посвящена использованию методов интеллектуального анализа для определения ситуации на складе хлора потенциально опасного химического объекта. Рассматриваются основные методы интеллектуального анализа, производится выбор рабочего метода. Приводится список параметров, на основе которых будет проводиться анализ, и список возможных ситуаций.*

*Article is devoted to the use of mining techniques to determine the situation on the stock of chlorine is potentially dangerous chemicals. The basic methods of mining and selects the working method. A list of parameters, based on which will be analyzed, and a list of possible situations.*

**Ключевые слова:** извлечение знаний, интеллектуальный анализ данных, дерево решений, классификация.

**Keywords:** data mining, data mining, decision tree classification.

Несмотря на проведение мониторинга экологических и технологических параметров обеспечение безопасности функционирования химически опасных объектов остается актуальной задачей. Недостаточно просто измерять контролируемые параметры, необходимо принимать необходимые управленческие решения на основании текущей ситуации. Текущая ситуация может быть определена по значениям измеренных параметров, а также их сравнения с критическими величинами (значениями предельно допустимых концентраций и предельно допустимых выбросов) и совокупности тенденций их изменения.

Для анализа большого количества параметров (некоторые параметры измеряются каждые тридцать секунд), а также для извлечения необходимой информации из этого большого набора данных, предлагается применять интеллектуальные методы анализа данных. В общем случае процесс интеллектуального анализа и обработки данных состоит из следующих шести этапов: отбор данных, очистка, обогащение, кодирование, извлечение знаний и сообщение [1, 2].

Существует несколько основных методов интеллектуального анализа данных, такие как ассоциация, классификация, кластеризация, прогнозирование, последовательность [1]. Все они имеют свои особенности и лучше подходят для отдельных конкретных задач.

### **Цель работы**

На примере подразделения опасного химического объекта – склада хлора необходимо определить класс ситуации по определенным параметрам. Разработано приложение для отображения технологической информации с функциями отображения данных в табличном виде и построения графиков, нормируемых относительно предельных и предпредельных значений по информации из центральной базы данных. Контроль превышения максимальных значений осуществляется за счет выделения цветом ячеек таблицы «текущее значение», на графике с помощью пороговых зон [3].

Программа позволяет отслеживать технологические параметры в табличном и графическом виде, смотреть архивные данные, выводить данные в виде печатного отчета.

### **Предлагаемое решение**

Классификацию ситуации предлагается проводить по значениям параметров в танках с хлором: давление, уровень, масса, а также в каком состоянии находится в данный момент клапан трубопровода – открыт или закрыт. Значения параметров будут брать не единичные, а средние арифметические за временной промежуток. В разработанной автоматизированной системе визуализации технологических и экологических параметров для классификации будут использованы следующие ситуации: слив, утечка, неисправность, отказ датчика, открытие клапана, брешь в танке, проветривание, простой.

В качестве средства анализа параметров выбрано дерево решений. Дерево решений это древовидная структура, представляющая совокупность решений [4]. Деревья решений разбивают данные на группы на основе значений переменных, в результате чего возникает иерархия операторов "ЕСЛИ - ТО", которые классифицируют данные. Данное средство несложно в реализации, эффективно в работе, а также имеет высокую точность обработки данных.

Каждый класс описывается с помощью условного набора параметров, т.е. для первых трёх это: увеличивается, не изменяется, уменьшается. Данное значение предварительно определяется программой – насколько изменилось среднее значение параметра за отведенный промежуток времени, и за такой же последующий. Т.е. если среднее значение второго промежутка времени значительно меньше, чем среднее значение

первого промежутка, то данный параметр запишется как «Уменьшается» и наоборот. Если значение не изменяется или изменяется в рамках погрешности, то оно записывается как «Не изменяется». Для клапана используется два значения «открыт» и «закрыт». Т.е. описание классов представляет собой таблицу, где первые 4 столбца определяют каждый параметр, а последний – название класса.

Для построения деревьев решений был использован алгоритм ID3 [5]. Суть алгоритма заключается в рекурсивном разбиении заданного множества на подмножества с учетом наиболее выгодного разбиения. Для определения признака, по которому следует разбивать множество, вычисляется энтропия множества для каждого столбца по формуле

$$H_1(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i$$

где  $p_i$  – вероятность появления  $i$ -го признака.

Атрибут, по которому полученное множество имеет меньшую энтропию, считается наиболее выгодным и разбиение происходит по нему. Затем новые полученные множества подвергаются такому же анализу, и разбиваются на подмножества до тех пор, пока значения в последнем столбце не станут одинаковыми, то есть определенный набор параметров укажет на принадлежность к классу. Другими словами – главная таблица делится на подтаблицы по значениям одного из столбцов, и дальше новые таблицы делятся также до тех пор, пока таблица не будет однозначно определять класс.

После анализа таблицы с заданными классами создается древовидная структура, состоящая из таблиц, где у каждой таблицы есть потомки и предки (кроме конечных). Преимущество такой структуры заключается в том, что при определении класса по заданным параметрам не всегда придется обрабатывать все значения параметров, т.е. класс определится по меньшему числу параметров.

Таким образом, в результате анализа таблицы с полным описанием классов создается набор правил, с помощью которых можно определить тип ситуации на складе хлора, используя минимальное количество атрибутов. Данный алгоритм позволил увеличить производительность и эффективность работы системы без использования излишних вычислений и обращений к данным.

Применение классификации ситуации на химически опасном объекте по технологическим и экологическим данным способствует принятию своевременных управленческих решений по повышению безопасности функционирования объекта.

### **Список литературы**

1. Барсегян А. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining БХВ. СПб., 2004. (ISBN 5-94157-522-X).

2. Телегина М.В., Янников И.М., Габричидзе Т.Г. Методы и алгоритмы оценки воздействия потенциально опасных объектов на окружающую среду. Самара: Изд-во Самар. НЦ РАН, 2011. 200 с.
3. Телегина М.В., Фарафонов А.И., Воронин Б.Н. Программа визуализации экологических и технологических данных склада хлора. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012619295. 15.10.12.
4. Laboratory of Mathematical Logic at PDMI Деревья принятия решений [Сайт]. URL: <http://logic.pdmi.ras.ru/~sergey/teaching/mlclub/02-dectrees.pdf> (Дата обращения: 17.11.2014)
5. Ставропольский Государственный университет. Алгоритмы ID3 и C4.5 [Сайт]. URL: <http://www.stgau.ru/> (Дата обращения: 17.11.2014).

**И.О. Архипов**, кандидат технических наук, доцент,  
Камский институт гуманитарных и инженерных технологий  
**В.Б. Гитлин**, доктор технических наук, профессор  
Ижевский государственный технический университет

## НОРМИРОВАННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ КОРРЕЛЯЦИИ С ЕДИНИЧНОЙ ЗАДЕРЖКОЙ КАК МЕРА СПЕКТРА ШУМА

*Рассмотрены вопросы анализа случайных сигналов, имеющих различный наклон огибающей спектра. Показано, что в качестве эффективной меры наклона может быть использован нормированный коэффициент корреляции с единичной задержкой. Коэффициент корреляции с единичной задержкой позволил оценивать изменения типа речевого сигнала при добавлении к сигналу дозированных количеств аддитивного шума с известным распределением, что позволяет повысить надежность разделения речевого сигнала на вокализованные и невокализованные интервалы.*

*The article considers the problems of analysis of random signals having different slope of the spectrum envelope. It is shown that the normalized correlation coefficient with unit delay can be used as the inclination of the effective measures. The correlation coefficient with unit delay allowed to assess changes in the type of the speech signal to a signal adding metered amounts of an additive noise with a known distribution, which improves the reliability of dividing the speech signal into voiced and unvoiced intervals.*

**Ключевые слова:** коэффициенты линейного предсказания, коэффициент корреляции с единичной задержкой, вокализованные звуки речи, невокализованные звуки речи.

**Keywords:** linear prediction coefficients, the correlation coefficient with the unit delay, voiced speech sounds, unvoiced speech sounds

При обработке реального речевого сигнала и различного рода его преобразованиях необходимо учитывать влияние шума на результаты работы соответствующей системы. Так в системах параметрического описания речи необходимо формировать признак вокализованности речи, определяющий присутствие в речевом сигнале вокализованных звуков в отличие от невокализованных [1, 2]. Этот признак (признак «ТОН – НЕ ТОН») зависит от количества шума, присутствующего в речевом сигнале [3, 4]. В системах шумоочистки, в системах определения голо-

совой активности в шуме применяются методы, основанные на сравнении спектров речи и шума [5, 6]. Работа подобных систем требует средств компактного описания характеристик шума.

Известна классификация широкополосных стационарных шумов по виду спектра [7], когда цвет шума определяется наклоном его спектра. Наклон спектра может быть определен по виду огибающей спектра. Для описания огибающей спектра в работах [8, 9] предложено использовать коэффициенты линейного предсказания речи. Коэффициенты линейного предсказания соответствуют коэффициентам передаточной функции фильтра, состоящего из одних полюсов и моделирующего систему генерации звука. При этом, чем меньше порядок модели, тем более общие характеристики огибающей отражают коэффициенты линейного предсказания.

Первый коэффициент линейного предсказания  $a_1$  непосредственно связан с общим наклоном спектра и может быть использован для общей характеристики сигнала. Согласно работы [8] он равен:

$$a_1 = R(1) = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} s(n)s(n-1)}{\sum_{n=0}^{N-2} s^2(n)} \quad (1)$$

где  $s(n)$  - отсчеты анализируемого сигнала,  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$  порядковый номер отсчета,  $N$  - длина кадра анализа.

Из формулы (1) непосредственно следует, что первый коэффициент линейного предсказания представляет собой нормированный коэффициент корреляции с единичной задержкой, обозначенный в формуле (1) как  $R(1)$ . Длина кадра анализа  $N$  определяется длительностью стационарного интервала звука и обычно невелика. Оценка значения  $R(1)$  при малых  $N$ , не требует большого количества вычислений и может быть выполнена в реальном масштабе времени. Возможность выполнить оценку общих характеристик сигнала по виду наклона его спектра при малом времени вычислений является существенным достоинством такого метода оценки.

В качестве примера рассмотрим возможность применения нормированного коэффициента корреляции  $R(1)$  в качестве признака, позволяющего принять решение о принадлежности звуков речевого сигнала к вокализированным или шумным звукам и к паузе. Речевой сигнал представляет последовательность звуков с различным источником возбуждения и, соответственно, с различным типом спектра, зависящим от источника возбуждения [1, 2]. Основные типы этих звуков: вокализированные (голосовой источник), шумные (шумовой источник близкий к бе-

лomu шуму), взрывные, образующиеся в момент резкого исчезновения смычки внутри речеобразующего тракта [1, 2].

Голосовой источник имеет квазипериодический характер и большую энергию. Спектр голосового источника имеет спад в сторону высоких частот со скоростью примерно 6 дБ/окт. Энергия шумового источника обычно меньше, его спектр в основном смещен с небольшим подъемом в сторону высоких частот. Сигнал на паузе смычки в существенной мере определяется окружающим шумом, нестационарен по своей природе и не может характеризоваться определенным набором параметров.

На рис.1а показана осциллограмма произнесения слова «четыре». В этом произнесении первая гласная /e/ редуцирована. Интервал между марками 2-3 соответствует шумовому источнику (аффриката /ч/), интервал между марками 3-4 - пауза смычки фонемы /т/, интервал между марками 4-5 - голосовой источник (остальные фонемы произнесения). На рис.1б представлены значения коэффициента корреляции с единичной задержкой, масштабированные следующим образом:

$$R_n(1) = k(1 + R(1)), \quad (2)$$

где  $k = 50$  – нормирующий множитель.

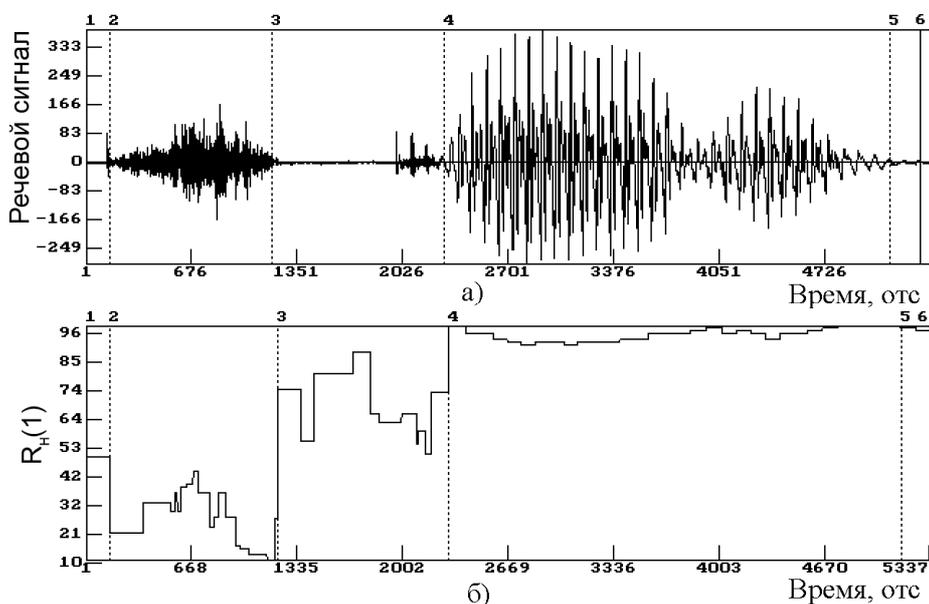


Рисунок 1 – Осциллограмма слова «четыре» (а) и нормированный коэффициент корреляции с единичной задержкой (б)

На рис. 1, б тональный и шумовой участки можно надежно разделить по зна-

чениям функции  $R_n(1)$ . Значения функции  $R_n(1)$  на паузе (между марками 3-4) близки к значениям  $R_n(1)$  тонального сегмента, что подтверждает вывод о низкой надежности данного признака на интервалах паузы, сделанный в работе [10].

Для лучшего разделения паузы и вокализованного сигнала по  $R_n(1)$  было решено приблизить характеристики сигнала на интервалах паузы к характеристикам шипящих согласных. Это можно сделать, если добавить к речевому сигналу аддитивный шум определенного уровня. К уровню аддитивного шума предъявляются противоречивые требования. Во-первых, аддитивный шум должен иметь достаточно высокий уровень с тем, чтобы скомпенсировать влияние нестабильностей окружающего шума. Во-вторых, аддитивный шум не должен оказывать существенное воздействие на тональные сигналы. Использовался аддитивный шум с равномерным распределением.

На рис. 2 показаны результаты вычислений признака  $R_n(1)$  для сигнала, показанного на рис. 1, а, к которому добавлен аддитивный шум с равномерным распределением. Как и ожидалось, добавление шума заметно стабилизировало значения признака  $R_n(1)$  на интервалах паузы. Эти значения расположились между значениями  $R_n(1)$ , соответствующими интервалам голосового и шумового источника, которые практически не изменились.

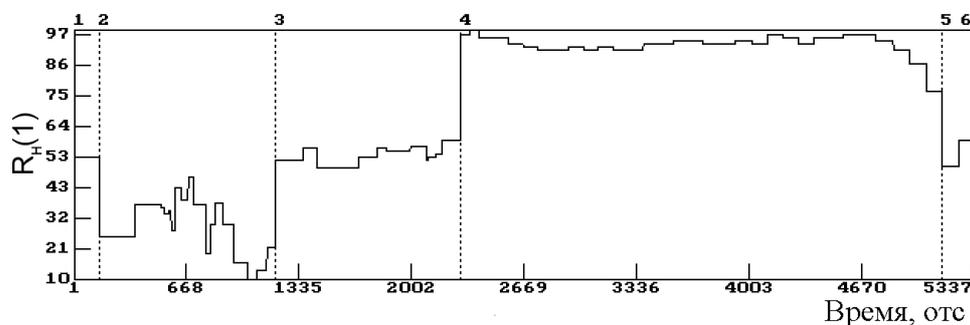


Рисунок 2 – Нормированный коэффициент корреляции с единичной задержкой для сигнала с добавленным шумом

Для определения оптимальных значений уровня аддитивного шума проведены следующие эксперименты. В качестве речевого материала брали по одному произнесению фраз «Не видали мы такого невода», «Саша кусал сало», «На ухабе» и «Жирные сазаны ушли под палубу». В экспериментах принимали участие 12 дикторов (6 мужчин и 6 женщин). Первоначально все фразы были вручную сегментированы на тональные и не тональные сегменты. К каждому произнесению добавляли

шум интенсивностью от 0 до 100 уровней квантования (нулевая интенсивность соответствует отсутствию шума).

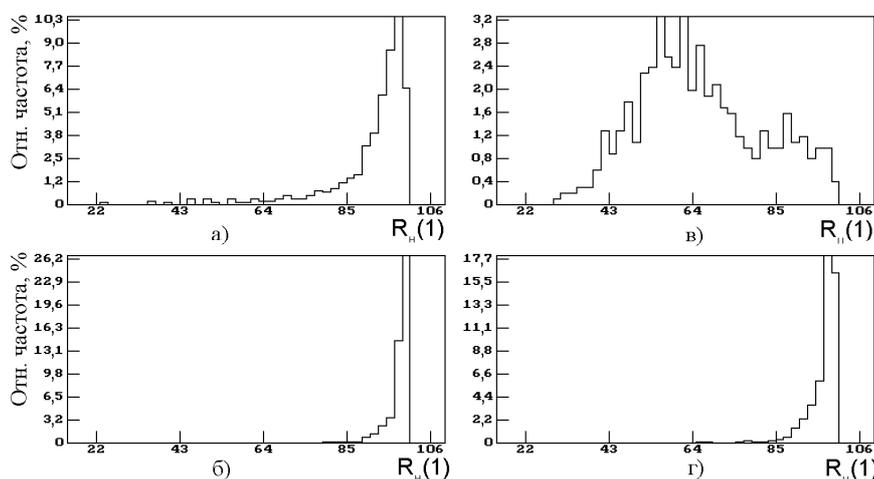


Рисунок 3 – Гистограммы распределений нормированного коэффициента корреляции с единичной задержкой: а) невокализированные интервалы без аддитивного шума; б) вокализированные интервалы без аддитивного шума; в) невокализированные интервалы с аддитивным шумом; г) вокализированные интервалы с аддитивным шумом

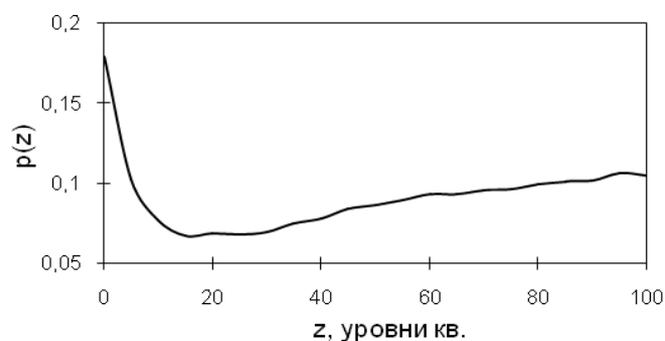


Рисунок 4 – Зависимость вероятности суммарной ошибки классификации от уровня аддитивного шума

Все фразы были промаркированы и разбиты на кадры анализа синхронные с импульсами возбуждения речевого тракта. Для вокализированных и невокализированных сегментов из значений признака  $R_n(1)$  составили по две выборки: с аддитивным и без аддитивного шума. По результатам испытаний построены гистограммы, показанные на рис. 3, где видно, что гистограмма вокализированных сегментов изменилась незначительно. Гистограмма невокализированных сегментов претерпе-

ла существенные изменения, став более широкой, причем среднее значение признака  $R_n(1)$  сместилось влево.

С целью оценки уровня добавляемого шума по результатам описанных выше экспериментов определяли вероятность суммарной ошибки классификации  $p(z)$  на вокализированные и невокализированные интервалы при разном уровне шума  $Z$ . Результаты испытаний показаны на рис. 4. Вероятность ошибки классификации при добавлении шума достигала минимальных значений в диапазоне уровней добавляемого шума от 15 до 30 уровней квантования.

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили эффективность использования нормированного коэффициента корреляции с единичной задержкой в качестве эффективной меры типа случайного сигнала. Показано, что путем добавления нормированных количеств случайного сигнала с известным наклоном спектра можно корректировать результаты распознавания типа сигнала, поступившего на вход системы анализа.

#### Список литературы

1. Сапожков М.А. Речевой сигнал в кибернетике и связи. М.: Связь, 1963. 452 с.
2. Кодзасов С.В., Кривнова О.Ф. Общая фонетика. М: Изд-во РГГУ, 2001. 592 с.
3. Архипов И.О., Гитлин В.Б., Лузин Д.А. Синхронный с основным тоном двухпроходной алгоритм принятия решения ТОН-НЕ ТОН // Вестник ИжГТУ. 2008. № 4. С. 150–153.
4. Архипов И.О. Разработка критериев и алгоритмов сегментации речевого сигнала на участки «ТОН/НЕ ТОН» для метода выделения основного тона в информационно-измерительных системах речевой технологии: Автореф. дис... канд. техн. наук (05.11.16). Ижевск, 2000. 20 с.
5. Sondhi M.M., Schmidt C.E., Rabiner L.R. Improving the Quality of Noisy Speech Signal // Bell Syst. Tech Journ. 1981. Vol. 60. № 8. P. 1847–1858.
6. Ramirez J., Gorriz J.M., Segura J.C. Voice Activity Detection/ Fundamentals and Speech Recognition System Robustness // Robust Speech Recognition and Understanding / Book edited by M. Grimm and K. Kroschel. Vienna (Austria): I-Tech, 2007. (ISBN 987-3-90213-08-0).
7. Горбань И.И. Феонмен статистической устойчивости. Киев: Наукова Думка, 2014. 445 с.
8. Маркел Д.Д., Грэй А.Х. Линейное предсказание речи. М.: Связь, 1980. 308 с.
9. Рабинер Л.Р., Шаффер Р.В. Цифровая обработки речевых сигналов: Пер. с англ. /Под ред. М.В. Назарова. М.: Радио и связь, 1981. 496 с.
10. Atal B.S., Rabiner L.R. A pattern recognition approach to voiced-unvoiced-silence classification with application to speech recognition // IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Process. 1976. Vol. 24. № 3. P. 201–202.

**А.В. Коробейников**, кандидат технических наук  
Камский институт гуманитарных инженерных технологий

### ТРЕХМЕРНЫЕ ЦЕЛОЧИСЛЕННЫЕ ВЕЙВЛЕТЫ ХААРА

*Предложен целочисленный вариант трехмерных вейвлетов Хаара, позволяющий сократить объем хранимых данных без потери информации.*

*It proposes a three-dimensional version of the integer wavelet Haar-lyayuschy make it possible to reduce the amount of stored data without loss of information.*

**Ключевые слова:** сжатие без потерь, вейвлет Хаара, трехмерные данные, целочисленная обработка.

**Keywords:** lossless compression, Haar wavelet, three-dimensional data, whole-numerical processing.

В предыдущих работах авторов был предложен метод межканальной декорреляции для произвольного числа каналов при сжатии без потерь многоканальных сигналов [1], который был уточнен в работе [2]. В работе [3] показана связь формул межканальной декорреляции с вейвлетами Хаара для одномерных и двумерных сигналов, а также предложены целочисленные варианты одномерного и двумерного вейвлетов Хаара, снижающие объем хранимых данных. В работе [4] двумерный целочисленный вейвлет Хаара применен для сжатия изображений.

В данной работе рассмотренный ранее подход развивается для трехмерных целочисленных вейвлетов Хаара. Многомерные вейвлеты не являются новыми и рассматриваются, например, в [5...7]. Однако, предложенный целочисленный вариант позволяет сократить объем хранимых данных без потери информации.

**Межканальная декорреляция, гарантирующая восстановление.** Формулы межканальной декорреляции для произвольного числа каналов многоканального сигнала предложены в работах [1, 2]:

$$c_i = x_1 - x_i$$
$$c_1 = x_1 - \text{ОКРУГЛ}\left(\frac{1}{n} \sum_{i=2}^n c_i\right) = x_1 - z_1 \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ; \quad (1)$$

где  $i$  – номер канала,  $n$  – число каналов,  $x_i$  – значение исходного канала сигнала,  $c_i$  – значение канала производного от исходных,  $z_1$  – поправка для канала  $x_1$ , «ОКРУГЛ»

– операция округления.

Формулы для восстановления исходных значений каналов [1, 2]:

$$x_1 = c_1 + \text{ОКРУГЛ}\left(\frac{1}{n} \sum_{i=2}^n c_i\right) = c_1 + z_1 \quad (2)$$

$$x_i = x_1 - c_i$$

В формулах введено обозначение  $z_1$  для части формулы, чтобы показать, что в формулы кодирования и декодирования входит одно и тоже выражение. С учетом введения  $z_1$  кодирование и декодирование представляют собой операции сложения и вычитания, которые не приводят к потере информации. Таким образом, гарантируется восстановление исходных значений без потерь.

### Одномерные целочисленные вейвлеты Хаара

Рассмотрим сигнал  $X^1 = (x_1, x_2)$  и его одномерный (1D) целочисленный вейвлет Хаара  $W^1 = (s, r)$  [3], который совпадает с уточненными формулами межканальной декорреляции двухканального сигнала  $\tilde{X} = (x_1, x_2)^T$  [2]:

$$s = c_1 = x_1 - \text{ОКРУГЛ}(c_2 / 2) \approx (x_1 + x_2) / 2$$

$$r = c_2 = x_1 - x_2 \quad ; \quad (3)$$

где  $x_i$  – значение исходного сигнала;  $c_i$  – результат межканальной декорреляции;  $s, r$  – результат целочисленного вейвлет-преобразования Хаара.

Представим зависимости (3) в более удобном для чтения виде:

$$s = (+1, +1); r = (+1, -1). \quad (4)$$

### Двумерные целочисленные вейвлеты Хаара

Рассмотрим межканальную декорреляцию многоканального сигнала с числом каналов  $n=4$   $\tilde{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$  [2]:

$$c_2 = x_1 - x_2$$

$$c_3 = x_1 - x_3$$

$$c_4 = x_1 - x_4$$

$$c_1 = x_1 - \text{ОКРУГЛ}\left(\frac{1}{4} \sum_{i=2}^4 c_i\right) = x_1 - z_1 \approx \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_i \quad (5)$$

Для двумерного вейвлет-преобразования  $W^2 = \begin{pmatrix} a, h \\ v, d \end{pmatrix}$  для фрагмента изо-

бражения (двухмерного сигнала,  $2D$ )  $X^2 = \begin{pmatrix} x_1, x_2 \\ x_3, x_4 \end{pmatrix}$  предложены следующие формулы [3, 4]:

$$\begin{aligned} a &= c_1 \\ h &= x_1 + x_2 - x_3 - x_4; \\ v &= x_1 - x_2 + x_3 - x_4; \\ d &= x_1 - x_2 - x_3 + x_4 \end{aligned} \quad (6)$$

где  $a$  – среднее значение;  $h$  – характеризуют горизонтальные полосы;  $v$  – вертикальные полосы;  $d$  – диагональные полосы.

Представим зависимости (6) в более удобном для чтения виде:

$$a = \begin{pmatrix} +1, +1 \\ +1, +1 \end{pmatrix}; \quad h = \begin{pmatrix} +1, +1 \\ -1, -1 \end{pmatrix}; \quad v = \begin{pmatrix} +1, -1 \\ +1, -1 \end{pmatrix}; \quad d = \begin{pmatrix} +1, -1 \\ -1, +1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Отметим, что эти двумерные схемы можно получить из одномерных схем (4):

$$a = \begin{pmatrix} +s^T, +s^T \end{pmatrix}; \quad h = \begin{pmatrix} +r^T, +r^T \end{pmatrix}; \quad v = \begin{pmatrix} +s^T, -s^T \end{pmatrix}; \quad d = \begin{pmatrix} +r^T, -r^T \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Из формул (5, 6) получим:

$$\begin{aligned} v &= c_2 - c_3 + c_4 \\ d &= c_3 - c_4 + c_2. \\ h &= c_4 - c_2 + c_3 \end{aligned} \quad (9)$$

Если попарно сложить строки формулы (6), то получим формулы, по которым можно восстановить  $c_2 \dots c_4$ :

$$\begin{aligned} h + v &= 2(x_1 - x_4) = 2c_4 \\ v + d &= 2(x_1 - x_2) = 2c_2. \\ d + h &= 2(x_1 - x_3) = 2c_3 \end{aligned} \quad (10)$$

Для уменьшения объема информации выразим из формул (10)  $v$  и  $h$ :

$$\begin{aligned} v &= -d + 2c_2 \\ h &= -d + 2c_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Затем получим:

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \text{ОКРУГЛ}(v/2) = -\text{ОКРУГЛ}(d/2) + c_2 \\ \bar{h} &= \text{ОКРУГЛ}(h/2) = -\text{ОКРУГЛ}(d/2) + c_3. \end{aligned} \quad (12)$$

Результатом целочисленного вейвлет-преобразования являются значения  $W^2 = \begin{pmatrix} a, \bar{h} \\ \bar{v}, d \end{pmatrix}$ , которые имеют коэффициенты относительно значений [6, 7];

$$\begin{pmatrix} 1/4, 1/2 \\ 1/2, 1 \end{pmatrix}.$$

Для восстановления значений  $c_2 \dots c_4$  используют формулы, полученные из формул (9, 12):

$$\begin{aligned} c_2 &= \bar{v} + \text{ОКРУГЛ}(d/2) \\ c_3 &= \bar{h} + \text{ОКРУГЛ}(d/2). \\ c_4 &= c_2 + c_3 - d \end{aligned} \quad (13)$$

Значение  $d$  нельзя разделить на 2, округлить и хранить в таком виде, так как выражение для восстановления  $c_4$  из формул (6, 10, 12) выглядит:

$$c_4 = \text{ОКРУГЛ}((h+v)/2) \neq \text{ОКРУГЛ}(h/2) + \text{ОКРУГЛ}(v/2) = \bar{h} + \bar{v}. \quad (14)$$

Таким образом, восстанавливать  $c_4$  необходимо по формуле (13).

### Трехмерные целочисленные вейвлеты Хаара

Рассмотрим межканальную декорреляцию многоканального сигнала с числом каналов  $n=8$ :  $\tilde{X} = (x_1 \dots x_8)^T$ . Уточненные формулы межканальной декорреляции [2]:

$$\begin{aligned} c_i &= x_1 - x_i \\ c_1 &= x_1 - \text{ОКРУГЛ}\left(\frac{1}{8} \sum_{i=2}^8 c_i\right) = x_1 - z_1 \approx \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_i. \end{aligned} \quad (15)$$

Для трехмерного (3D) сигнала  $X^3 = \left( \begin{pmatrix} x_1, x_2 \\ x_3, x_4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_5, x_6 \\ x_7, x_8 \end{pmatrix} \right)$  приведем схему для трехмерного целочисленного вейвлет-преобразования Хаара  $W^3$ :

$$W^3 = \left( \left( \begin{matrix} [+a+a], [+h+h] \\ [+v+v], [+d+d] \end{matrix} \right), \left( \begin{matrix} [+a-a], [+h-h] \\ [+v-v], [+d-d] \end{matrix} \right) \right). \quad (16)$$

Рассмотрим схему для каждого значения схемы (16) подробнее:

$$\begin{aligned} [+a+a] &= \left( \begin{pmatrix} +1, +1 \\ +1, +1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} +1, +1 \\ +1, +1 \end{pmatrix} \right); [+a-a] = \left( \begin{pmatrix} +1, +1 \\ +1, +1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1, -1 \\ -1, -1 \end{pmatrix} \right); \\ [+h+h] &= \left( \begin{pmatrix} +1, +1 \\ -1, -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} +1, +1 \\ -1, -1 \end{pmatrix} \right); [+h-h] = \left( \begin{pmatrix} +1, +1 \\ -1, -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1, -1 \\ +1, +1 \end{pmatrix} \right); \\ [+v+v] &= \left( \begin{pmatrix} +1, -1 \\ +1, -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} +1, -1 \\ +1, -1 \end{pmatrix} \right); [+v-v] = \left( \begin{pmatrix} +1, -1 \\ +1, -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1, +1 \\ -1, +1 \end{pmatrix} \right); \end{aligned}$$

$$[+d+d] = \left( \left( \begin{matrix} +1, -1 \\ -1, +1 \end{matrix} \right), \left( \begin{matrix} +1, -1 \\ -1, +1 \end{matrix} \right) \right); [+d-d] = \left( \left( \begin{matrix} +1, -1 \\ -1, +1 \end{matrix} \right), \left( \begin{matrix} -1, +1 \\ +1, -1 \end{matrix} \right) \right). \quad (17)$$

На основе схемы (17) получим конкретные формулы:

$$\begin{aligned} [+a+a] &= c_1 \\ [+a-a] &= x_1 + x_2 + x_3 + x_4 - x_5 - x_6 - x_7 - x_8 \\ [+h+h] &= x_1 + x_2 - x_3 - x_4 + x_5 + x_6 - x_7 - x_8 \\ [+h-h] &= x_1 + x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - x_6 + x_7 + x_8 \\ [+v+v] &= x_1 - x_2 + x_3 - x_4 + x_5 - x_6 + x_7 - x_8 \\ [+v-v] &= x_1 - x_2 + x_3 - x_4 - x_5 + x_6 - x_7 + x_8 \\ [+d+d] &= x_1 - x_2 - x_3 + x_4 + x_5 - x_6 - x_7 + x_8 \\ [+d-d] &= x_1 - x_2 - x_3 + x_4 - x_5 + x_6 + x_7 - x_8 \end{aligned} \quad (18)$$

Из формул (15), (18) получим:

$$\begin{aligned} [+a-a] &= -c_2 - c_3 - c_4 + c_5 + c_6 + c_7 + c_8 \\ [+h+h] &= -c_2 + c_3 + c_4 - c_5 - c_6 + c_7 + c_8 \\ [+h-h] &= -c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_6 - c_7 - c_8 \\ [+v+v] &= +c_2 - c_3 + c_4 - c_5 + c_6 - c_7 + c_8 \\ [+v-v] &= +c_2 - c_3 + c_4 + c_5 - c_6 + c_7 - c_8 \\ [+d+d] &= +c_2 + c_3 - c_4 - c_5 + c_6 + c_7 - c_8 \\ [+d-d] &= +c_2 + c_3 - c_4 + c_5 - c_6 - c_7 + c_8 \end{aligned} \quad (19)$$

Для уменьшения объема информации используем из формулы (19):

$$\begin{aligned} [+v+v] &= -[+v-v] - [+d+d] - [+d-d] + 4c_2 \\ [+h+h] &= -[+h-h] - [+d+d] - [+d-d] + 4c_3 \\ [+a-a] &= -[+h-h] - [+v-v] - [+d-d] + 4c_5 \\ [+v-v] &= -[+d-d] + 2(c_2 + c_5 - c_6) \\ [+h-h] &= -[+d-d] + 2(c_3 + c_5 - c_7) \\ [+d+d] &= -[+d-d] + 2(c_2 + c_3 - c_4) \end{aligned} \quad (20)$$

Затем получим:

$$\begin{aligned} [+v\bar{v} + \bar{v}v] &= ОКРУГЛ([+v+v]/4) = -ОКРУГЛ((+[v-v] + [+d+d] + [+d-d])/4) + c_2 \\ [+h\bar{h} + \bar{h}h] &= ОКРУГЛ([+h+h]/4) = -ОКРУГЛ((+[h-h] + [+d+d] + [+d-d])/4) + c_3 \\ [+a\bar{a} - \bar{a}a] &= ОКРУГЛ([+a-a]/4) = -ОКРУГЛ((+[h-h] + [+v-v] + [+d-d])/4) + c_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[+\bar{v} - \bar{v}] &= \text{ОКРУГЛ}([+v - v]/2) = -\text{ОКРУГЛ}([+d - d]/2) + (c_2 + c_5 - c_6) \\
[+\bar{h} - \bar{h}] &= \text{ОКРУГЛ}([+h - h]/2) = -\text{ОКРУГЛ}([+d - d]/2) + (c_3 + c_5 - c_7) . \quad (21) \\
[+\bar{d} + \bar{d}] &= \text{ОКРУГЛ}([+d + d]/2) = -\text{ОКРУГЛ}([+d - d]/2) + (c_2 + c_3 - c_4)
\end{aligned}$$

Результатом целочисленного вейвлет-преобразования являются значения

$$W^3 = \left( \left( \begin{array}{c} [+a + a], [+h + h] \\ [+v + v], [+d + d] \end{array} \right), \left( \begin{array}{c} [+a - a], [+h - h] \\ [+v - v], [+d - d] \end{array} \right) \right), \text{ которые имеют коэффициенты}$$

$$\text{относительно значений [17]: } \left( \begin{array}{c} (1/2, 1/4, 1/4) \\ (1/4, 1/2) \end{array} \right), \left( \begin{array}{c} (1/4, 1/2) \\ (1/2, 1) \end{array} \right).$$

Для восстановления значений  $c_2 \dots c_8$  используют формулы, полученные из формул (19, 21):

$$\begin{aligned}
c_2 &= [+v + v] + \text{ОКРУГЛ}((+[v - v] + [+d + d] + [+d - d])/4) \\
c_3 &= [+h + h] + \text{ОКРУГЛ}((+[h - h] + [+d + d] + [+d - d])/4) \\
c_5 &= [+a - a] + \text{ОКРУГЛ}((+[h - h] + [+v - v] + [+d - d])/4) \\
c_4 &= -\text{ОКРУГЛ}([+d - d]/2) + (c_2 + c_3) - [+d + d] \\
c_6 &= -\text{ОКРУГЛ}([+d - d]/2) + (c_2 + c_5) - [+v - v] \\
c_7 &= -\text{ОКРУГЛ}([+d - d]/2) + (c_3 + c_5) + [+h - h] \\
c_8 &= -c_2 - c_3 + c_4 - c_5 + c_6 + c_7 + [+d - d]. \quad (22)
\end{aligned}$$

### Выводы

1. Предложены формулы связи межканальной декорреляции с трехмерными целочисленными вейвлетами Хаара.

2. Предложена модификация формул вычисления целочисленных трехмерными вейвлетов Хаара, снижающая объем хранимых данных без потери информации.

3. Данный подход может быть развит на четырехмерные (4D) вейвлеты Хаара, однако, этот класс данных редко используется, и формулы будут громоздкими.

### Список литературы

1. Франченко Р.С., Коробейников А.В. Межканальная декорреляция для произвольного числа каналов при сжатии без потерь многоканальных сигналов // Вестник ИжГТУ. 2010. №1. С. 87-88.

2. Коробейников А.В., Франченко Р.С. Уточнение формул межканальной декорреляции сигналов // Информационные системы в промышленности и образовании: Сборник трудов молодых ученых. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011. С. 43-44.

3. Коробейников А.В., Франченко Р.С. Уточнение связи формул межканальной декор-

реляции сигналов с вейвлетами Хаара // Информационные системы в промышленности и образовании: Сборник трудов молодых ученых. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011. С. 44-47.

4. *Смирнов В.С., Коробейников А.В.* Сжатие изображений без потери качества на основе целочисленных вейвлетов Хаара // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 2. С. 158-160.

5. *Смоленцев Н.К.* Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MatLab. М.: ДМК Пресс, 2005. 304 с.

6. *Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А.* Вейвлеты и их использование // УФН. 2001. Т. 171. № 5. С. 465–501. DOI: 10.3367/UFNr.0171.200105a.0465.

7. *Чобану М., Волков М.* Цифровая обработка многомерных сигналов: предпосылки прорыва // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2007. № 3. С. 64-74.

Подписано в печать 25.01.2014. Формат 60×84/16.  
Гарнитура Minion Pro. Усл. печ. л. 3,4. Уч.-изд. л. 3,1.  
Тираж 300 экз. Заказ № 597.

Редакционно-издательский отдел  
Камского института гуманитарных и инженерных технологий  
426003, г. Ижевск, ул. Вадима Сивкова, 12 А.