

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

<b>Онучин А.Л., Сердобинцев С.П.</b> Автоматизированный комплекс перевалки высоковязких нефтепродуктов .....	3
<b>Шевцов А.А., Дранников А.В., Бритиков Д.А.</b> Концепция моделирования максимально прибыльных технологий сушки зерна в плотном подвижном слое .....	7
<b>Садыков С.С., Ткачук М.И., Сафиулова И.А.</b> Система автоматизации обработки и анализа эхокардиографических снимков .....	10
<b>Егорушкин Е.О.</b> Нейросетевой метод неразрушающего контроля качества материалов ячеистой структуры .....	18

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<b>Ветров А.Н.</b> Программный комплекс для исследования адаптивной среды автоматизированного обучения на основе когнитивных моделей .....	20
<b>Степанов Л.В.</b> Применение нейронных сетей для моделирования совершенной конкуренции .....	33
<b>Лучкин Н.А., Янишевская А.Г.</b> Создание системы автоматизированного проектирования технологического процесса транспортировки газа .....	39
<b>Аникеев Е.А., Щекалев Д.В.</b> Моделирование переходной кривой криволинейного участка дороги без круговой вставки .....	45

### ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов .....	47
-----------------------------	----

## CONTENTS

### AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION

<b>Onuchin A.L., Serdobintsev S.P.</b> Transshipment automatic complex for high-viscosity oil products .....	3
<b>Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Britikov D.A.</b> Modeling conception of the maximum profitable technology for grain drying in the compact mobile layer .....	7
<b>Sadykov S.S., Tkachuk M.I., Safiulova I.A.</b> Automation system for processing and analysis of the echocardiographic pictures .....	10
<b>Egorushkin E.O.</b> Neural network method for material quality nondestructive control of the cellular structure .....	18

### MODERN TECHNOLOGIES

<b>Vetrov A.N.</b> Programm complex for research of the adaptive surroundings in the automatic teaching from a cognitive models .....	20
<b>Stepanov L.V.</b> Neural network application for perfect competition modeling .....	33
<b>Luchkin N.A., Yanishevskaya A.G.</b> Automatic designing system creature of the gas transportation technological process .....	39
<b>Anikeev E.A., Shchekalev D.V.</b> Modeling of the transition curve for curvilinear road section without circular insertion ...	45

### SURVEY OF PERIODICALS

Periodicals review .....	47
--------------------------	----

**Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Роспечать» — 70537, по каталогу «Пресса России» — 27838, по «Каталогу российской прессы «Почта России» — 60267) или непосредственно в издательстве по факсу (499) 269 4897, по e-mail realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок (499) 269 6600, 269 5298**

Художественный редактор *Галицына Т.Н.*  
Компьютерный набор *Путилов В.Н.*  
Компьютерная верстка *Тугаринов А.А.*

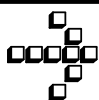
Сдано в набор 30.08.10. Подписано в печать 27.09.10.  
Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 5,88. Уч. изд. л. 6,9. Заказ 785. Цена свободная

Набрано в ФГУ «Научно-исследовательский институт —  
Республиканский исследовательский  
научно-консультационный центр экспертизы»  
123995, Москва, ул. Антонова-Овсеенко, 13.Тел.: (499) 795 1789

Отпечатано в ООО «Подольская Периодика»  
142110, Московская обл., г. Подольск,  
ул. Кирова, 15

**Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация и современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация и современные технологии» обязательна.  
За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель**

**ООО «Издательство Машиностроение»,  
«Автоматизация и современные технологии», 2010 г.**



УДК 658.012.011.56

А.Л. Онучин, С.П. Сердобинцев, д-р техн. наук, проф.  
(Калининградский государственный технический университет)  
Alexandr@ostrovnet.ru

### АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ПЕРЕВАЛКИ ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

*Рассмотрена структура автоматизированного управления мазутным терминалом. Выявлены пути оптимизации управления терминалом и предложены технические решения по построению автоматизированного комплекса.*

**Ключевые слова:** мазут, нефтебаза, автоматизированное управление, высоковязкие нефтепродукты, разогрев, железнодорожная эстакада.

*Automatic control structure of the black oil terminal is considered. Control optimization directions of the terminal are indicated and technical decisions for automatic complex construction are proposed.*

**Key words:** black oil petroleum storage depot, automatic control, high-viscosity oil products, reheating, railroad pier.

Перевалочные терминалы нефтепродуктов и нефтебазы являются важной составной частью современной транспортной системы энергоносителей.

Ниже рассмотрены пути повышения эффективности и надёжности функционирования процесса перевалки высоковязких нефтепродуктов на примере мазутного терминала.

Основными технологическими элементами мазутного терминала (рис. 1) являются железнодорожная эстакада, насосная станция, теплообменники, котельная, резервуарный парк, наливное устройство танкера.

На терминал мазут поступает в железнодорожных цистернах, а сливается через нижнюю горловину устройства сливного нижнего (УСН) разрушением застывшего мазута струёй, формируемой гидромонитором УСН.

При пуске системы трубопроводы заполняются мазутом из резервуарного парка. Мазут прокачивается насосной станцией через теплообменники. Температура мазута повышается теплоносителем, подаваемым из котельной. Разогретый до заданной температуры мазут циркулирует по контуру «насосная станция – теплообменники» и частично направляется в УСН железнодорожной эстакады на размыв холодного мазута в цистернах [1].

В существующих системах нестабильность процесса слива, вызванная возможностью закупори-

вания сливного трубопровода, приводит к необходимости уменьшать давление мазута, подаваемого на гидромонитор, что увеличивает продолжительность процесса слива [2]. Повышение давления ведёт к закупориванию сливного трубопровода и аварийной остановке всего терминала. Решение проблемы закупоривания сливного трубопровода [3] позволит увеличить скорость извлечения мазута из железнодорожной цистерны более чем в 2 раза.

Разогретый мазут, сливаемый из железнодорожной цистерны, направляется на хранение в резервуарный парк. Температура в резервуарах поддерживается в течение всего времени хранения мазута. Для этого в резервуарах контролируется температура мазута и осуществляется его прокачивание через теплообменники при понижении температуры ниже заданного значения.

При наличии в резервуарном парке количества мазута, достаточного для заполнения танкера, производится отгрузка. Учёт массы и параметров мазута осуществляется узлом учёта на основе кориолисовых расходомеров.

Исходя из функционального назначения и территориального распределения, выделены следующие подсистемы автоматизированного мазутного терминала: железнодорожная эстакада, насосная станция, теплообменники, котельная, резервуарный парк, причал, диспетчерская.

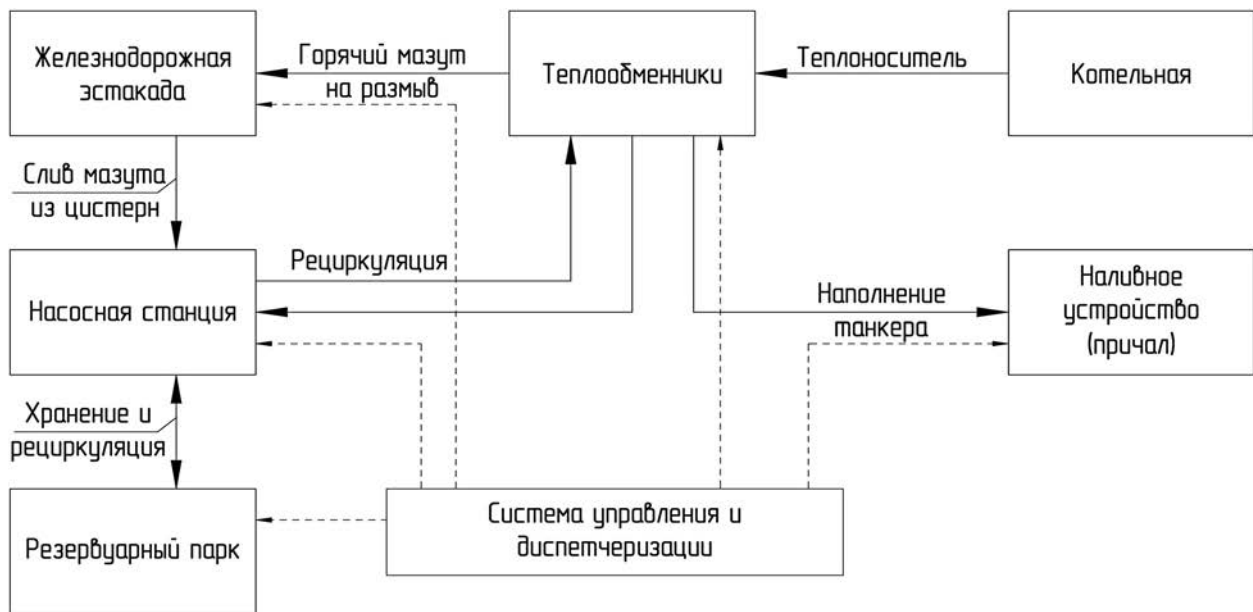


Рис. 1. Структурная схема мазутного терминала

Для управления мазутным терминалом использована двухуровневая система управления, верхним уровнем которой является автоматизированное рабочее место (АРМ) диспетчера. На нижнем уровне применена распределённая система полевых контроллеров. Преимущество такой структуры – повышение надёжности функционирования и оперативность управления.

Контроллеры нижнего уровня предназначены для сбора, первичной обработки и передачи информации на АРМ, а также отработки необходимых технологических блокировок и нештатных ситуаций. Каждый контроллер с датчиками и регуляторами является подсистемой автоматизированного комплекса и может работать автономно при неисправностях в других контроллерах и сети. В данной работе применялись контроллеры ХС200 фирмы «Moeller» (Германия), содержащие промышленный интерфейс Ethernet и интегрированный web-сервер.

Задачи выбора алгоритма функционирования, сбора и обработки статистической информации и формирования управляющих сигналов настройки регуляторов возлагаются на АРМ. Все подсистемы управления объединены сетью Ethernet и подключены к АРМ, в состав которого входит панельный компьютер с сенсорным экраном iROBO-5000, устройством записи архивной информации (CD-ROM) и вывода параметров на печать. АРМ подключено к общей компьютерной сети предприятия и предоставляет информацию о текущем функциони-

ровании терминала руководящему персоналу и программам автоматизации документооборота (1С-Предприятие).

Упрощённая функциональная схема автоматизации мазутного терминала представлена на рис. 2.

Управление мазутным терминалом осуществляется в соответствии со следующим алгоритмом.

Технологические трубопроводы заполняются из резервуара 1 при открытии клапана 2. Мазут перекачивается насосом 3 через теплообменник 4.

При подходе очередной железнодорожной цистерны 5 подключается УСН 6. Управление подачей мазута в гидромонитор 7 и измерение параметров мазута осуществляются полевым контроллером. АРМ на основе информации о контролируемых параметрах изменяет режимы работы подсистемы слива мазута.

После подключения УСН открывается задвижка 8, и мазут поступает на гидромонитор 7. В цистерне 5 разрушается застывший мазут струёй из гидромонитора с последующим перемешиванием и плавлением отколовшихся фрагментов. Двухфазная смесь мазута поступает в сливной трубопровод 9.

При увеличении давления мазута в гидромониторе растёт вероятность попадания в сливной трубопровод нерасплавленных фрагментов [3], диаметр и количество которых являются случайными величинами и зависят от давления мазута на входе гидромонитора.

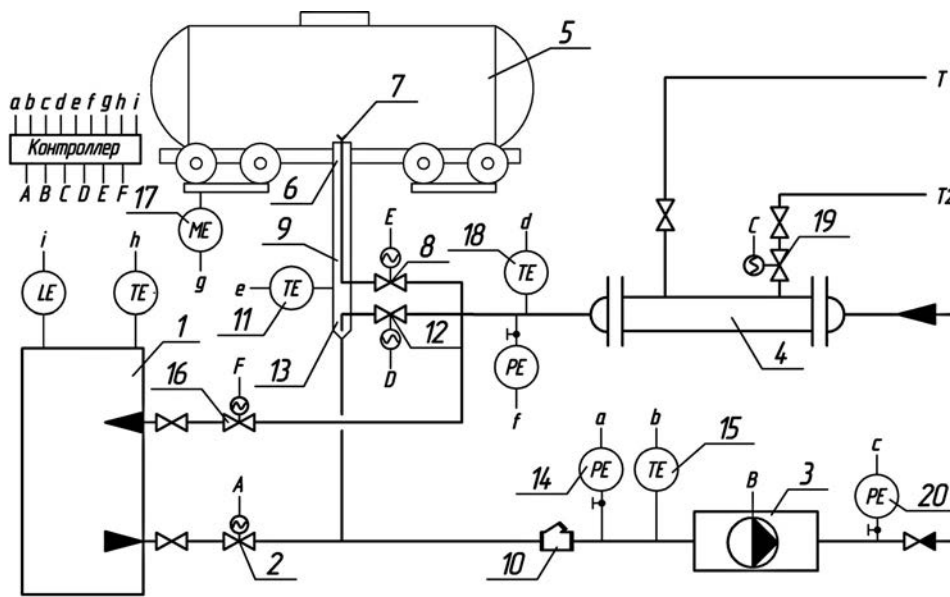


Рис. 2. Функциональная схема автоматизации мазутного терминала:

TE, PE, LE, ME – преобразователи измерения температуры, давления, уровня мазута массы цистерны соответственно

Фрагменты нерасплавленного продукта накапливаются в фильтре грубой очистки 10 [4]. Концентрация нерасплавленных фрагментов в двухфазной смеси продукта зависит от разности температуры смеси, измеряемой датчиком 11, и температуры мазута, достаточной для устойчивой работы установки. Понижение средней температуры сливаемого мазута приводит к увеличению количества поступающих фрагментов и заполнению фильтра.

Для прогнозирования наполняемости фильтра используется значение интеграла разности температуры сливаемого мазута и заданного значения температуры, при которой обеспечивается устойчивая работа сливного устройства [5]. В алгоритме управления, представленном на рис. 3, интеграл заменяется интегральной суммой, с уменьшением которой увеличивается угол открытия клапана 12 (см. рис. 2), направляющего мазут в эжектор 13 [6]. При падении давления, измеряемого датчиком 14, на входе насоса 3 корректируется заданное значение температуры и пересчитывается интегральная сумма. При продолжающемся падении давления ниже критического значения закрывается клапан 8 и открывается клапан 12.

Расход мазута, подаваемого в гидромонитор (клапан 8), регулируется по его температуре на входе в насос (датчик 15). Расход мазута, отводимого в резервуар (клапан 16), увеличивается при росте температуры и давления на входе насоса. Слив прекращается по сигналу датчика массы цистерны 17.

Температура мазута на выходе теплообменника регулируется контроллером по показаниям датчика 18. Подача теплоносителя изменяется по сигналам контроллера клапаном 19.

Работа насосной станции автоматизирована с учётом необходимости поддержания заданного давления на входе теплообменника, измеряемого датчиком 20, и обеспечения защиты насосов. На каждом насосе установлен датчик, контролирующий наличие мазута в трубопроводе и используемый для защиты насосов от «сухого» хода. Для поддержания давления в напорном трубопроводе применяется привод с частотным регулированием, позволяющий снизить энергозатраты на перекачивание и регулирование давления на выходе насоса. Пуск подсистемы перекачивания и установка параметров, определяющих её функционирование, производится с АРМ в автоматическом или автоматизированном режиме.

Рассмотренная автоматизированная система управления опробована при создании нефтебазы 33-СРЗ г. Балтийска Калининградской области. Система является свободно расширяемой в отношении подключения к полевой шине как новых датчиков, так и новых контроллеров, что позволяет расширять и модернизировать систему без дополнительных затрат на изменения уже функционирующих элементов.

Применение автоматизированного комплекса позволяет увеличить производительность терминала перевалки высоковязких нефтепродуктов на 40 %, повысить экономичность и надёжность нефтебазы.

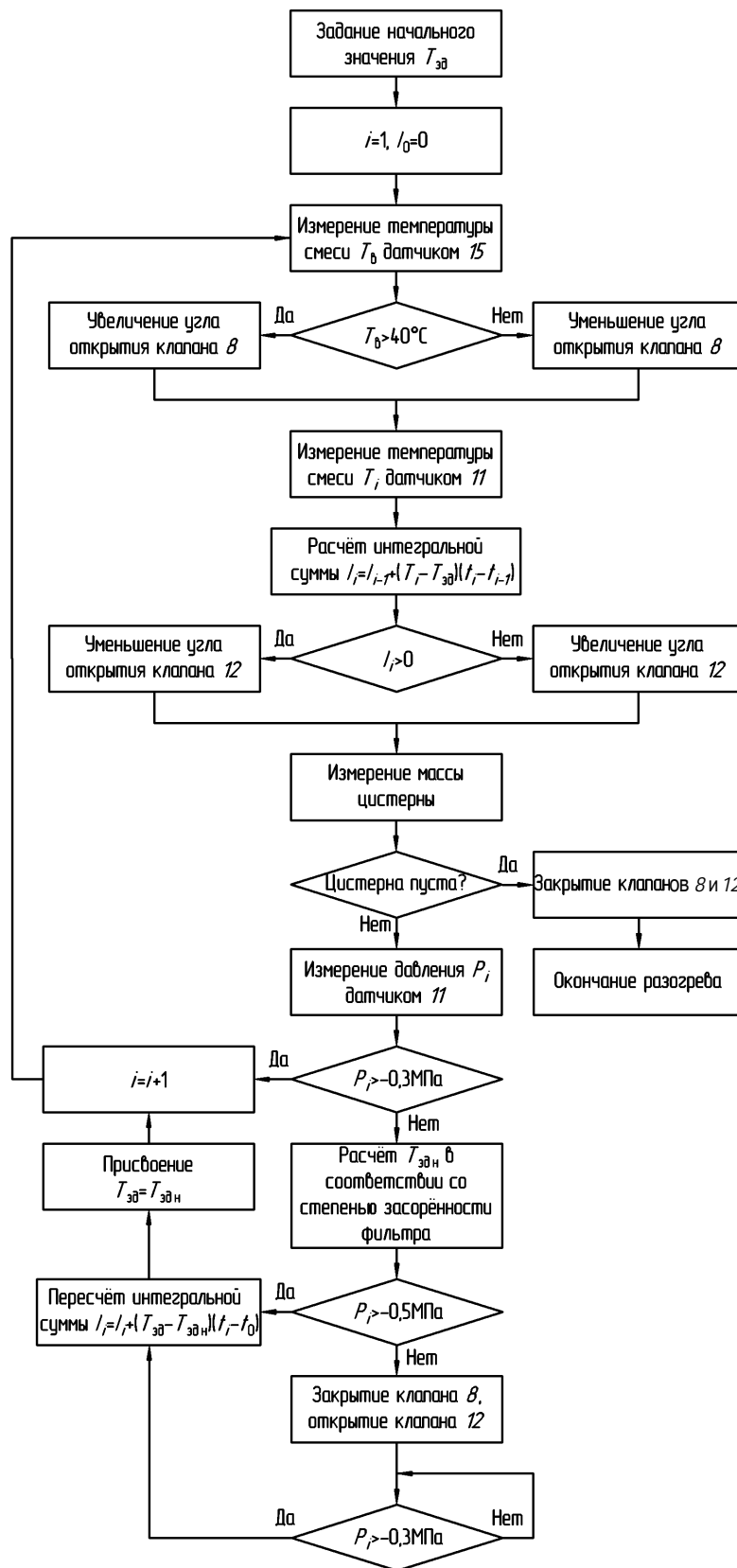


Рис. 3. Алгоритм размыва мазута в цистерне:

$T_{зд}$  – опорное значение температуры;  $i$  – порядковый индекс;  $I_0$  – начальное значение интегральной суммы;  $T_b$  – температура мазута на входе насоса;  $T_i$  – температура сливаемой смеси;  $I$  – рассчитываемая интегральная сумма;  $t$  – время, прошедшее от начала работы алгоритма;  $P_i$  – давление мазута на входе насоса;  $T_{зд.н}$  – рассчитанное опорное значение температуры

**Библиографические ссылки**

1. Назмеев Ю.Г. Мазутные хозяйства ТЭС. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 612 с.
2. Слёзкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гос. изд-во тех.-теорет. литературы, 1955. 520 с.
3. Онучин А.Л., Сердобинцев С.П. Совершенствование автоматизации мазутного терминала // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 9. С. 7–10.

4. Жужиков В.А. Фильтрация, теория и практика разделения суспензий. М.: Химия, 1971. 440 с.
5. Онучин А.Л., Сердобинцев С.П. Автоматизированное устройство для слива высоковязких продуктов из ёмкости // Патент России № 85457. 2009. Бюл. № 22.
6. Онучин А.Л., Сердобинцев С.П. Способ управления процессом слива высоковязких продуктов из ёмкости // Патент России № 2307780. 2006. Бюл. № 28.

УДК 664.723

А.А. Шевцов, д-р техн. наук, проф., А.В. Дранников, канд. техн. наук, доц.,  
Д.А. Бритиков, канд. техн. наук. (Воронежская государственная технологическая академия)

drannikov@list.ru

### КОНЦЕПЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНО ПРИБЫЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СУШКИ ЗЕРНА В ПЛОТНОМ ПОДВИЖНОМ СЛОЕ

*Сформулирована концепция моделирования максимально прибыльных технологий сушки зерна в плотном подвижном слое на основе достижения компромисса между наиболее важными технико-экономическими показателями.*

**Ключевые слова:** сушка, зерно, модель, оптимальный режим.

*Modeling conception of the maximum profitable technology for grain drying in the compact mobile layer is formulated from a compromise advance between the most significant technical and economical indicators.*

**Key words:** drying, grain, model, optimum conditions.

Повышение эффективности сушки зерна основано на методологии системного подхода. Методами математического моделирования решаются такие логически взаимосвязанные задачи, как обоснование рациональной совокупности системообразующих элементов технологии и промышленная реализация оптимальных режимов сушки [1, 2].

Предлагается концептуальный подход к созданию максимально прибыльных технологий сушки зерна в плотном подвижном слое. В качестве наиболее важных технико-экономических показателей приняты: максимальный объём высушенного зерна (производительность), минимальные материальные и энергетические затраты на процесс сушки при соблюдении ограничений на качество сухого зерна.

В качестве функции цели (критерия оптимизации) использована средняя по времени прибыль, получаемая за высушенный продукт. При этом из объёма высушенного продукта в единицу времени (в стоимостном выражении) вычитались материальные и эксплуатационные затраты на его производство:

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{\Pi_{\text{п}} F}{\lambda \tau_k} \int_0^{H(\tau_k)} \rho(\tau_k, y) dy - \frac{\Pi_{\text{т}} F}{Q_{\text{н}}^p \tau_k} \times \\ & \times \int_0^{\tau_k} \frac{\rho_{\text{са}}(\tau, y) \omega(\tau, 0) c_p^{\text{са}} (T_{\text{са}}(\tau, 0) - T_{\text{са}}^*)}{\eta_m(\tau_k)} d\tau - \\ & - \frac{k_3 \Pi_3 F}{\tau_k} \int_0^{\tau_k} \frac{\omega(\tau, 0) P(\tau)}{\eta_3^e(\tau) \eta_3^k(\tau)} d\tau, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Pi_{\text{п}}$ ,  $\Pi_{\text{т}}$ ,  $\Pi_3$  – цена высушенного продукта, топлива, электроэнергии соответственно;  $\tau_k$  – время сушки;  $F$  – площадь сечения сушильной камеры;  $\rho(\tau_k, y)$  – насыпная плотность продукта в конце сушки;  $y$  – координата по высоте слоя;  $H(\tau_k)$  – высота слоя в конце сушки;  $\lambda$  – коэффициент потерь;  $Q_{\text{н}}^p$  – теплота сгорания топлива;  $\rho_{\text{са}}(\tau_k, y)$  – плотность сушильного агента;  $\omega(\tau, 0)$  – линейная скорость сушильного агента на входе в слой зерна;  $c_p^{\text{са}}$  – изобарная теплоёмкость сушильного агента;  $T_{\text{са}}(\tau, 0)$ ,  $T_{\text{са}}^*$  – температура сушильного агента на входе в слой продукта и перед калорифером соответственно;  $\eta_k(\tau_k)$  – суммарный КПД топки и теплопередающих устройств;

$k_3$  – коэффициент перевода механической энергии потока сушильного агента в электрическую энергию электропривода вентилятора;  $P(\tau)$  – давление, развиваемое вентилятором;  $\eta_3^g(\tau)$ ,  $\eta_3^k(\tau)$  – КПД вентилятора и компрессора для сушильных установок, работающих в замкнутом цикле по сушильному агенту с использованием теплонасосной установки для осушения.

Оптимальный режим сушки с точки зрения критерия (1) рассматривался как разработка математического описания процесса сушки в таком объёме, который позволил исключить из выражения целевой функции переменные величины, выразив их варьируемыми и постоянными режимными параметрами. При этом использовался феноменологический подход к физическим явлениям [3], основанный на законах сохранения энергии с возможностью использования экспериментальных данных.

Насыпную плотность продукта определяли из условия материального баланса в пересчёте по сухим веществам в зерне:

$$\rho(\tau, y) = (1 - \varepsilon(0))H_0 \left( 1 - \frac{W(\tau, 0)}{100 - W(\tau, 0)} \right) \rho^0 \times \\ \times (1 + \beta W(\tau, y)) / \int_0^{H(\tau)} (1 + \beta W(\tau, y)) \times \\ \times \left( 1 - \frac{W(\tau, y)}{100 - W(\tau, y)} \right) dy, \quad (2)$$

где  $\varepsilon(0)$  – начальная порозность слоя зерна;  $H_0$  – начальная высота слоя;  $W(\tau, 0)$ ,  $W(\tau, y)$  – начальная и текущая влажность зерна (в пересчёте по сухим веществам);  $\rho^0$  – плотность абсолютно сухого продукта;  $\beta$  – коэффициент пропорциональности.

Далее определяли изменение высоты слоя зерна во времени с учётом его усадки:

$$H(\tau) = \gamma H_0 \frac{1}{W(\tau, 0)} \left( \left( 1 - \frac{\tau}{\tau_k} \right)^f W(\tau, 0) + \right. \\ \left. + \left( \frac{\tau}{\tau_k} \right)^f W_k \right) + (1 - \tau)H_0, \quad (3)$$

где  $W_k$  – конечная влажность продукта;  $\gamma$  – усадка слоя;  $\tau$  – текущее время;  $f > 1$  – некоторая постоянная, определяемая экспериментально.

Для сушильного агента использовали уравнение материального баланса по влаге:

$$\frac{d\rho_{ca}(\tau, y)}{d\tau} = \frac{d(\rho_{ca}(\tau, y) \omega(\tau, y))}{dy} - \\ - \frac{d\left( \frac{W(\tau, y)}{100 + W(\tau, y)} \rho(\tau, y) \right)}{d\tau}, \quad (4)$$

где  $\omega(\tau, y)$  – скорость сушильного агента в слое зерна.

Уравнение теплового баланса для сушильного агента можно записать в виде [4]

$$\frac{d(\rho_{ca}(\tau, y) c_p^{ca} T_{ca}(\tau, y))}{d\tau} = \\ = \frac{d(\rho_{ca}(\tau, y) c_p^{ca} \omega(\tau, y) T_{ca}(\tau, y))}{dy} - \alpha_v (T_{ca}(\tau, y)) - \\ - c_p^n T_n \frac{d\left( \frac{W(\tau, y)}{100 + W(\tau, y)} \rho(\tau, y) \right)}{d\tau}, \quad (5)$$

где  $T_{ca}(\tau, y)$  – текущая температура сушильного агента;  $c_p^n$  – изобарная теплоёмкость продукта;  $\alpha_v$  – теплоёмкость пара;  $T_n$  – температура испарения.

Уравнение теплового баланса для продукта представлено в виде

$$\frac{d(\rho(\tau, y) - c_p^n(\tau, y) T_n(\tau, y))}{d\tau} = \alpha_v (T_{ca}(\tau, y)) - \\ - T_n(\tau, y) - r \frac{d\left( \frac{W(\tau, T_{ca}, \omega, y)}{100 + W(\tau, T_{ca}, \omega, y)} \rho(\tau, y) \right)}{d\tau}, \quad (6)$$

где  $T_n(\tau, y)$  – текущая температура продукта;  $r$  – теплота парообразования.

Уравнение баланса энергии записано на основе первого закона термодинамики [4, 5]:

$$dQ + (P_1/p_1 - P_2/p_2) dG = dl + dl_{тр} + (z_2 - z_1) dG + \\ + (U_2 - U_1) dG + \left( \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2g} \right) dG, \quad (7)$$

где  $dQ$  – подведённое количество тепла;  $(P_1/p_1 - P_2/p_2) dG$  – энергия приращения давления;  $dl$  и  $dl_{тр}$  – энергия, расходуемая газом на выполнение технической работы и работы на преодоление сил трения;  $(z_2 - z_1) dG$  – приращение потенциальной энергии;  $(U_2 - U_1) dG$  – приращение внутренней энергии;  $((\omega_2^2 - \omega_1^2) / 2g) dG$  – приращение кинетической энергии.

Требуемое давление, развиваемое вентилятором, определяли с учётом аэродинамического сопротивления слоя зерна и потерь давления в местных сопротивлениях по формуле:

$$P_H = a \int_0^{H(\tau)} (\omega(\tau, y))^{1,5} dy + (\lambda^* l / d + \sum \xi^*) \rho_{ca} \times (\tau, y) \omega^2(\tau, 0) / 2, \tag{8}$$

где  $\lambda^*$  – коэффициент сопротивления воздухопроводов;  $l$  – длина воздухопроводов;  $d$  – внутренний диаметр воздухопроводов;  $\xi^*$  – коэффициент местных сопротивлений.

Приток (отток) тепла к сушильному агенту за время  $dt$  осуществлялся теплообменом между сушильным агентом и слоем зерна, а также теплом испарившейся из него влаги:

$$dQ = \left\{ -\alpha_v (T_{ca}(\tau, y) - T_n(\tau, y)) - c_p^n T_n \frac{d\left(\frac{W(\tau, y)}{100 + W(\tau, y)}\right)}{d\tau} \right\} \frac{dy}{\omega(\tau, y)} dV, \tag{9}$$

где  $dy/\omega(\tau, y) = dt$ ;  $dV$  – объёмный расход сушильного агента.

После ряда преобразований получено

$$\frac{d\omega}{dy} = \left\{ -\alpha_v (T_{ca}(\tau, y) - T_n(\tau, y)) - c_p^n T_n \times \right. \\ \left. \times d\left(\frac{W(\tau, y)}{100 + W(\tau, y)}\right) / d\tau \right\} / \omega^2(\tau, y) \rho_{ca}(\tau, y) A - \\ - \frac{a(\omega(\tau, y))^{1,5}}{A\omega(\tau, y)\rho_{ca}(\tau, y)} - \frac{g}{A\omega(\tau, y)} - \frac{c_v g}{A\omega(\tau, y)} \times \\ \times \frac{dT_{ca}(\tau, y)}{dy}, \tag{10}$$

где  $A$  и  $a$  – константы;  $c_v$  – теплоёмкость сушильного агента при постоянном объёме.

Достижение цели (1) связано с учётом конкретных условий, в которых должно быть принято оптимальное решение. Эти условия определяют совокупностью ограничений, фиксирующих область изменения переменных параметров про-

цесса сушки, характеризующих степень достижения некоторых подцелей.

Граничное условие  $\rho_{ca}(\tau, 0)$  для уравнения (4) определялось уравнением состояния идеального газа:

$$\rho_{ca}(\tau, 0) = \frac{P_{ca}}{RT_{ca}(\tau, 0)} = \frac{a \int_0^{H(\tau)} (\omega(\tau, y))^{1,5} dy}{RT_{ca}(\tau, 0)}, \tag{11}$$

где  $P_{ca}$  – давление сушильного агента;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Граничное условие уравнения (6), обеспечивающее необходимые биохимические превращения в продукте в процессе сушки, определялось выражением

$$T_n(\tau, y) = T_0 - \frac{q}{H(\tau)} \int_0^{H(\tau)} \frac{W(\tau, y)}{100 + W(\tau, y)} dy, \tag{12}$$

где  $T_0$  и  $q$  – постоянные коэффициенты.

Для уравнений (5) и (9) граничными условиями являлись управляющие воздействия:

$$T_{ca}(\tau) \Big|_{y=0} = T_0; \quad \omega(\tau) \Big|_{y=0} = \omega_0. \tag{13}$$

Таким образом, моделирование максимально прибыльных технологий сушки зерна в плотном подвижном слое представлено совокупностью функции цели (критерия оптимальности) (1), математическим описанием процесса сушки (2)–(10) и системой ограничений (11)–(13).

Выражение (1) позволяет комплексно учитывать наилучший компромисс между достижением разных подцелей на основании полезности взаимного соизмерения конечных результатов (качества и количества высушенного продукта) и их сопоставления с затратами ресурсов всех видов.

**Библиографические ссылки**

1. Шевцов А.А., Павлов И.О., Воронова Е.В., Тертычная Т.Н. Структурно-функциональный анализ технологической системы сушки и хранения зерна // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 9. С. 8–13.
2. Шевцов А.А., Дранников А.В., Бритиков Д.А., Тертычная Т.Н. Моделирование процесса сушки зерна в гравитационном подвижном слое шахтной зерносушилки // Известия вузов. Пищевая технология. 2009. № 5, 6. С. 81 – 84.
3. Остриков А.Н. Процессы и аппараты пищевых производств. СПб.: ГИОРД, 2007. 608 с.
4. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука. Ч. 1. 1987. 88 с.
5. Циборский Я. Основы процессов химической технологии. Пер. с польск. / Под ред. П.Г. Романкова. Л.: Химия, 1967. 719 с.



УДК 004.932.2

**С.С. Садыков**, д-р техн. наук, проф., **М.И. Ткачук**  
(Муромский институт, филиал Владимирского государственного университета),  
**И.А. Сафиулова**, канд. мед. наук (Железнодорожная больница, г. Муром),  
maxim.tkachuk@gmail.com

### СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЭХОКАРДИОГРАФИЧЕСКИХ СНИМКОВ

*Описана система автоматизированного анализа ультразвуковых снимков сердца. Предложена общая схема системы в соответствии с выдвинутыми требованиями, описаны основные модули и потоки информации. Приведено описание отдельных алгоритмов, реализованных в системе. Дана сравнительная оценка результатов исследований с результатами, полученными при использовании существующей технологии.*

**Ключевые слова:** обработка и анализ эхокардиографических снимков, система автоматизации, ультразвук.

*Automation system for heart ultrasonic pictures analysis is described. System general scheme in accordance with laid down demands is proposed, principal moduluses and information currents are described. Description of the separate algorithms that were realized is adduced. Comparative valuation of the research results with results that were received through the use of exist technology is given.*

**Key words:** processing and analysis of the echocardiographic pictures, automation systems, ultrasound.

**Введение.** В Европе отмечается самая большая в мире доля смертности, приходящаяся на неинфекционные болезни. Среди причин высокой смертности, по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), доминируют онкологические и сердечно-сосудистые болезни (ССБ). От ССБ в Европе умирают свыше четырёх миллионов человек ежегодно [1]. В России от сердечно-сосудистых заболеваний погибает один миллион человек в год, из которых 100 тыс. умирают в трудоспособном возрасте. Ещё 374 тыс. ежегодно становятся инвалидами вследствие этих заболеваний. Уменьшение заболеваемости ССБ занимает одно из приоритетных направлений в программе здравоохранения РФ. Благодаря реализации новой программы в 2008 г. в 12 субъектах РФ было создано 12 региональных сосудистых центров и 36 первичных сосудистых центров [2]. Также широко используются исследования и диагностика ССБ ультразвуковыми (УЗ) аппаратами фирм Philips, Medison и др. Эти установки позволяют получать УЗ снимки, что очень важно для визуальной оценки состояния сердца кардиологом. Кроме того, они дают возможность ведения архива исследований и подготовки отчётов, инструментарий для ручного выделения камер сердца и других фрагментов на снимке с автоматическим подсчётом их параметров.

Обследование может проводиться без нагрузки (время обследования от 5 до 10 мин с регистрацией от 25 до нескольких сотен снимков) и с нагрузкой (занимает порядка получаса, регистрируется от нескольких сотен до несколько тысяч

снимков). В качестве нагрузки используется электрокардиостимуляция, фармакологические пробы или физические упражнения [3–4]. Во время простого обследования врач измеряет основные параметры камер сердца на 2–4 снимках из общего числа зарегистрированных, оценивает кровоток, состояние митрального, трёхстворчатого, аортального клапанов. При обследовании с нагрузкой анализируется локальная сократимость стенок левого желудочка (ЛЖ) сердца, что позволяет диагностировать ишемическую болезнь сердца (ИБС) и жизнеспособность миокарда. Существуют различные виды снимков, которые можно получить меняя положение УЗ датчика. Основными позициями для диагностики ССБ являются парастеральные по длинной и короткой осям, двух- и четырёхкамерные апикальные [3]. В каждой позиции врач выбирает один-два кадра (снимка) и проводит подробный ручной анализ, выделяя необходимые элементы (камеры сердца, корень аорты и др.). Параметры выделенных фигур автоматически рассчитываются системой, после чего врач переносит их в отчёт или медицинскую карту. Остальные кадры не используются из-за ограниченного времени приёма, что приводит к потере большого объёма информации, который следовало бы использовать для более точной оценки состояния сердца, постановки диагноза, уменьшения субъективизма кардиолога.

Таким образом, построение компьютерных систем автоматизированной обработки и анализа УЗ снимков сердца актуально, поскольку это сможет обеспечить полный анализ всех снимков

обследования, получение новых данных об изменении параметров сердца от кадра к кадру, облегчить работу кардиолога, уменьшить время обследования и, наконец, самое главное, повысить точность и объективность результатов обследования и диагноза.

**Требования к системе.** Создаваемая система автоматизации обработки и анализа должна:

получать последовательность снимков от УЗ аппарата;

иметь подсистему предварительной обработки снимков, осуществляющую подавление помех, шума, увеличение контраста и т. д.;

позволять автоматически выделять камеры сердца – левый желудочек (ЛЖ), правый желудочек (ПЖ), левое предсердие (ЛП), правое предсердие (ПП);

автоматически рассчитывать необходимые для диагностики параметры выделенных фигур и сравнивать их с установленными нормами;

производить анализ локальной сократимости ЛЖ;

выявлять отклонения от нормы и информировать врача о них;

позволять вводить дополнительную информацию о пациенте;

сохранять полученную информацию в базе данных (БД) и формировать отчёты;

затрачивать минимум времени для обработки и анализа результатов обследования одного пациента.

**Структура и функции системы.** В соответствии с установленными выше требованиями на рис. 1 представлена общая схема системы, выделены основные блоки получения, преобразования и обработки информации.

Блоки 1–3 представляют собой аппаратные части, необходимые для проведения УЗ обследования и связи УЗ установки с обычным ПК, остальные соответствуют программным подсистемам. Ниже приведены их функции:

1 – УЗ датчик формирует сигнал, который отображается на дисплее аппарата;

2 – УЗ аппарат построен на базе современного ПК, позволяет с помощью специальной оболочки для операционной системы проводить интерактивные обследования, вести архив и подготавливать отчёты (кроме того, возможен экспорт данных с помощью специального формата DICOM по сети и через интерфейс S-Video);

3 – плата видеозахвата используется для получения видеопоследовательности УЗ кадров от аппарата (для экспорта кадров имеется интерфейс S-Video);

4 – драйвер на вход получает видеопоследовательность УЗ кадров через интерфейс S-Video, которую разбивает на отдельные кадры;

5 – подсистема улучшает качество изображений (подавление помех и шума, повышение контраста);

6 – подсистема обработки (ядро системы) выполняет автоматическое выделение камер сердца,

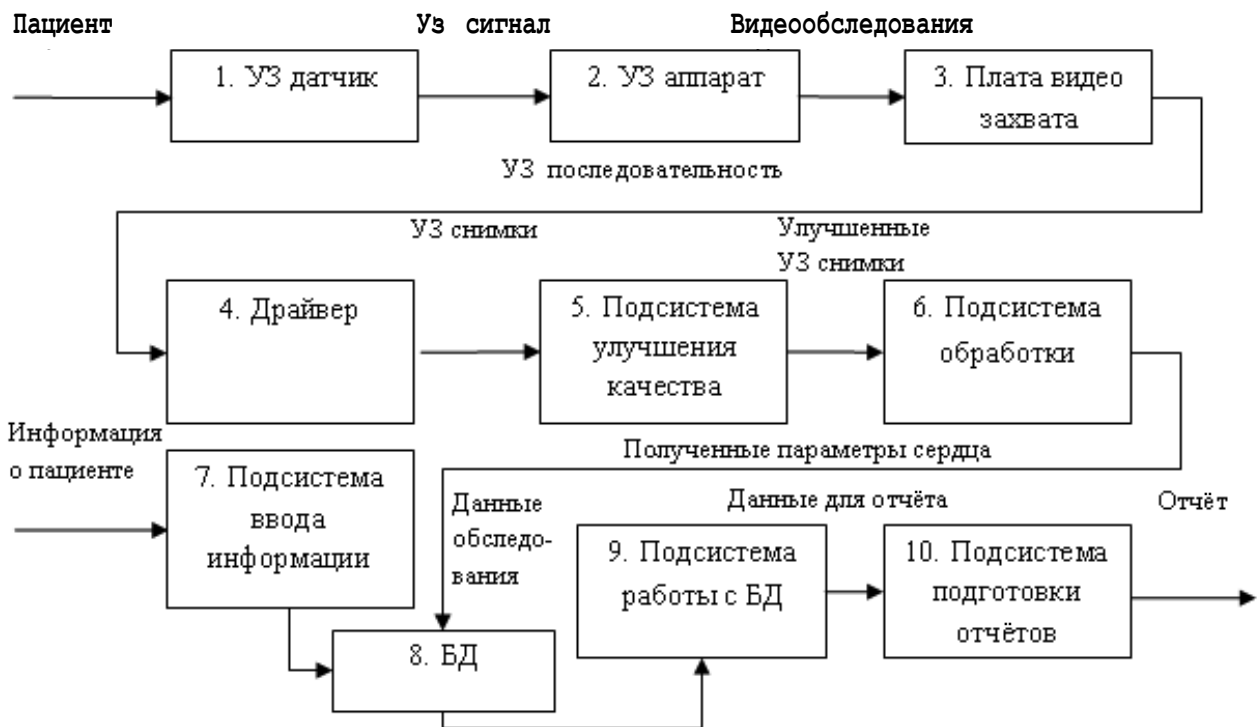


Рис. 1. Система автоматизации обработки и анализа ультразвуковых снимков сердца

рассчитывает их параметры, сравнивает с нормативными, хранящимися в справочниках БД, оценивает локальную сократимость ЛЖ;

7 – подсистема представляет собой набор форм ввода информации о пациенте (регистрационные данные), результаты анализа и т. д.;

8 – БД, в которой сохраняется введённая информация о пациенте и проведённых обследованиях (также в ней имеется набор справочников со значениями нормы);

9 – подсистема сохраняет и делает выборку данных из БД о пациенте и обследованиях;

10 – подсистема формирует отчёт о проведённом обследовании.

**Реализация компонентов системы.** Ниже приведён один из возможных вариантов реализации системы. В качестве УЗ аппарата используется Philips EnVisor С и датчик РА 4-2 картриджного типа секторный, для видеозахвата – плата Pinnacle.

Драйвер системы реализован в виде отдельного модуля. Его основной задачей является захват видеопоследовательности, которая разбивается на отдельные полутоновые восьмибитные изображения. Также подсистема выполняет ряд дополнительных функций – захват не всех кадров, ограничение времени захвата, ограничения по яркостным порогам, обрезка изображений.

Подсистема ввода информации реализована в виде форм для регистрации информации о пациенте, которая в дальнейшем сохраняется в БД. УЗ изображения часто являются малоконтрастными, на них присутствуют различного рода помехи. Для подавления шума используются фильтры Ли, Кауна и медианные фильтры [5]. Из известных методов повышения контраста лучшие результаты показал метод *распределения 2/3 степени*. Удаление помех описано в работе [6]. БД работает под управлением СУБД Firebird 2.1. На основе введённой информации и вычисленных параметров формируется отчёт об обследовании.

Рассмотрим обработку снимков в основных позициях в подсистеме обработки.

**Обработка снимков в апикальных позициях.** Алгоритм обработки изображений в данных позициях состоит из следующих шагов:

сегментация на основе текстурных признаков (получение бинарного изображения, которое обозначим через  $B$ );

получение бинарного изображения  $B$  на основе контурных преобразований;

определение границ ЛЖ на изображении  $B$ ;

выделение ЛЖ;

вычисление параметров ЛЖ.

**Сегментация.** Главной особенностью УЗ снимков сердца является малый контраст и нечётко выраженные контуры, поэтому сегментацию целесообразно проводить по большому количеству

признаков. В работе используются семь двумерных и три одномерных текстурных признака изображений. Вычисление текстурных признаков осуществляется на исходном изображении (обозначим его через  $A$ ). После вычисления каждая характеристика нормируется в пределах от 0 до 1. Затем подсчитывается сумма абсолютных отклонений признаков между точками, на основе которой их объединяют в области, тем самым формируя стенки ЛЖ:

$$N = \sum_{i=0}^{10} |f_i(j, k) - f_i(l, m)|,$$

где  $(j, k)$  и  $(l, m)$  – точки изображения с координатами  $j$  и  $k$ ,  $l$  и  $m$ ;  $f_i$  – текстурный признак точки.

После объединения точек в области выделяют граничные точки, которые считаются контурными; им присваивается значение  $b(x, y) = 1$ , остальным – 0. Таким образом, формируется бинарное изображение  $B$ .

**Определение границ ЛЖ.** После получения бинарного изображения  $B$  необходимо определить местоположение ЛЖ на УЗ снимке. Дана функция яркости исходного изображения  $Af(x, y)$ . В результате контурного преобразования определяется модуль вектора градиента  $G(x, y)$  [7]. Для его получения необходимо поочередно выполнить свёртку функции  $f(x, y)$  со следующими функциями-масками  $d_x(x, y)$ ,  $d_y(x, y)$ , значения которых рассчитывают следующим образом:

$$d_x(x, y) = -\frac{2x}{\sigma^2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}.$$

На основе полученного модуля градиента  $G$  формируется бинарное изображение  $B$ , а порог определяется как удвоенное среднее.

Для установления границ ЛЖ используется бинарное изображение  $B$ . Правая координата определяется следующим образом: в каждом столбце суммируют значения бинарного изображения  $B$ , столбец с максимальным значением справа от центра принимают за правую границу ЛЖ. Для вычисления левой координаты из значения правой границы вычитают 2/5 части ширины снимка. Верхняя координата берётся  $(30 \pm 20)$  пикселей, нижняя – на уровне 2/3 высоты изображения. Таким образом, получаем прямоугольник (обозначим его через  $\Pi$ ), в котором содержится ЛЖ.

**Выделение ЛЖ.** На изображении  $B$  строят прямоугольник  $\Pi$  по полученным ранее координатам и определяют его центр тяжести  $(X, Y)$ . Из центра

тяжести проводят лучи с интервалом в 1–10 градусов:

$$\begin{cases} x_0 = X - k \cos \alpha; \\ y_0 = Y - k \sin \alpha, \end{cases}$$

где  $(X, Y)$  – координаты центра;  $k = [0, M]$ ;  $\alpha$  – угол наклона луча; значение  $M$  устанавливается экспериментально, пока не встретится чёрная точка изображения  $B$   $b(x, y) = 1$ .

В результате получается набор пар координат точек  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_M, y_M)$ , которые соединяют путём построения выпуклой оболочки. Точки внутри выпуклой оболочки маркируют, и они являются точками ЛЖ.

**Вычисление параметров ЛЖ.** Основными параметрами являются площадь  $S$ , координаты центра тяжести  $(X_T, Y_T)$ , длина  $L$ , ширина  $H$ , объём  $V$ .

Длина ЛЖ  $L$  – максимально длинный отрезок, проведённый через ЦТ под углом (угол наклона отрезка длины на ось  $OX$ ), ширина  $H$  – отрезок, перпендикулярный длине  $L$  (рис. 2, *a*).

Для определения объёма существует *метод дисков*  $V_{МД}$  по взаимно перпендикулярным позициям и *метод площадь–длина*  $V_{МПД}$  [3]. В работе используется метод дисков:

$$V_{МД} = L \sum_{i=1}^{20} a_i^2 \pi / 80, \quad V_{МПД} = 0,85S^2 / L.$$

Далее определяют кадр, где ЛЖ имеет минимальный объём (систола), кадр, где ЛЖ имеет

максимальный объём (диастола), фракцию выброса ( $\PhiВ$ ) и полный цикл сокращения ЛЖ [3]. Под полным сокращением ЛЖ понимается последовательность из 20–25 кадров, начинающихся и заканчивающихся диастолой. Схема изменения параметров ЛЖ при полном сокращении показана на рис. 2, *б*.

$\PhiВ$ , которая является одной из важных характеристик оценки состояния сердца, вычисляется по формуле

$$\PhiВ = \frac{V_{до} - V_{со}}{V_{до}} 100\% ,$$

где  $V_{до}$  – диастолический объём ЛЖ;  $V_{со}$  – систолический объём ЛЖ.

Аналогичным образом определяют характеристики ПЖ, ЛП и ПП.

На рис. 3, *a* и *б* представлены два кадра, соответствующие систоле и диастоле. На рисунках выделен ЛЖ, разбитый на 20 дисков и построены его оси.

**Обработка снимков в позиции по длинной оси.** В позиции по длинной оси определяются оси ЛЖ, ПЖ, ЛП и аорты.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

- сегментация на основе текстурных признаков;
- получение бинарного изображения на основе проведённой сегментации (рис. 4, *б*);

- разбиение на секторы, соответствующие границам камер сердца и аорты (на рис. 4, *a* показан сектор, в котором находится ЛЖ);

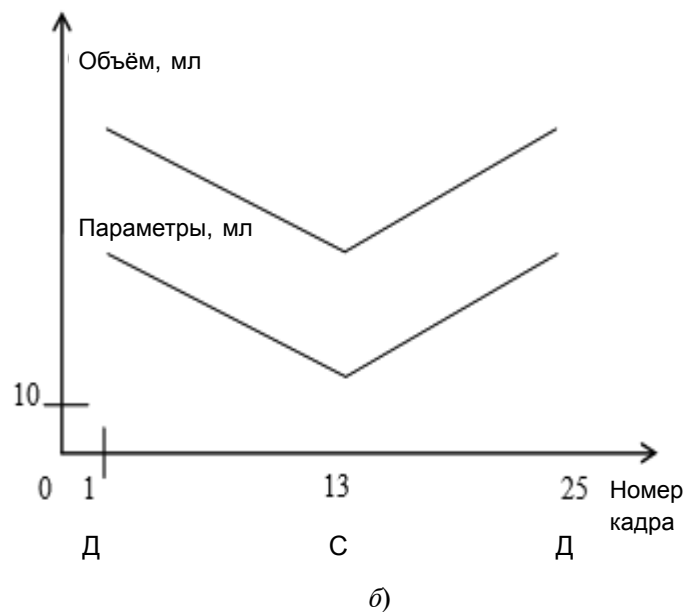
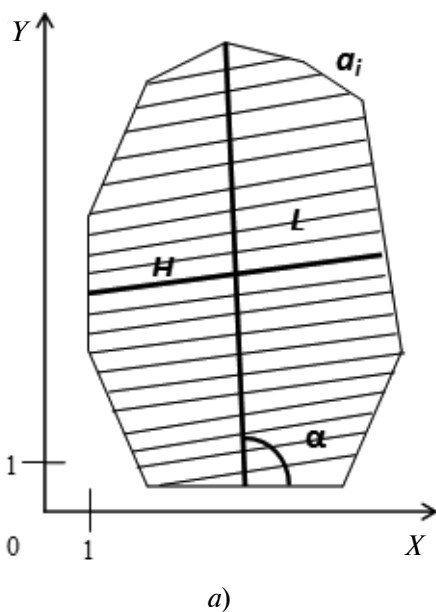
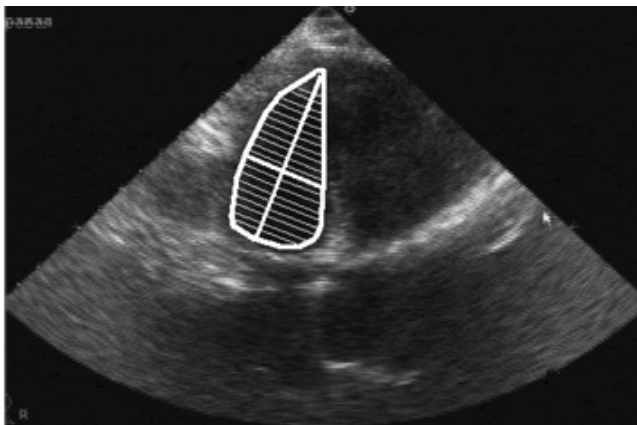
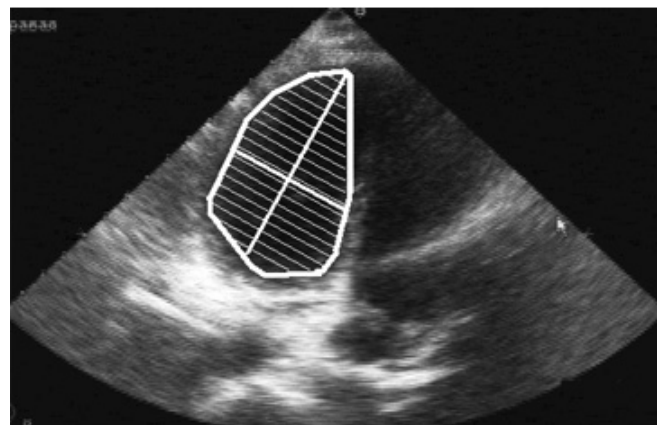


Рис. 2. Основные характеристики (*a*) и динамика изменения параметров (*б*) левого желудочка:

Д – диастола; С – систола



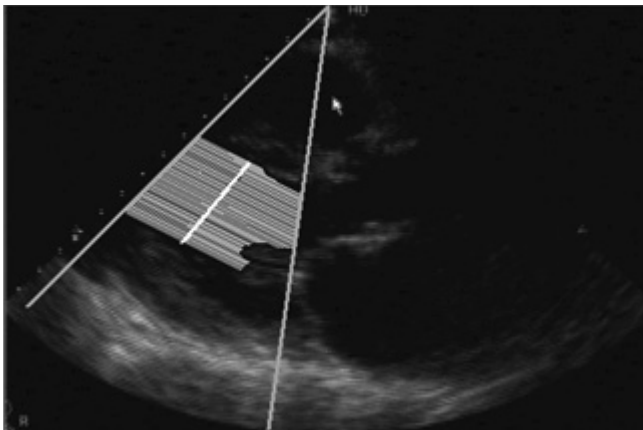
a)



б)

**Рис. 3. Результаты обработки снимков:**

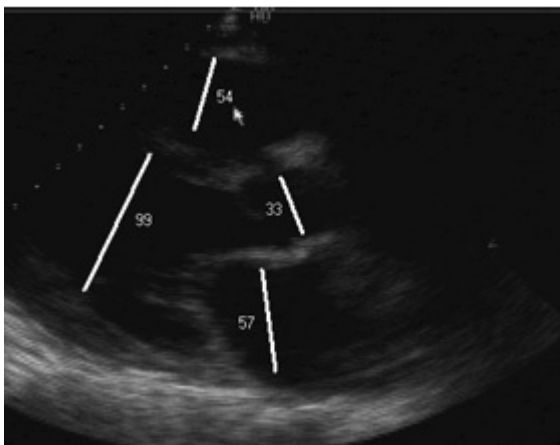
*a* – систола; *б* – диастола



a)



б)



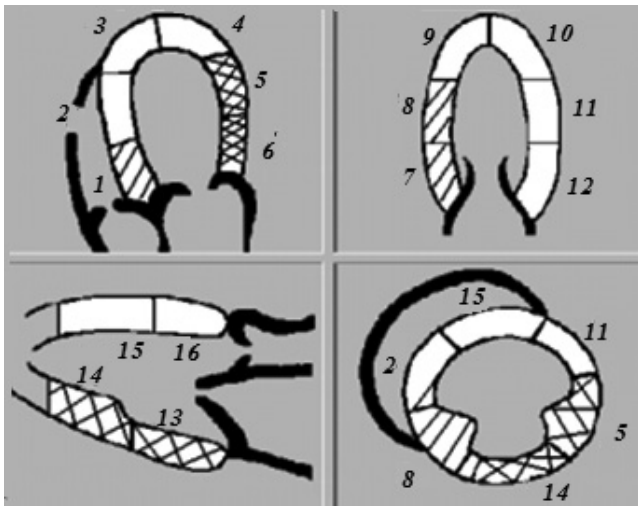
а)



а)

**Рис. 4. Результаты обработки снимков в позициях по длинной и короткой осям:**

*a* – разбиение изображения на секторы; *б* – бинарное изображение; *в* – результат построения осей; *г* – результат обработки в позиции по короткой оси



**Рис. 5. 16-сегментная модель сократимости:**

1–6 – сегменты в четырёхкамерной апикальной позиции; 7–12 – сегменты в двухкамерной апикальной позиции; 13–16 – сегменты в позиции по длинной оси (2, 5, 8, 11, 14, 15 – сегменты в позиции по короткой оси)

определение максимально широкой области в секторе;  
 построение осей (рис. 4, в).

В данной позиции диастола определяется кадром, на котором ось ЛЖ имеет максимальную

длину, систола – кадром с минимальной длиной оси ЛЖ.

Обработка снимков в позиции по короткой оси. В позиции по короткой оси ЛЖ аппроксимируется окружностью и для его выделения применяется интегральное преобразование по окружности:

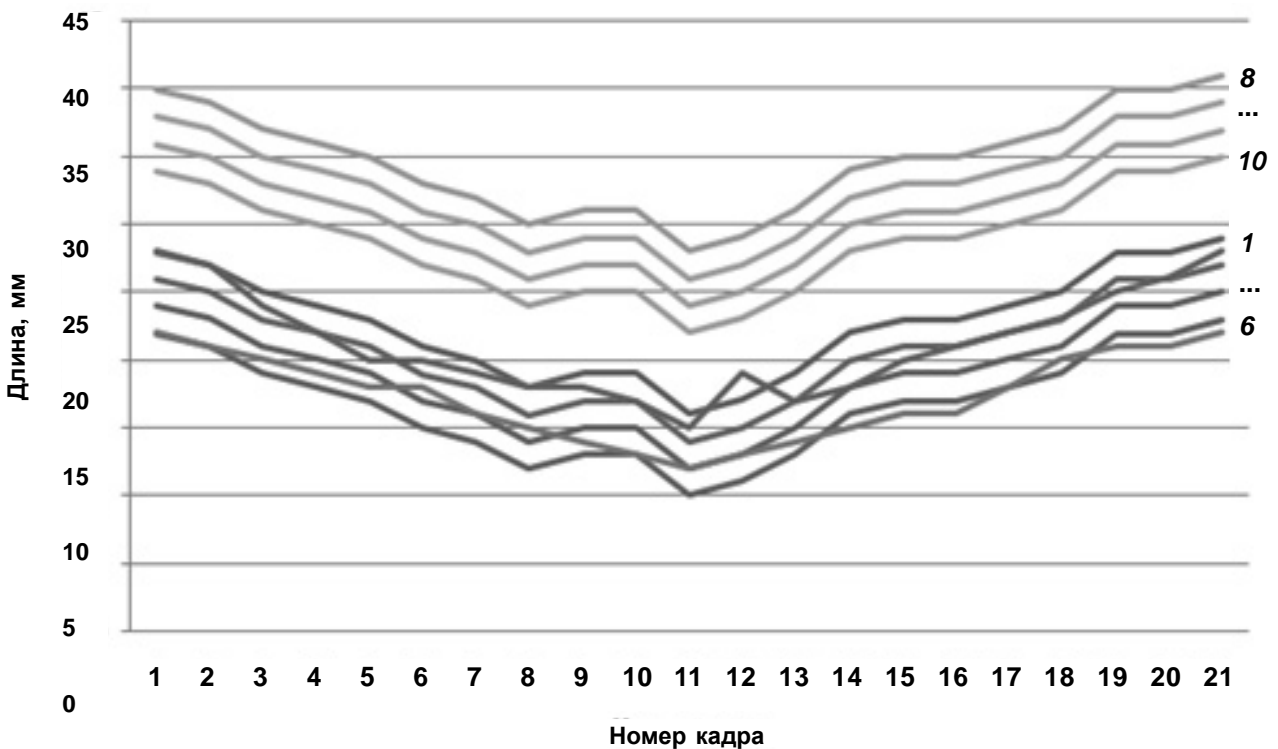
$$h(r, x_0, y_0) = \iint_{R^2} b(x, y) \delta [r \cos \Phi(x, y) + x - x_0] \delta [r \sin \Phi(x, y) + y - y_0] dx dy,$$

где  $h(r, x_0, y_0)$  – функция параметрического пространства, описывающая окружность с радиусом  $r$  и координатами центра  $(x_0, y_0)$ ;  $\Phi(x, y)$  – функция направления вектора градиента;  $b(x, y)$  – функция бинарного изображения.

Результат выделения представлен на рис. 4, г. Диастола определяется кадром, на котором радиус ЛЖ имеет максимальную длину, а систола – минимальную.

Анализ сократимости ЛЖ. Для анализа используется 16-сегментная модель сердца, суть которой заключается в делении ЛЖ в основных позициях на определённые сегменты (рис. 5).

Так, в апикальных позициях боковые стенки делятся на шесть сегментов, для исследования



**Рис. 6. Изменение длин дисков**

сократимости используется анализ изменения длин дисков: верхним и нижним сегментам соответствуют по шесть дисков, средним – восемь.

По короткой оси определяют отклонения координат центра окружности на кадрах от координат центра в диастоле. Если центр переместился в сторону сегментов 2, 5, 8, 11, 14 или 15), то считается, что в этом сегменте нарушена сократимость ЛЖ.

По длинной оси анализируют изменения длины ЛЖ и оценивают сократимость сегментов с 13 по 16.

**Сравнительная оценка результатов.** Ниже приведены результаты обработки последовательности УЗ снимков для апикальной четырёхкамерной позиции (два кадра приведены на рис. 2). Полу-

ченные значения параметров сравнивают с результатами ручной обработки и определяют отклонения в процентах, которые приведены в таблице.

Из таблицы видно, что результаты автоматической обработки имеют небольшие отклонения от ручного способа, который взят за основу. Отклонения по длине и ширине составляют в среднем 2,5 %, по объёму – 3,2 %, что считается допустимым. Диастоле соответствуют 1-й и 21-й кадры, систоле – 9-й кадр, фракция выброса равна 61 %. Изменения длины, ширины и объёма соответствуют предложенной схеме. Результаты таких расчётов по многим пациентам показали также небольшое отклонение автоматической технологии от ручной, которое в среднем составляет от 3 до 6,5 %.

**Результаты ручной и автоматической обработки последовательности УЗ снимков**

Номер кадра	Автоматический вариант			Ручная технология			Отклонения, %		
	Длина, мм	Ширина, мм	Объём, мл	Длина, мм	Ширина, мм	Объём, мл	Длина	Ширина	Объём
1	68,4	41,85	88,10299	70,65	44,1	87,54558	3,184713	5,102041	0,636708
2	66,6	40,15	71,73168	71,55	41,85	75,786	6,918239	4,062127	5,349695
3	68,25	39,35	68,73499	70,2	40,95	70,30157	2,777778	3,907204	2,228371
4	67,5	36,9	58,53641	67,95	38,25	60,8768	0,662252	3,529412	3,844469
5	66,6	35,55	51,68721	67,95	35,55	54,98105	1,986755	0	5,990864
6	66,6	34,65	48,23748	66,15	35,55	50,92599	0,680272	2,531646	5,279249
7	64,05	32,35	44,21786	63	33,75	41,33334	1,666667	4,148148	6,978676
8	62,35	30,2	36,09162	59,85	31,5	38,52802	4,177109	4,126984	6,323709
9	61,55	29,2	34,58266	59,4	29,7	35,57282	3,619529	1,683502	2,783473
10	65,25	33,05	40,93527	62,1	34,2	43,87719	5,072464	3,362573	6,704896
11	65,35	32,6	46,65847	67,95	33,75	49,25552	3,826343	3,407407	5,272607
12	68,35	36,75	42,4483	72	38,25	46,55262	5,069444	3,921569	8,816518
13	69,25	40,25	50,44793	71,1	41,85	52,24434	2,601969	3,823178	3,438478
14	67,5	40,05	56,75651	72	40	55,71364	6,25	0,125	1,87184
15	70,85	41,4	65,59669	73,8	40,95	69,68015	3,99729	1,098901	5,860292
16	69,3	40,5	68,57795	71,1	40,5	72,10355	2,531646	0	4,889634
17	66,6	36	64,23597	70,65	38,25	64,70367	5,732484	5,882353	0,722834
18	72	41,4	66,88941	70,2	42,75	69,51201	2,564103	3,157895	3,772873
19	72	43,2	68,53315	73,8	43,5	70,19542	2,439024	0,689655	2,36806
20	72	41,85	68,50051	72	39,6	65,68017	0	5,681818	4,294051
21	72	40,95	72,07269	76,05	41,4	75,12589	5,325444	1,086957	4,064112

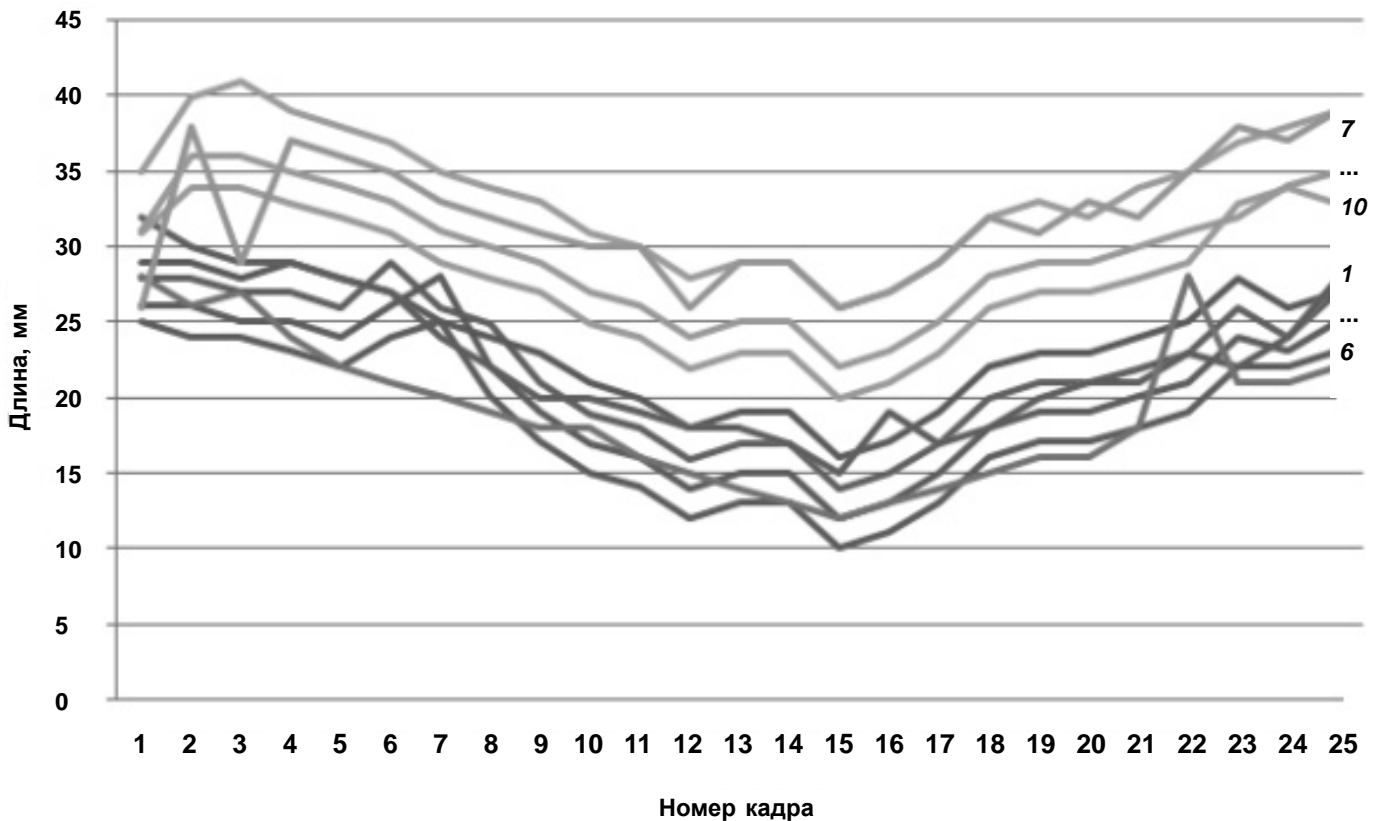


Рис. 7. Неравномерное изменения длин дисков

На рис. 6 приведены кривые изменения длин 10 дисков в апикальной позиции. ЛЖ сокращается равномерно, так как все длины дисков изменяются одинаково, что соответствует предложенной модели.

На рис. 7 показаны кривые неравномерного изменения длин 10 дисков.

**Заключение.** Система автоматизации обработки и анализа эхокардиографических снимков на основе уставновленных требований обеспечивает полную автоматическую обработку кадров (от 25 до 100 снимков) обследования сердца в течение 3–7 мин после регистрации данных, что значительно меньше, чем существующий способ обработки; длительность обработки такого объёма данных — от 10 мин до 1 ч. Из-за ограниченного времени приёма врач анализирует от 1 до 5 кадров, затрачивая на это 2–5 мин. Система может работать как в ручном, так и в автоматическом режиме, обрабатывая и анализируя УЗ снимки, что даёт возможность обследовать большее число пациентов. Она является основой для формирования автоматизированного рабочего места кардиолога, интегрирующего все данные о пациенте, что повышает точность и объективность диагноза. Рассмотренная система используется в

кардиологическом отделении железнодорожной больницы г. Муром.

#### Библиографические ссылки

1. **Глобальная** стратегия ВОЗ в области рациона и режима питания, физической активности и здоровья: консультативная встреча стран Европейского региона. Отчёт о консультативной встрече. Копенгаген, 2–4 апреля 2003 г.
2. **Кардиологические** центры в России и СНГ. URL: <http://www.cardiosite.ru/cardio-russian> (дата обращения: 26.08.2009).
3. **Шиллер Н.Б., Осипов М.А.** Клиническая эхокардиография. Изд. 2-е. М.: Практика, 2005. 344 с.
4. **Crouse L.J., Kramer P.H.** Stress echocardiography: technical considerations. *Prog Cardiovasc Dis*, 43, 2001. P. 303–314.
5. **Быстрые** алгоритмы в цифровой обработке изображений / Под ред. Т. Хуанга. М.: Радио и связь, 1984. 320 с.
6. **Ткачук М.И.** Определение полосы М-режима на эхокардиографических изображениях: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Новейшие научные достижения — 2009». Днепропетровск: Наука и образование, 2009. С. 40–45.
7. **Sanny J.A** Computational approach to edge detection, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8, 1986. P. 679–714.



УДК 004.932.2

**Е.О. Егорушкин**

(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

E\_ngtu@inbox.ru

**НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ**

*Рассмотрен метод измерения среднего размера ячейки, одного из важнейших параметров качества материалов ячеистой структуры. Метод разработан на основе математического аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС). Приведена структура и алгоритм обучения ИНС. Разработаны способы повышения помехоустойчивости работы метода.*

**Ключевые слова:** контроль качества, средний размер ячейки, пенополиуретан, материалы ячеистой структуры, система технического зрения.

*Measuring method of the cell average dimensions, one of the significant quality parameter for materials with cellular structure, is considered. This method is created from a mathematical instrument for artificial connectionist (INS). Structure and training algorithm (INS) are adduced. Means of the noise immunity growth in measuring method utilization are created.*

**Key words:** quality control, cell average dimensions, polyurethane foam, materials with cellular structure, technical sight system.

В настоящее время сохраняется потребность в разработке новых и совершенствовании существующих методов и средств контроля качества при производстве различных материалов сложной структуры (пенополиуретан, пенопласт, ячеистые пластмассы). Это обусловлено необходимостью повышения эффективности контроля, решения задач его автоматизации для увеличения конкурентоспособности производимого продукта в условиях современного рынка. Применяемые в настоящее время ручные методы контроля при

современном серийном производстве являются неэффективными, поэтому задача автоматизации контроля качества включается в список узких мест производственных предприятий.

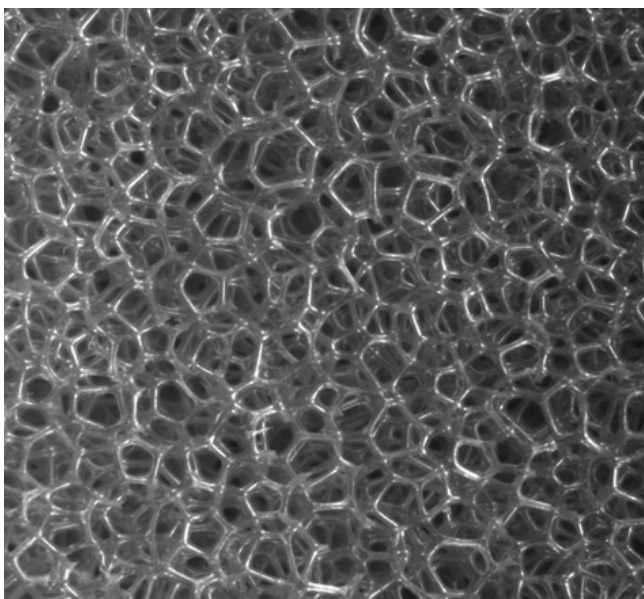
Цель данной работы – исследование геометрических параметров качества ячеистых материалов, разработка методики их определения по изображению. В настоящее время наибольшие трудности возникают при автоматизации контроля важнейших параметров качества материалов – среднего размера ячеек и его однородности.

При исследовании изображений контролируемого материала установлена их периодическая структура и сделан вывод о сильной зашумлённости информационного сигнала – изображения ячеек материала, находящихся на поверхности, просвечивающими фрагментами нижележащих слоев. Это особенно характерно для эластичных пенополиуретанов (рис. 1).

Этим объясняются ошибки, большие затраты времени и вычислительных ресурсов для определения размеров ячеек с помощью частотных методов (корреляционного или Фурье-анализа).

Для получения большей скорости, необходимой помехозащищённости процесса обработки требуется вывод более точной зависимости размеров ячеек от видов изображений, подаваемых на вход измерительной системы. Подобные задачи решаются с помощью математического аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС).

ИНС – вид математических моделей, которые строятся по принципу организации и функцио-



**Рис. 1.** Изображение поверхности пенополиуретана

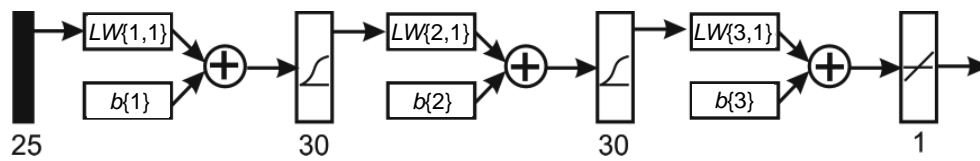


Рис. 2. Структура нейронной сети:

$LW$  – матрица входных значений;  $b$  – матрица целевых значений

нирования их биологических аналогов – сетей нервных клеток (нейронов) мозга.

Выбор ИНС обоснован тем, что они обладают возможностью самостоятельно обобщать (интерполировать и экстраполировать) полученный навык решения задачи и выдавать прогноз для новых значений входных сигналов, ранее не включённых в набор данных для обучения. ИНС также способны выделить наиболее информативные для решения задачи входные сигналы, отбросить неинформативные, шумовые сигналы и в итоге повысить надёжность решения. Для построения автоматизированной системы важным является тот факт, что алгоритмы, используемые при обучении нейронной сети, универсальны для различных объектов анализа. Это позволяет создавать системы, обладающие такими важными свойствами, как гибкость и масштабируемость.

В качестве обучающего выбран алгоритм Левенберга–Маркара (Levenberg–Marquardt) [2] – метод нелинейной оптимизации, относящийся к методам Ньютона. Для поиска минимума используют комбинированную стратегию – линейную аппроксимацию и градиентный спуск. Переход к спуску происходит в зависимости от того, была ли успешной линейная аппроксимация. Основное выражение для коррекции весовых коэффициентов ИНС определяется как

$$x_{k+1} = x_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e,$$

где  $\mu$  – параметр алгоритма, определяемый в процессе линейной (скалярной) оптимизации вдоль выбранного направления;  $J(x)$  – матрица-якобиан, содержащая первые частные производные ошибок ИНС по переменным весов и смещений;  $e$  – вектор ошибок;  $J$  – матрица идентичности.

Для повышения помехоустойчивости работы алгоритма анализа в процессе обучения на вход сети подаётся массив из средних значений секторов исходных изображений размерами  $50 \times 50$  пикселей. В серии для обучения включаются изображения, полученные вращением и сдвигом исходного, а также изображения с разной степенью освещённости.

Обучение проводилось с помощью серии из 150 изображений поверхности материала в течение 30 мин.

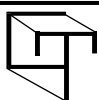
Полученные результаты определения размеров ячейки при работе сети на изображениях, принадлежащих серии для обучения, соответствуют целевым, что указывает на успешную завершённость процесса обучения.

Сравнение результатов работы ИНС по измерению среднего размера ячеек реальных изображений с данными, полученными в результате ручного измерения, показало, что ошибка определения размера ячейки составляет не более 10 %, а длительность одного цикла измерения не более 1,2 с. Изменения освещённости, особенности структуры материала и его ориентация, предусмотренные при обучении ИНС, на результат измерения влияют незначительно. Остальные отклонения в условиях эксперимента снижают точность измерения на 5 – 10 %

Нейросетевой метод измерения среднего размера ячейки может быть рекомендован для использования в автоматизированных системах неразрушающего контроля качества широкого круга материалов ячеистой структуры.

#### Библиографические ссылки

1. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. М.: Мир, 1992. 237 с.
2. Уидроу Б., Стирз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.



УДК 004.67(85)+519.688

**А.Н. Ветров**

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет)

vetrovan@bk.ru

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
АДАПТИВНОЙ СРЕДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ КОГНИТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ**

*Описан программный комплекс, предназначенный для автоматизации системного анализа информационной среды автоматизированного обучения со свойствами адаптации на основе параметрических когнитивных моделей, включающий электронный учебник на основе процессора адаптивной репрезентации информационных фрагментов, учитывающий индивидуальные особенности субъектов и технические возможности средств обучения; основной диагностический модуль для тестирования уровня остаточных знаний обучаемых; прикладной диагностический модуль для обеспечения автоматизации процесса исследования параметров когнитивных моделей субъекта.*

**Ключевые слова:** когнитивная модель, технология когнитивного моделирования, процесс адаптивной репрезентации информационных фрагментов.

*Program complex is described. This complex is suitable for systemic analysis automation of the automatic teaching informational surrounding with adaptation characteristics based on the parametric cognitive models. The complex includes an electronic textbook based on the adaptive representation processor of the informational fragments, taking into account of the subject individual features and teaching means technical facilities; basic diagnostic module for standard of residual knowledge testing; applied diagnostic module for automation ensuring of the parameters research process for the subject cognitive models.*

**Key words:** cognitive model, cognitive modeling technology, adaptive representation process of the informational fragments.

Информатизация информационно-образовательных сред (ИОС) обуславливает появление новых научных проблем и частных прикладных задач, актуализирует необходимость создания, внедрения и использования различных средств автоматизации для системного анализа и повышения эффективности информационного взаимодействия между субъектами и средствами управляемого процесса формирования знаний обучаемых как технологического процесса, включающего последовательность заделов, на каждом из которых используется организационное, аппаратное, программное и методическое обеспечение [1].

Традиционные подходы, методы, алгоритмы и информационные технологии в основе автоматизированных ИОС теряют свою первичную актуальность, что инициирует появление инновационных адаптивных моделей и индивидуально-ориентированных технологий для поддержки процесса обучения в учреждениях среднего (об-

щего) образования, высшего профессионального образования и профессиональной переподготовки [2, 3].

Ниже рассмотрены подход к созданию, анализу и повышению эффективности функционирования системы автоматизированного обучения со свойствами адаптации на основе когнитивных моделей, технология когнитивного моделирования для системного анализа ИОС и комплекс программ для автоматизации задач исследования [3–11].

**Особенности системы автоматизированного обучения со свойствами адаптации на основе блока параметрических когнитивных моделей.** Система автоматизированного обучения (САО) со свойствами адаптации на основе параметрических когнитивных моделей (КМ) [1, 3–5, 9], созданная с помощью технологии когнитивного моделирования (ТКМ) [2, 5, 8], включает шесть каналов информационного обмена на двух уровнях информационного взаимодействия между разными

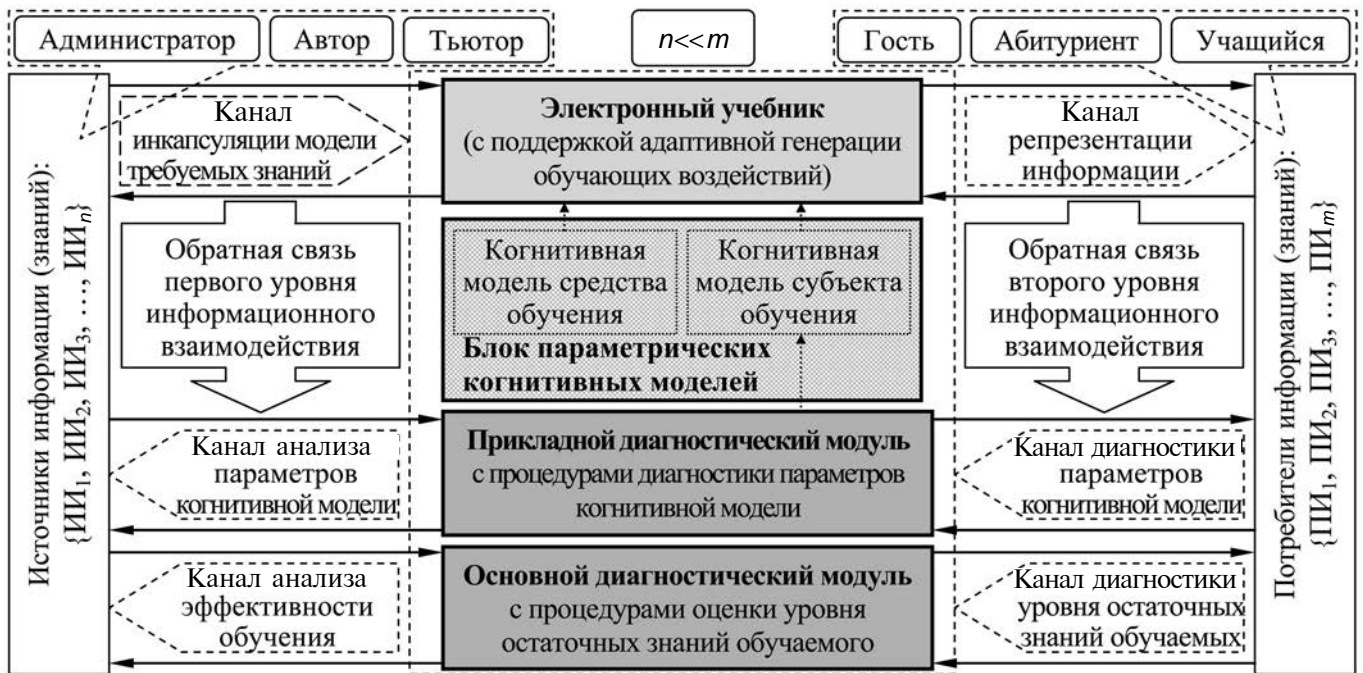


Рис. 1. Структура среды автоматизированного обучения со свойствами адаптации на основе когнитивных моделей

субъектами и средствами управляемого процесса формирования знаний (рис. 1):

первый уровень – между источниками информации и компонентами САО;

второй уровень – между компонентами САО и потребителями информации.

Информационное взаимодействие между источниками и потребителями информации в САО со свойствами адаптации на основе КМ является опосредованным и происходит на двух уровнях: субъекты обучения взаимодействуют через технические средства обучения, что является существенным недостатком, который необходимо устранять технологически внедрением различных средств автоматизации на основе современных информационных и коммуникационных технологий.

Источники информации подразделяются на две независимые категории: естественного (квалифицированные специалисты) и искусственного происхождения (традиционные и электронные книги, серверы, базы данных, накопители информации нового поколения).

Потребители информации – авторы курсов, тьюторы, обучаемые, сотрудники.

**Структура комплекса программ для поддержки функционирования САО со свойствами адаптации на основе блока параметрических КМ.** Разработанный комплекс программ [3–6, 9] предназначен для поддержки функционирования САО со свойствами адаптации на основе блока параметрических КМ [3–6] и автоматизации задач исследования информационной среды образователь-

ного учреждения [1, 3, 5]. При этом структура комплекса включает несколько основных программных компонентов, реализующих определённый набор функций и задач [6, 7, 10] (рис. 2):

адаптивный электронный учебник (ЭУ) [3, 5–7, 9, 10] реализует индивидуально ориентированную генерацию последовательности разнородных образовательных воздействий обучаемому с помощью разработанного процессора адаптивной репрезентации информационных фрагментов на основе блока параметрических КМ;

основной диагностический модуль (ДМ) [3–6, 9] реализует автоматизацию тестирования уровня остаточных знаний обучаемых (УОЗО) с помощью набора тестов по разным предметным областям на основе функции оценивания и двух интервальных шкал, позволяющих независимо учитывать количество правильных ответов на вопросы и сумму набранных баллов за каждый правильный вариант ответа на вопрос;

прикладной ДМ [3, 5, 6, 9] обеспечивает автоматизацию диагностики значений параметров КМ субъекта обучения в форме тестирования на основе предварительно подобранного набора прикладных методов исследования в области физиологии анализаторов, когнитивной психологии и прикладной лингвистики;

блок параметрических КМ [3–5, 8, 11] включает два основных типа КМ:

КМ субъекта обучения концентрирует параметры, которые отражают индивидуальные особенности личности обучаемого (ИОЛСО) при первичном

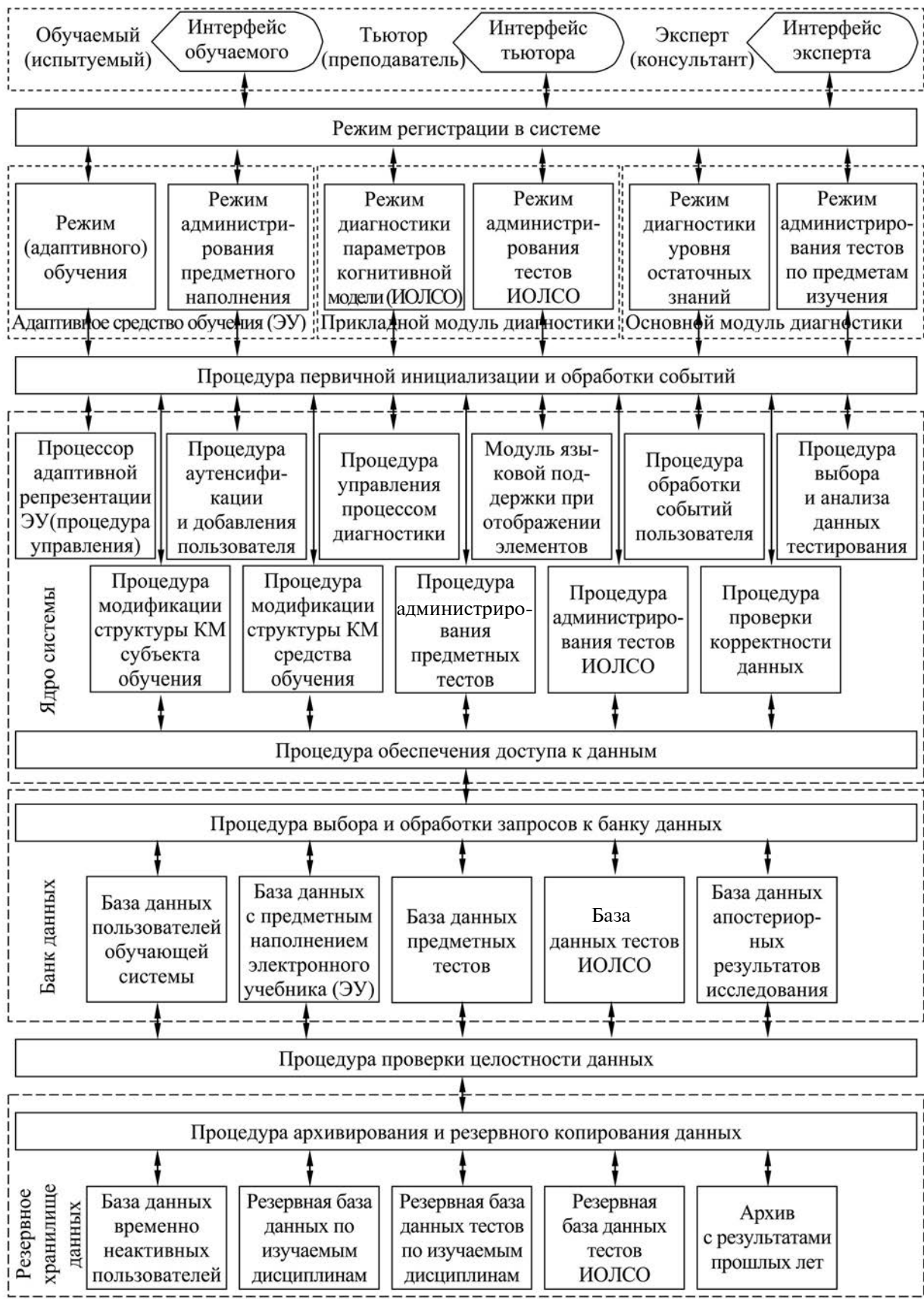


Рис. 2. Структурно-функциональная схема комплекса программ для автоматизации исследования адаптивной среды автоматизированного обучения

сенсорном восприятии (физиологический портрет), вторичной обработке и понимании содержания информационных фрагментов на заданном языке;

КМ средства обучения агрегирует параметры, отражающие технические возможности средства обучения при генерации образовательных воздействий (текст, плоская или объёмная схема с подбором цвета и гарнитуры шрифта и фона, цветовая схема).

Архитектура комплекса программ для анализа ИОС представлена на рис. 2 [9].

Компоненты комплекса программ функционируют в трёх режимах:

администрирование (позволяет модифицировать содержание базы данных);

администрирование базы данных пользователей (позволяет изменить параметры учётных записей пользователей и просмотреть апостериорные данные тестирования УОЗО и диагностики ИОЛСО посредством набора методов);

администрирование базы данных методов исследования (обеспечивает изменение значений каждого метода исследования в интерфейсе и базе данных, реализующего диагностику значений параметров физиологического, психологического и лингвистического портретов КМ субъекта обучения);

администрирование базы данных адаптивного ЭУ (реализует модификацию структурированной последовательности информационных фрагментов, отражающих содержание предмета изучения – модуль, раздел, подраздел, параграф);

адаптивное обучение (реализует индивидуальноориентированную генерацию ряда информационных фрагментов разного типа различным способом с помощью созданного процессора адаптивной репрезентации информационных фрагментов, рассчитывающего оптимальные параметры отображения);

анализ данных (позволяет просмотреть апостериорные данные, которые получены при автоматизированном обучении, тестировании УОЗО и диагностике ИОЛСО, а затем реализовать математическую обработку апостериорных данных с помощью набора методов статистического анализа).

ЭУ выступает основным компонентом САО со свойствами адаптации на основе КМ, реализует индивидуальноориентированную генерацию последовательности образовательных воздействий с помощью разработанного процессора адаптивной репрезентации информационных фрагментов, которые отражают предварительно структурированное содержание набора определённых предметов изучения и хранятся непосредственно в базе данных с предметным наполнением и резервной базе данных.

Переключение между режимами функционирования прикладного ДМ осуществляется глав-

ной кнопкой программной реализации САО со свойствами адаптации на основе блока параметрических КМ, что позволяет активизировать режим администрирования, диагностики и анализа данных.

Каждый из имеющихся режимов реализует определённый ограниченный набор функций и различных задач.

**Электронный учебник, созданный на основе процессора адаптивной репрезентации информационных фрагментов.** Интерфейс адаптивного ЭУ в режиме администрирования (рис. 3) позволяет реализовать модификацию параметров предварительно структурированного содержания имеющихся предметов изучения, ввести перечень групп и список пользователей, а затем реализовать редактирование параметров учётных записей пользователей и обеспечить просмотр значений параметров блока параметрических КМ [10].

Для администрирования контента адаптивного ЭУ используется набор различных элементов интерфейса, которые сосредоточены на вкладках формы:

вкладка «Languages/Disciplines» позволяет редактировать параметры дисциплины, содержит поле кодов и наименований языков изложения материала дисциплины, код, наименование и описание дисциплины, параметры КМ средства обучения по умолчанию (значения этих параметров используются при отсутствии предустановленных значений параметров средства обучения, в противном случае процессор адаптивной репрезентации информационных фрагментов деактивируется, и режим адаптивного обучения выключается);

вкладка «Units» позволяет модифицировать код, наименование, статус отображения и описание каждого раздела выбранной дисциплины;

вкладка «Modules» изменяет кодификатор, наименование, статус отображения и описание каждого модуля в пределах выбранного раздела дисциплины, отображаемого на определённом национальном или иностранном языке, при этом содержание дисциплины предварительно вводится в режиме администрирования и доступно для последующего использования в режиме адаптивного обучения;

вкладка «Pages» позволяет сначала выбрать дисциплину и язык изложения материала (ЕА1), раздел (ЕА2) и модуль (ЕА3), а затем редактировать кодификатор (ЕА4.1), номинальное значение интервала времени отображения страницы (ЕА4.2), параметры отображения страницы (ЕА4.3), текстологическое содержание вопроса (ЕА5.1) и графическое содержание вопроса (ЕА5.2) с использованием цветовых схем замещения или компенсации определённых цветов спектра на графических изображениях для трихрома-

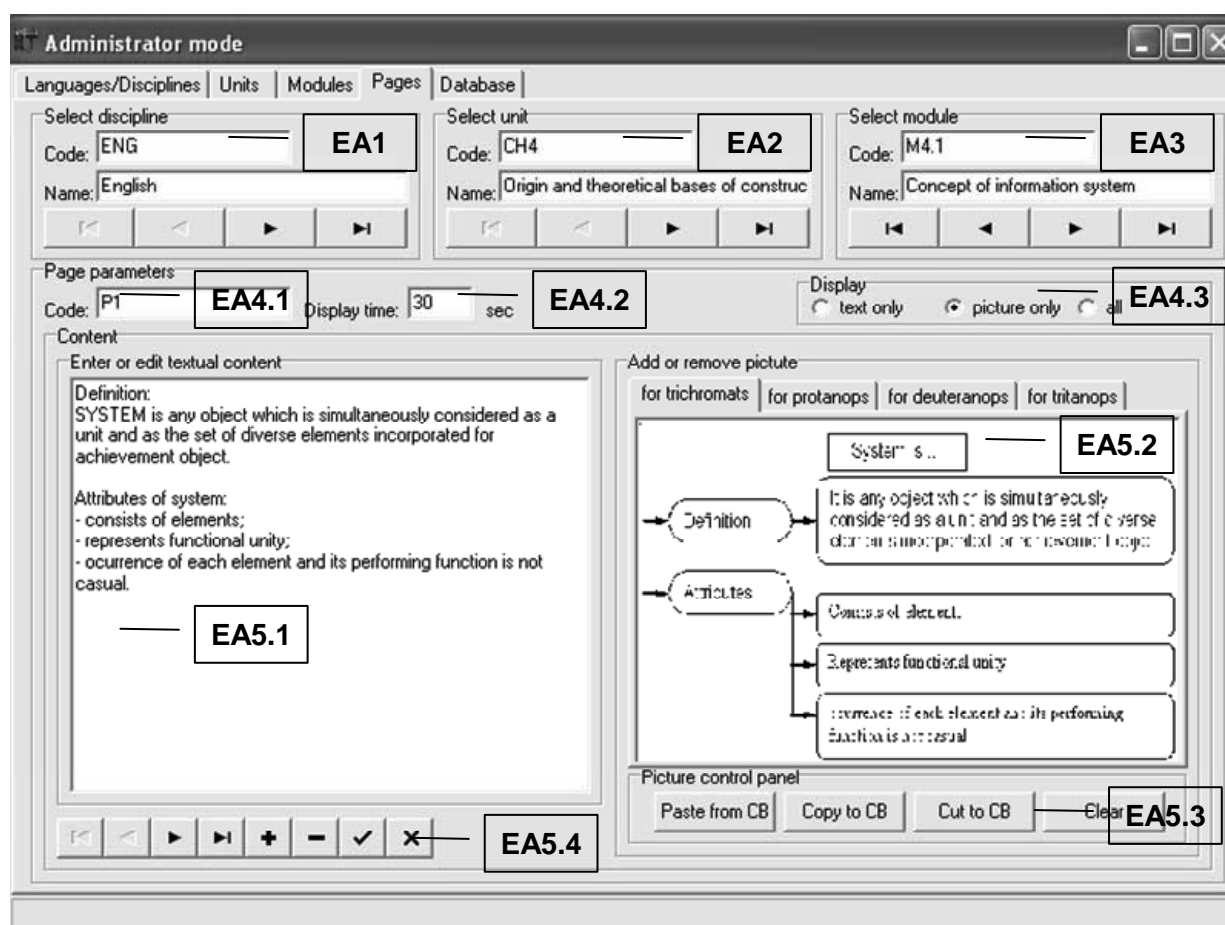


Рис. 3. Интерфейс адаптивного электронного учебника в режиме администрирования базы данных с параметрами предмета изучения

тов, полных или частичных дихроматов (протанопы не воспринимают полутона красного, дейтеранопы не ощущают оттенки зелёного и тританопы не различают синий и фиолетовый);

вкладка «Database» изменяет список доступных кодов и наименований групп, перечень параметров учётных записей пользователей, позволяет просмотреть и редактировать параметры КМ субъекта и средства обучения, измеренных или заданных для определённого пользователя или средства.

Значения параметров КМ субъекта обучения диагностируются методами исследования с помощью прикладного ДМ в основе комплекса программ.

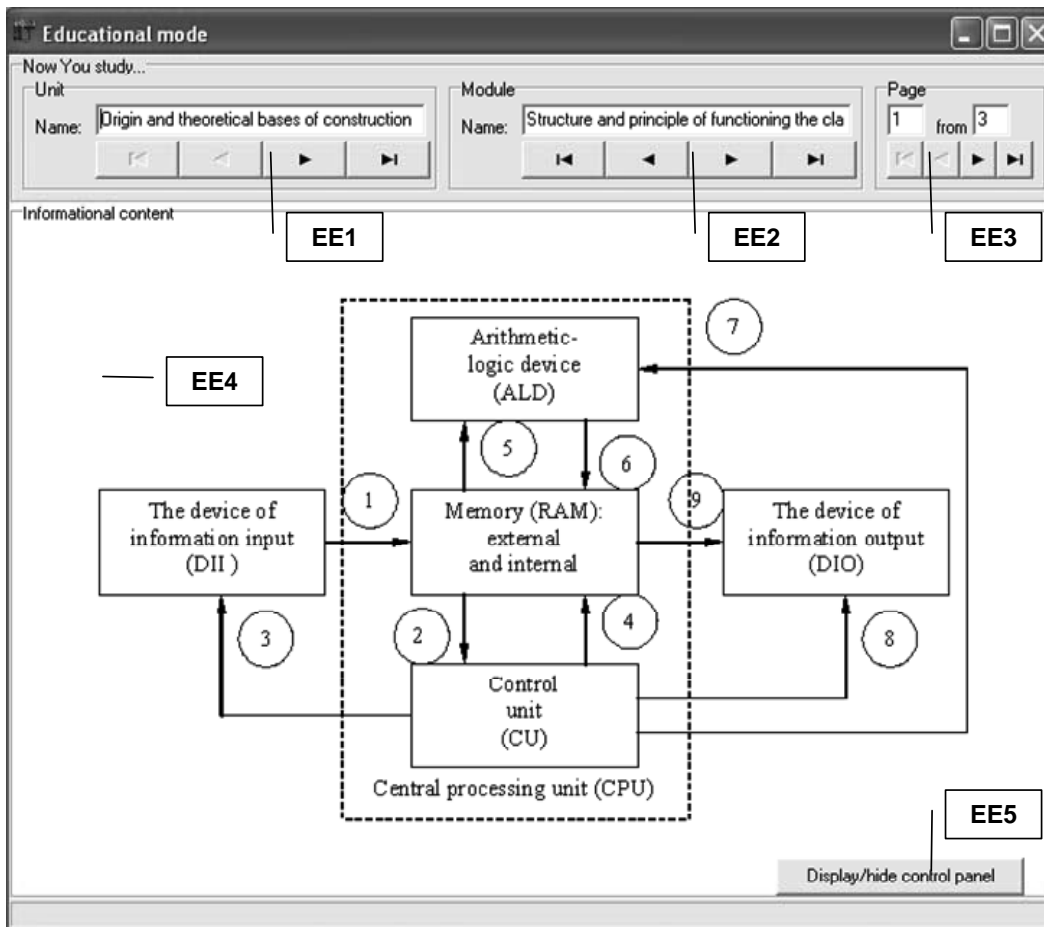
Для диагностики значений параметров КМ субъекта обучения применяется методика исследования параметров КМ субъекта обучения, в основе ТКМ, которая позволяет сформировать актуальное множество различных параметров в экспериментальной структуре КМ, а затем подобрать новые и усовершенствовать имеющиеся методы исследования определённых параметров физиологического, психологического или лин-

гвистического портрета КМ в виде набора различных разработанных процедур для последующей реализации автоматизации процесса исследования ИОЛСО.

Значения параметров КМ средства обучения устанавливаются и систематически обновляются на основе существующего технического описания в течение жизненного цикла разработанной программной реализации определённого средства обучения.

Для диагностики значений параметров КМ средства обучения применяют определённую методику исследования параметров КМ средства обучения в основе ТКМ, которая позволяет модифицировать существующее актуальное множество параметров на основе заданной теоретической структуры КМ, а также реализовать добавление новых и удаление устаревших параметров КМ и соответствующих им методов исследования.

Для реализации процесса автоматизированного формирования знаний контингента обучаемых используется разработанный адаптивный ЭУ (рис. 4), функционирующий на основе процессо-



**Рис. 4. Интерфейсная форма электронного учебника в режиме адаптивного обучения при отображении информации в виде плоской схемы**

ра адаптивной репрезентации информационных фрагментов, которые непосредственно отражают содержание одного или нескольких предметов изучения.

В режиме адаптивного обучения обучаемый последовательно выбирает раздел (EE1), модуль (EE2) и страницу (EE3), содержащую определённый информационный фрагмент по дисциплине (EE4). Кнопка (EE5) реализует скрытие или отображение панели навигации соответственно для увеличения или уменьшения эффективного размера просматриваемой рабочей области окна интерфейса.

Возможно автоматическое и ручное переключение между информационными фрагментами предмета изучения посредством использования разных панелей навигации двух основных типов: иерархическое дерево, отражающее структуру одного или нескольких предметов изучения, и панель, обеспечивающая последовательное линейное переключение раздела, модуля, страницы с элементарным информационным фрагментом по определённому предмету изучения.

**Процессор адаптивной репрезентации информационных фрагментов.** Структура процессора адаптивной репрезентации информационных фрагментов выполнена на основе принципа параллельной и блочно-модульной архитектуры и включает модули, процедуры и алгоритмы для расчёта оптимального сочетания значений параметров отображения информации на основе значений параметров КМ субъекта обучения и средства обучения (рис. 5).

**Основной диагностический модуль для тестирования уровня остаточных знаний.** Основной ДМ является важным компонентом САО со свойствами адаптации на основе КМ, реализует автоматизированное тестирование УОЗО посредством использования набора тестов по разным предметным областям в основе базы данных (рис. 6) [3, 5].

Для администрирования параметров теста используется ряд элементов интерфейса: поле редактирования текстологического содержания вопроса (BA1), поле редактирования признака корректности, текстологического содержания вариантов ответа и весовых коэффициентов для активизации точной шкалы на основе суммы на-



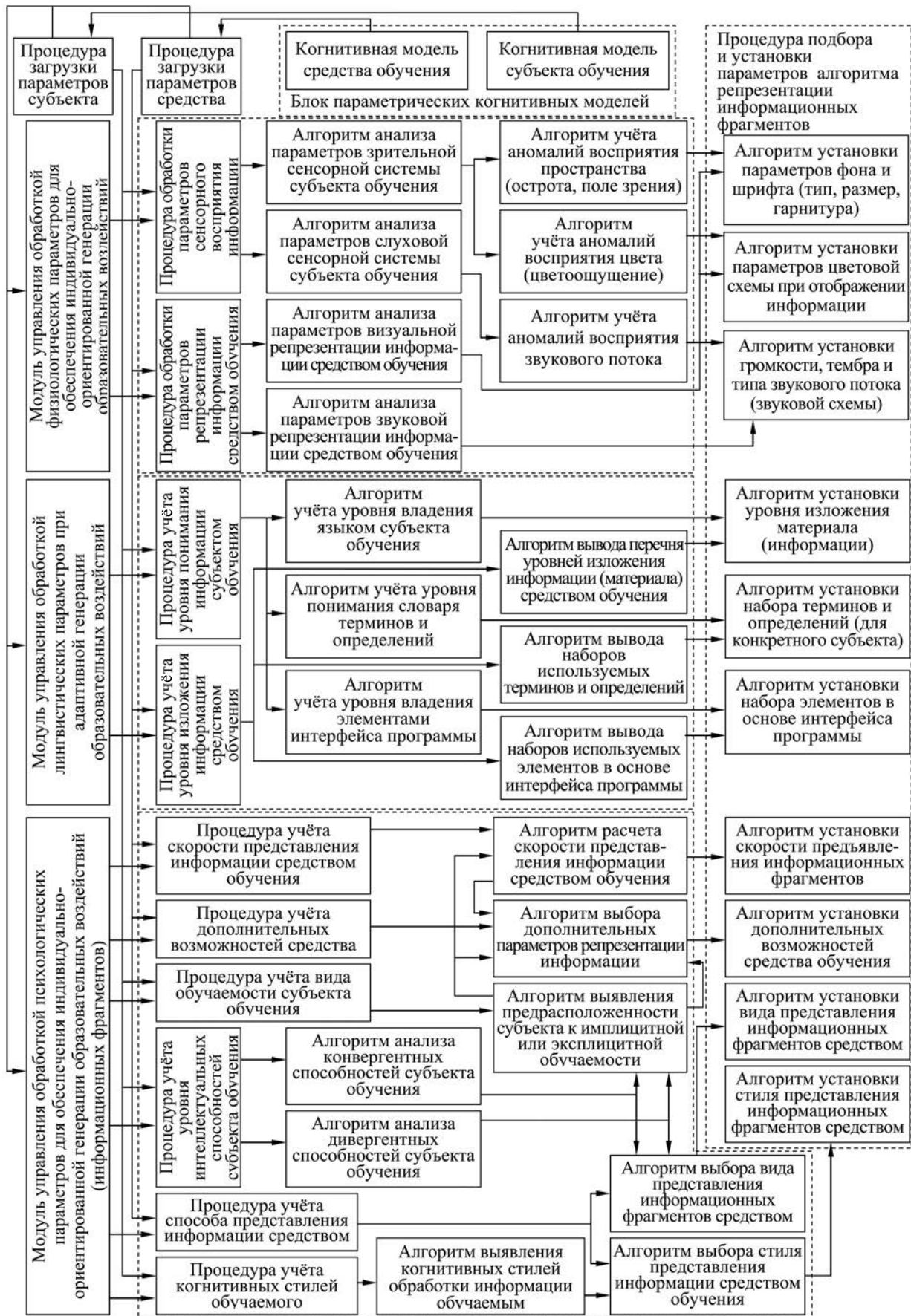


Рис. 5. Процессор адаптивной репрезентации информационных фрагментов

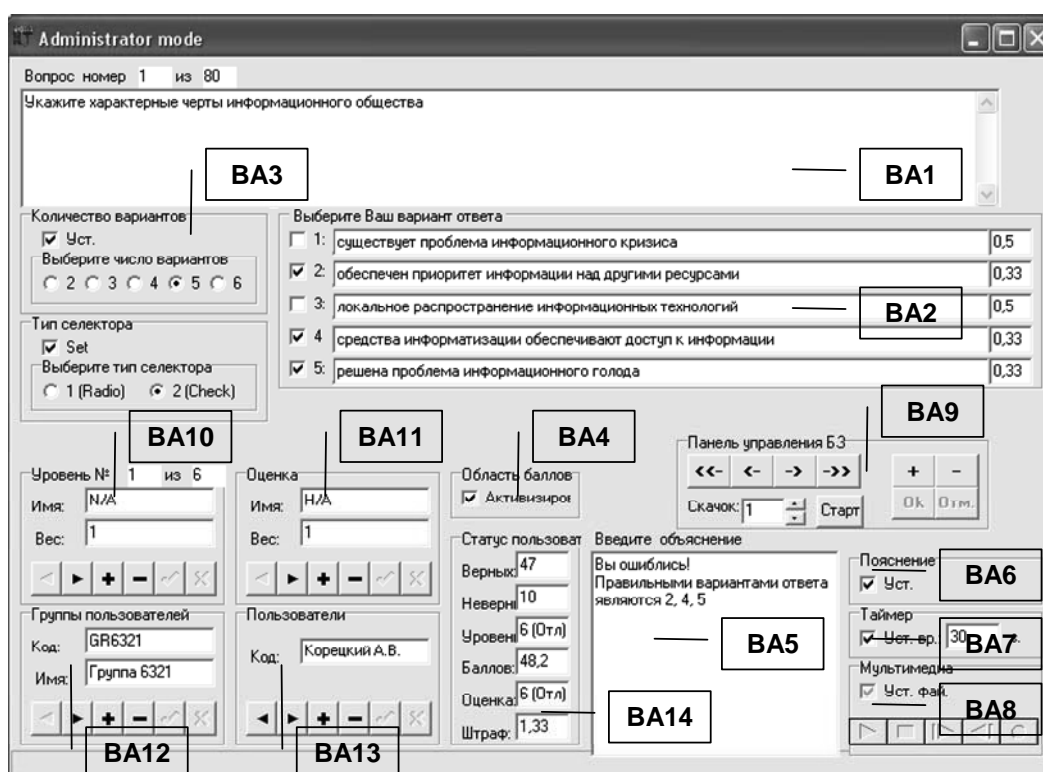


Рис. 6. Интерфейс основного диагностического модуля в режиме администрирования выборки вопросно-ответных структур и списка испытуемых

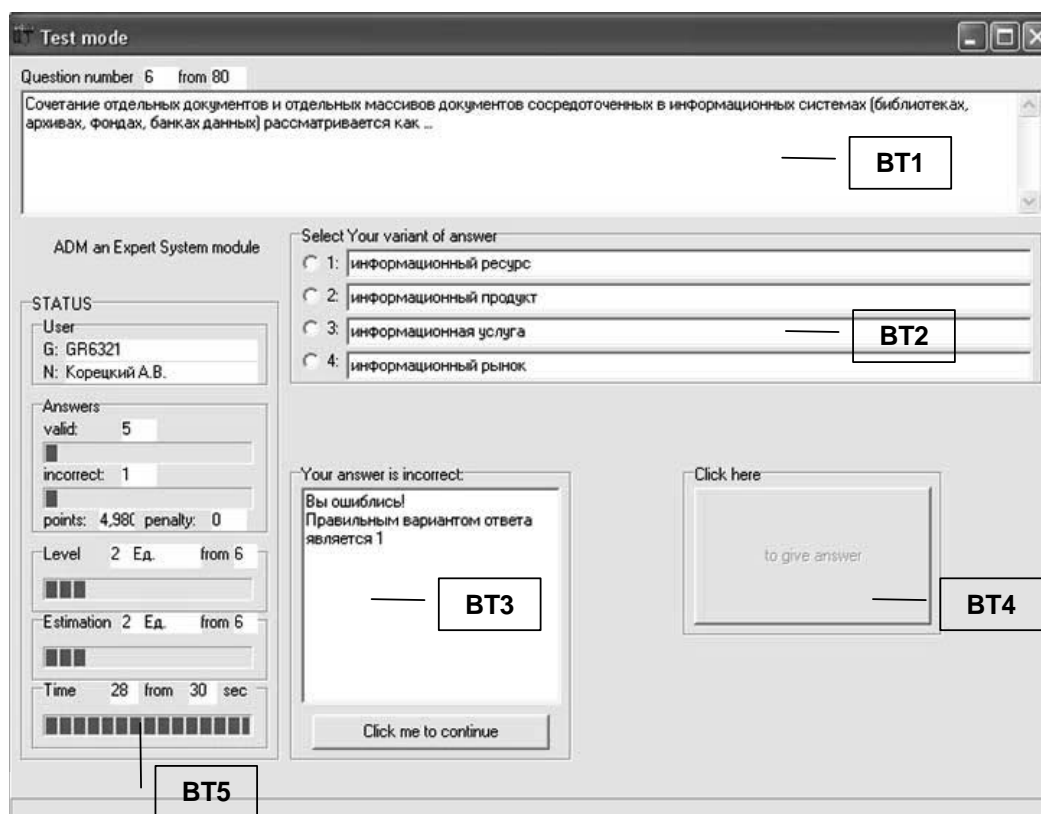


Рис. 7. Интерфейс основного диагностического модуля в режиме диагностики уровня остаточных знаний контингента обучаемых по дисциплине «Информатика»

бранных баллов (BA2), поле редактирования количества вариантов ответа и типа селектора вариантов ответа (BA3), поле модификации статуса активизации точной шкалы на основе весовых коэффициентов (BA4), поле редактирования формулировки объяснения (BA5), поле модификации статуса отображения объяснения при неверном ответе на вопрос (BA6), поле модификации статуса активизации таймера для учёта интервала времени отображения вопроса (BA7), поле модификации статуса активизации мультимедиа сопровождения из файла с потоковым аудио (BA8), поле индикации статуса испытуемого, содержащее количество верных и неверных ответов, номинал уровня владения материалом по грубой шкале на основе количества верных ответов, сумму баллов

за все правильные варианты ответа на вопросы, оценку УОЗО посредством точной шкалы на основе суммы набранных баллов, сумму штрафных баллов за все некорректные варианты ответа на вопрос (BA14).

Интерфейс основного ДМ в режиме диагностики УОЗО с выборкой контрольных вопросов по дисциплине «Информатика» для тестирования представлен на рис. 7.

В режиме диагностики УОЗО можно использовать разные элементы интерфейса для последовательного выбора и ввода правильных вариантов ответа на каждый вопрос, а также реализации подтверждения выбора инициализации пуска алгоритма проверки и перехода к следующему заданию: поле отображения текста формулировки вопроса

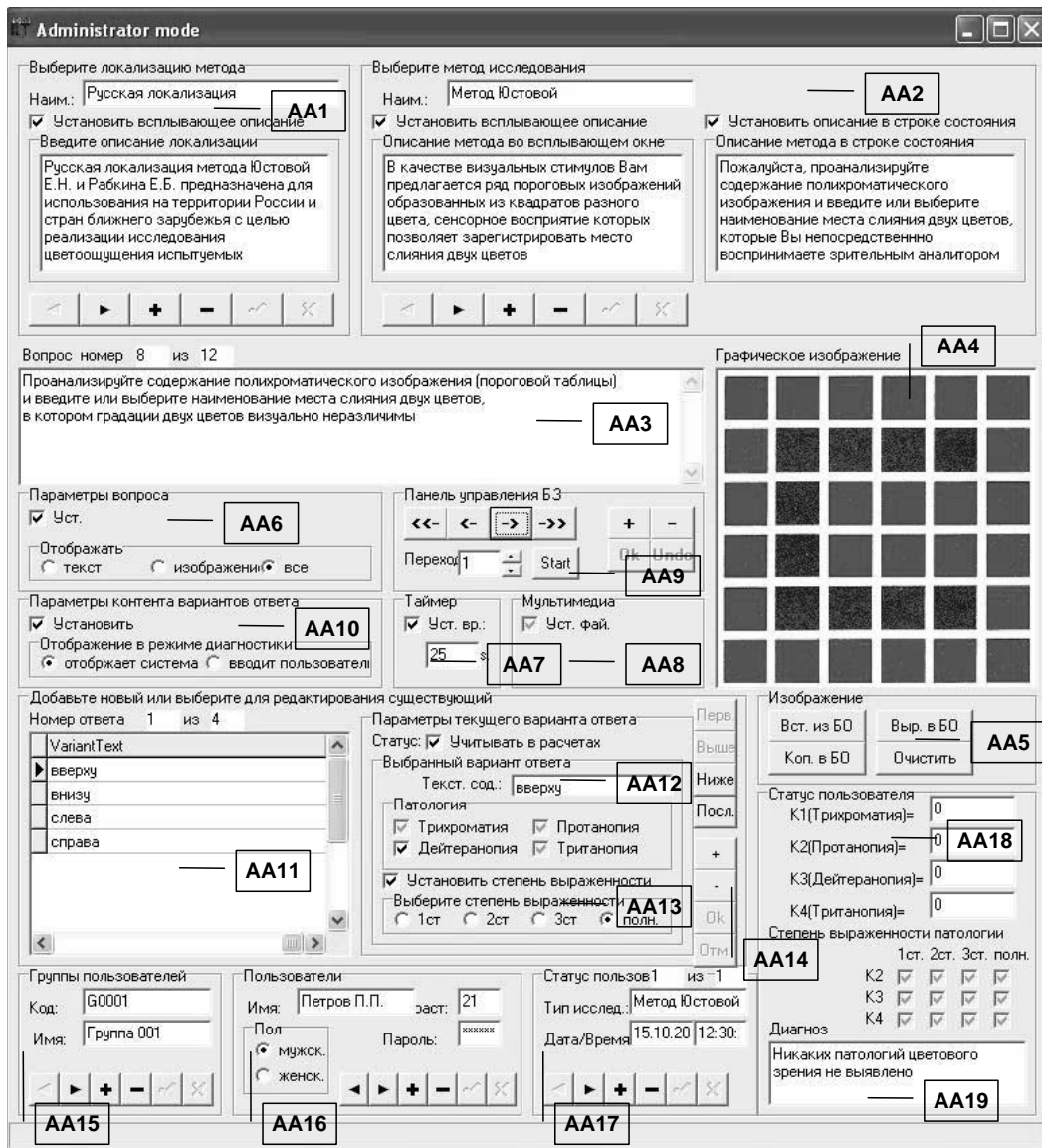


Рис. 8. Интерфейс основного диагностического модуля в режиме администрирования параметров метода исследования и списка испытуемых

(BT1), поле отображения текста вариантов ответа (BT2), поле отображения текста объяснения при неверном ответе испытуемого (BT3), кнопка для подтверждения ответа на данный вопрос, иницирующая переход к следующему вопросу (BT4), панель статуса испытуемого (BT5).

В процессе автоматизированного тестирования УОЗО рассчитываются значения коэффициентов и формируется статус испытуемого. Апостериорные данные сохраняются в реальном масштабе времени в базе данных, что позволяет обрабатывать их математически набором статистических методов (корреляционным, дисперсионным, регрессионным, дискриминантным и факторным анализом).

**Прикладной диагностический модуль для диагностики индивидуальных особенностей контингента обучаемых.** Прикладной ДМ является неотъемлемым компонентом САО со свойствами адаптации на основе КМ и реализует диагностику параметров КМ субъекта обучения (рис. 8) [3–7, 10].

Для администрирования параметров метода исследования цветоощущения (Е.Н. Юстовой и Е.Б. Рабкина) используется ряд элементов интерфейса: поля наименования и описания локализации (AA1), описания во всплывающем окне, описа-

ния в строке статуса (AA2), текста вопроса (AA3), графического сопровождения вопроса (AA4), панели управления рисунком (AA5) и селектора параметров отображения контента вопроса (AA6), поля статуса таймера для учёта интервала времени отображения вопроса (AA7) и статуса мультимедиа (AA8), панели навигации вопросов (AA9), селектора параметров отображения контента вариантов ответа (AA10), перечня вариантов ответа (AA11), статуса учёта варианта ответа в расчётах, модификации текста варианта ответа, типа патологии (AA12) и степени её выраженности (AA13), навигации вариантов ответа (AA14), групп пользователей (AA15), перечня пользователей (AA16), переключения попыток тестирования (AA17), номинальных значений коэффициентов, индицирующих разные патологии цветоощущения и степени их выраженности (AA18), отображения и редактирования диагноза (AA19).

На рис. 9 изображён интерфейс прикладного ДМ в режиме диагностики.

В режиме диагностики параметров цветоощущения интерфейс прикладного ДМ содержит поля отображения текстологического содержания формулировки вопроса (AT1), графического изображения в формулировке вопроса (AT2), перечня вариантов ответа испытуемого на данный

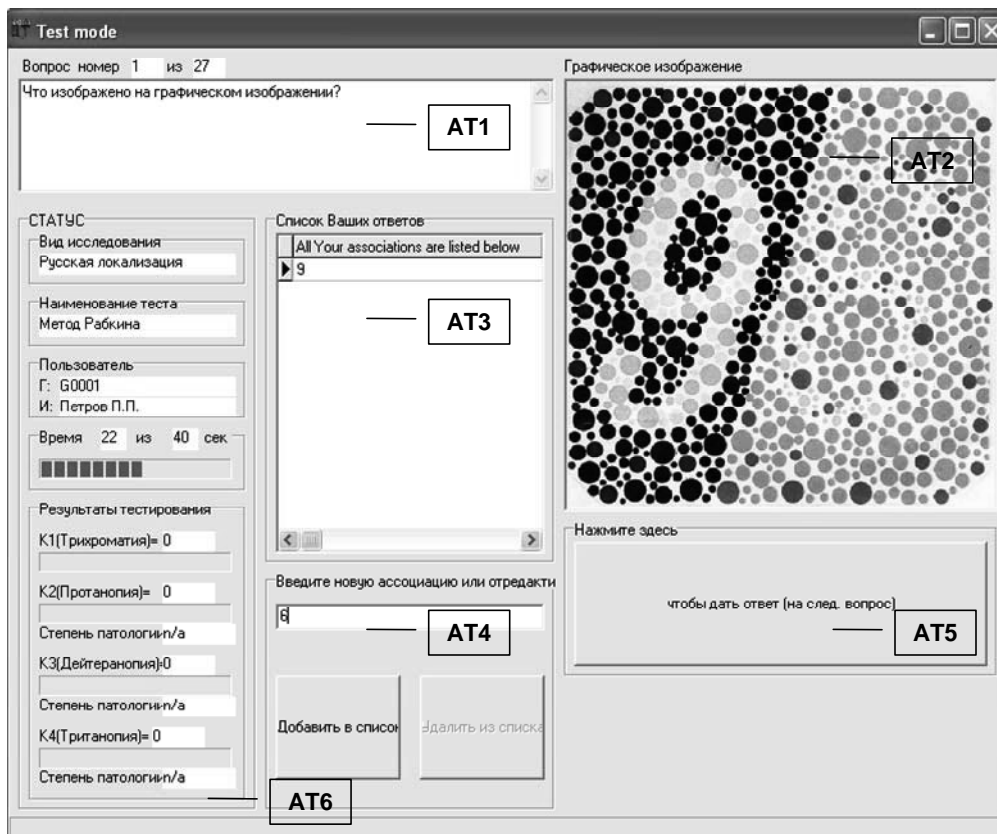


Рис. 9. Интерфейс прикладного диагностического модуля в режиме диагностики параметров цветоощущения испытуемого по методу Е.Б. Рабкина

вопрос (АТ3), удаления выбранного и добавления нового варианта ответа испытуемого (АТ4), кнопку для подтверждения перечня вариантов ответа на данный вопрос, инициирующую переход к следующему заданию (АТ5), панель статуса испытуемого (АТ6).

**Выводы и результаты практического использования.** Информатизация ИОС достигается за счёт средств автоматизации, которые существенно повышают эффективность деятельности на основе инноваций в области информационных технологий.

Традиционные подходы, методы и технологии теряют свою актуальность, что обуславливает появление адаптивных и индивидуальноориентированных сред и средств. Разработан комплекс программ для автоматизации исследования ИОС и повышения эффективности САО со свойствами адаптации на основе блока параметрических КМ, который включает ЭУ, основной и прикладной ДМ.

Наблюдалось успешное практическое использование разработанного ранее ЭУ, обеспечивающего индивидуальноориентированную генерацию образовательных воздействий на основе процессора адаптивной репрезентации информационных фрагментов.

Комплекс программ выполнен по блочно-модульному принципу и может быть модернизируемым с помощью замены различных программных модулей, добавления новых и удаления устаревших процедур для реализации диагностики параметров КМ. Разработано техническое описание для различных категорий пользователей.

Практическое использование полученных ранее научных теоретических и практических результатов осуществлялось в Международном банковском институте с 2004 г. и Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете с 2003 г. В ходе проведённых экспериментов получены акты о практическом использовании и три авторских свидетельства.

Эффективность САО со свойствами адаптации на основе блока параметрических КМ оценивалась общепринятыми показателями эффективности (результативности) технологического процесса автоматизированного формирования знаний:

$$K = \{k_1; k_2; k_3\} = \left\{ Y_2 - Y_1; \frac{Y_2}{Y_1}; \frac{Y_2 - Y_1}{Y_1} 100 \% \right\},$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты абсолютного, сравнительного и относительного показателей результативности формирования знаний обучаемых [11, 12].

Результаты статистической обработки апостериорных данных приведены в табл. 1.

Абсолютный, сравнительный и относительный показатели эффективности процесса формирования знаний контингента обучаемых отражают, на сколько процентов изменилось номинальное значение относительно базового периода.

Корреляционный и дисперсионный анализы не отразили существенных и научно обоснованных тенденций, зависимостей и закономерностей.

В результате проведённого регрессионного анализа апостериорных данных полученные значения коэффициента множественной корреляции (КМК = 0,558) и коэффициента множественной детерминации (КМД=0,312) свидетельствуют, что 31,2 % дисперсии зависимой переменной  $\hat{Y}_i$  (оценка УОЗО) определяется вариацией значений коэффициентов (предикторов)  $K_i$ , находящихся в полученной линейной регрессионной модели  $\hat{Y}(K_i)$ . Значения исходных  $\beta$  и стандартизованных коэффициентов  $\beta'$  линейной регрессионной модели  $\hat{Y}(K_i)$  представлены в табл. 2 и 3. Константа равна 4,653.

Зависимой переменной является результативность формирования знаний контингента обучаемых  $Y$ , а предикторами в полученной линейной множественной регрессионной модели выступают  $Vo_{zr}$  – возраст,  $K_7$  – протанопия,  $K_8$  – дейтеранопия,  $K_9$  – тританопия,  $K_{14}$  – вербальный интеллект,  $K_{15}$  – обобщение,  $K_{16}$  – классификация,  $K_{17}$  – аналитичность,  $K_{18}$  – арифметический счёт,  $K_{19}$  – комбинаторика,  $K_{20}$  – мнемоника и память,  $K_{21}$  – плоскостное мышление,  $K_{22}$  – объёмное воображение,  $K_{23}$  – вербальная ассоциативность,  $K_{24}$  – вербальная оригинальность,  $K_{25}$  – вербальная селективность,  $K_{27}$  – образная ассоциативность,  $K_{28}$  – образная оригинальность,  $K_{29}$  – образная селективность,  $K_{45}$  – уровень владения языком изложения.

Тогда уравнение множественной регрессии имеет вид

$$Y = 4,653 - 0,006 Vo_{zr} - 0,002 K_7 - 0,156 K_8 + 0,121 K_9 + 0,064 K_{14} - 0,029 K_{15} + 0,006 K_{16} - 0,074 K_{17} + 0,025 K_{18} - 0,009 K_{19} - 0,026 K_{20} + 0,001 K_{21} + 0,035 K_{22} + 0,013 K_{23} + 0,009 K_{24} - 0,008 K_{25} - 0,111 K_{27} - 0,008 K_{28} + 0,032 K_{29} + 0,022 K_{45}.$$

ТКМ позволяет реализовать дополнительный контур адаптации на основе блока параметрических КМ, а также провести комплексный системный анализ ИОС, направленный на повышение эффективности информационного взаимодействия между субъектами и средствами обучения, увеличение результативности технологического процесса формирования знаний обучаемых в процессе функционирования системы АДО.

Таблица 1

## Результаты первичного статистического анализа результативности обучения

Показатель	Номер группы обучаемых							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Показатели результативности обучения за 2004 г.								
Объём выборки	20	21	25	18	18	15	0	0
Средний балл $Y_1$	4,05	4,286	4,24	4,611	4,056	4,4	–	–
СКО среднего балла	0,686	0,845	0,779	0,502	0,802	0,507	–	–
Показатели результативности обучения за 2005 г.								
Объём выборки	24	22	24	25	24	22	23	21
Средний балл $Y_2$	4,333	4,046	4,375	4,16	4,042	4,091	4,696	4
СКО среднего балла	0,817	0,785	0,824	0,8	0,859	0,811	0,559	0,894
Показатели результативности обучения за 2006 г. (с исп. ТКМ в 3 группах)								
Объём выборки	26	23	29	24	25	22	22	22
Средний балл $Y_3$	4,5	4,609	4,379	3,708	3,92	3,773	4,455	3,818
СКО ср. балла	0,707	0,656	0,775	0,751	0,572	0,612	0,858	0,853
Итоги первичного статистического анализа								
Показатели, отражающие изменение эффективности обучения за 2004/2005 гг., %								
$k_1$	0,283	–0,240	0,135	–0,451	–0,014	–0,309	–	–
$k_2$	1,07	0,944	1,032	0,902	0,997	0,93	–	–
$k_3$	6,996	–5,606	3,184	–9,781	–0,345	–7,023	–	–
Изменение СКО	0,131	– 0,06	0,045	0,298	0,057	0,304	–	–
Показатели, отражающие изменение эффективности обучения за 2005/2006 гг., %								
$k_1$	0,167	0,563	0,004	–0,452	–0,122	–0,318	–0,241	– 0,182
$k_2$	1,039	1,139	1,001	0,891	0,97	0,922	0,949	0,955
$k_3$	3,854	13,915	0,091	–10,865	–3,018	–7,773	–5,132	– 4,55
Изменение СКО	– 0,11	–0,129	–0,049	–0,049	–0,287	–0,199	0,299	– 0,041

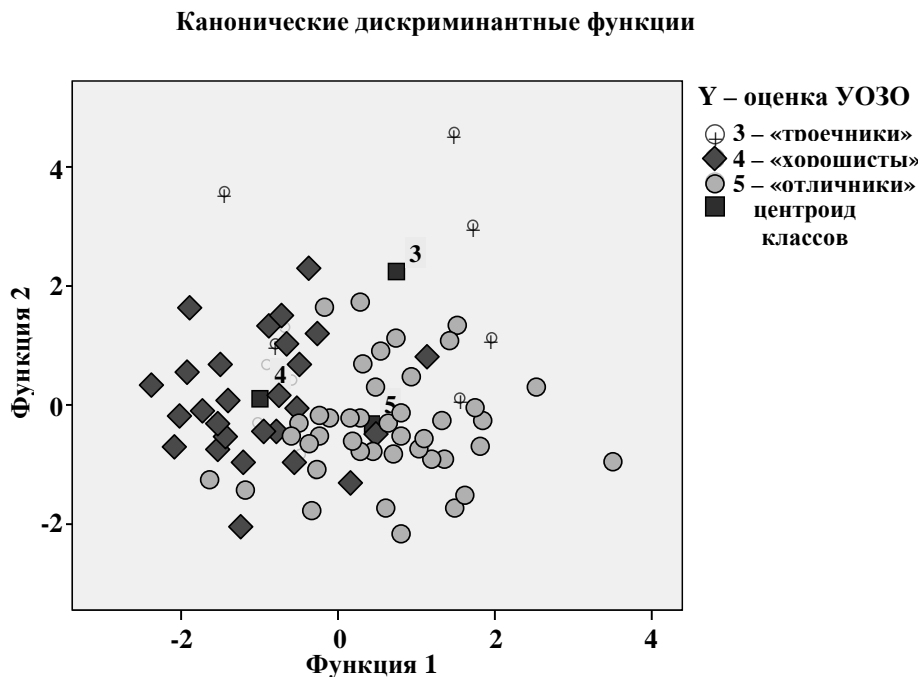
Таблица 2

Значения исходных  $\beta$  и стандартизованных коэффициентов  $\beta'$ 

Предикатор	$Vozr$	$K_7$	$K_8$	$K_9$	$K_{14}$	$K_{15}$	$K_{16}$	$K_{17}$	$K_{18}$	$K_{19}$
Значение исходного коэффициента $\beta$	–0,006	–0,002	–0,156	0,121	0,064	–0,029	0,006	–0,074	0,025	–0,009
Стандартизованный коэффициент $\beta'$	–0,017	–0,010	–0,714	0,611	0,247	–0,104	0,034	–0,262	0,159	–0,052

Таблица 3

Предикатор	$K_{20}$	$K_{21}$	$K_{22}$	$K_{23}$	$K_{24}$	$K_{25}$	$K_{27}$	$K_{28}$	$K_{29}$	$K_{45}$
Значение исходного коэффициента $\beta$	–0,026	0,001	0,035	0,013	0,009	–0,008	–0,111	–0,008	0,032	0,022
Стандартизованный коэффициент $\beta'$	–0,147	0,002	0,182	0,052	0,052	–0,113	–0,226	–0,018	0,172	0,037



**Рис. 10. Центроиды трёх классов обучаемых в пространстве двух канонических функций**

В ходе дискриминантного анализа выделено несколько групп обучаемых (в зависимости от динамики значений показателя результативности обучения) (оценки УОЗО): «5» – группа отличников; «4» – группа хорошистов; «3» – группа троечников.

На рис. 10 показана геометрическая интерпретация взаимного расположения центроидов классов, выделенных групп обучаемых в пространстве двух дискриминантных функций.

Информативность канонических дискриминантных функций примерно одинакова, а их разрешающая способность существенно дифференцируется по отношению к центроидам классов: первая каноническая дискриминантная функция различает центроиды классов троечников и хорошистов относительно центроида класса отличников, но плохо различает между собой центроиды классов троечников и хорошистов; вторая каноническая дискриминантная функция различает центроиды классов хорошистов и отличников относительно центроида класса троечников, но плохо различает между собой центроиды классов хорошистов и отличников.

Комплекс программ позволяет реализовать автоматизацию исследования и системного анализа ИОС, информационного взаимодействия между субъектами и средствами обучения, а также существенно повысить эффективность функционирования САО со свойствами адаптации на основе блока параметрических КМ.

#### **Библиографические ссылки**

1. **Ветров А.Н., Ветров Н.А.** Факторы успеха в образовательной деятельности ВУЗа: Тенденции развития информационной среды дистанционного: Моногр. / Под ред. чл.-корр. МАН ВШ И.Н. Захарова. СПб.: МБИ, 2004. С. 54–65.
2. **Ветров А.Н., Котова Е.Е.** Факторы успеха в образовательной деятельности вуза: Когнитивная модель для адаптивных систем дистанционного обучения: Моногр. / Под ред. чл.-корр. МАН ВШ И.Н. Захарова. СПб.: МБИ, 2004. С. 65–78.
3. **Ветров А.Н., Ветров Н.А.** Особенности структуры информационной среды адаптивных систем ДО. Актуальные проблемы экономики и новые технологии преподавания: материалы IV междунар. науч.-практ. конф., г. С.-Петербург, 15–16 марта 2005 г. СПб.: МБИ, 2005. С. 45–46.
4. **Ветров А.Н., Котова Е.Е., Кузьмин Н.Н.** Информационная среда автоматизированного обучения на основе когнитивных моделей // Известия Междунар. академии наук ВШ. №3(37). М.: МАН ВШ, 2006. 18 с.
5. **Ветров А.Н.** Среда автоматизированного обучения со свойствами адаптации на основе когнитивных моделей: Моногр. М.: Деп. РАО, 2007. 256 с.
6. **Ветров А.Н.** Программный комплекс для исследования адаптивной информационно-образовательной среды на основе когнитивных моделей. Современное образование: содержание, технологии, качество: материалы XIII междунар. науч.-практ. конф., г. С.-Петербург, 19 апреля 2007 г.. СПб.: СПбГЭТУ, 2007. С. 142–144.
7. **Ветров А.Н.** Адаптивное средство обучения в автоматизированной образовательной среде на основе блока параметрических когнитивных моделей. Управ-

ление качеством в современном вузе: материалы V междунар. науч.-метод. конф., г. С.-Петербург, 21–22 июня 2007 г.. СПб.: МБИ, 2007. С. 110–113.

8. **Ветров А.Н.** Методики и алгоритмы в основе технологии когнитивного моделирования. Управление качеством в современном вузе: материалы V междунар. науч.-метод. конф., г. С.-Петербург, 21–22 июня 2007 г. СПб.: МБИ, 2007. С. 86–89.

9. **Ветров А.Н.** Реализация адаптивного обучения в автоматизированной образовательной среде на основе когнитивных моделей. Вып. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. 9 с.

10. **Ветров А.Н.** Электронный учебник на основе процессора адаптивной репрезентации информационных фрагментов в автоматизированной образовательной среде. М.: Машиностроение, 2008. ВКИТ № 11. Деп. ВИНТИ РАН. 15 с.

11. **Ветров А.Н.** Технология когнитивного моделирования в автоматизированной образовательной среде // Вестник РУДН. 2008. № 4. Деп. во ВИНТИ РАН. 2008. 15 с.

12. **Ветров А.Н.** Исследование среды автоматизированного обучения со свойствами адаптации на основе когнитивных моделей. Отчёт по НИР. СПб., 2007. 300 с.

УДК 519.866

**Л.В. Степанов**, канд. техн. наук, доц.  
(Институт менеджмента, маркетинга и финансов, г. Воронеж)

StepanovLV@yandex.ru

### ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОВЕРШЕННОЙ КОНКУРЕНЦИИ

*Выявлены особенности совершенной конкуренции. Выполнен обзор технологий нейронных сетей. Определено направление создания нейронной системы, учитывающей все особенности совершенной конкуренции. Предложена архитектура нейронной сети производственного сегмента рынка и всей нейронной системы рынка в целом.*

**Ключевые слова:** конкуренция, совершенная конкуренция, модель рынка, нейронные сети

*Perfect competition features are revealed. Neural network technology survey is perform. Neural network creature direction taking account the whole of perfect competition features is defined. Neural network architecturt for market production segment and market neural system as a whole is proposed.*

**Key words:** competition, perfect competition, market model, neural networks.

**Введение.** Рынок состоит из большого числа независимых элементов, самостоятельно определяющих тактику и стратегию своего поведения. В условиях равной осведомлённости каждый из участников рыночного процесса стремится максимизировать свою выгоду, но с учётом аналогичных целей других предприятий. Взаимодействие предприятий в условиях совершенной конкуренции можно рассматривать с различных точек зрения: с позиции каждого предприятия-производителя при решении задачи реализации своей производимой продукции (задача 1); с позиции каждого отдельного вида товара на рынке (задача 2); с позиции общего состояния конкурентного процесса на рынке в целом (задача 3).

В первом случае необходимо рассматривать виртуальный уровень конкуренции, т. е. состояние субъекта и его взаимодействия, без учёта выпускаемого им товара, во втором случае – уровень реальной конкуренции, т. е. совокупные характеристики товара, без учёта того, кем он произведён. Третий вариант основан на поиске оптималь-

ного («устраивающего» всех производителей и потребителей) состояния рынка в целом. Именно такой вариант является наиболее общим.

Определим эти направления рассмотрения как задачи, которые должны быть решены в результате моделирования рынка совершенной конкуренции.

Основные перспективы использования теории нейронных сетей связаны с решением сложных практических задач. В связи с этим их использование для моделирования конкуренции вполне обоснованно. Начало современным моделям нейронных сетей было положено в работе У. Маккаллока и У. Питтса, в которой предпринята попытка эмулировать человеческие способности, классифицировать и распознавать образы. Дальнейшее развитие связано с работой Ф. Розенблатта [1]. Его модель была названа перцептроном. С начала 1980-х гг. начался новый виток развития моделей нейронных сетей, связанный с работами С. Гроссберга, Т. Кохонена, Д. Хопфилда и др. [2], а также влиянием развития оптических



технологий и СБИС [3], способных обеспечить реализацию новых архитектур на практике. Особый характер сложных проблем не позволяет создавать универсальные сети, вынуждая разрабатывать специализированные нейронные сети для каждой задачи. В настоящее время существует большое количество разнообразных типов сетей. Эти модели отличаются структурой связей, правилами определения весов или правилами обучения и программирования.

Анализ литературы [4–6] позволяет сделать вывод, что основное внимание авторов уделяется применению нейросетевых технологий в телекоммуникационных и других технических системах. Высокая эффективность нейронных технологий при решении задач адаптивного управления динамическими объектами может сделать их незаменимыми при создании новых поколений сетей мобильной связи и других беспроводных сетей. Актуальность исследований искусственных нейронных сетей подтверждается многообразием их возможных применений.

Современные ЭВМ превосходят человека по способности производить числовые и символьные вычисления. Однако, если задача выходит за рамки простых вычислительных операций и затрагивает сферы анализа и обобщения информации, компьютерная техника демонстрирует свою несостоятельность по сравнению с человеком. Причина столь значительного различия в их производительности заключена в том, что архитектура биологической нейронной системы совершенно не похожа на архитектуру машины фон Неймана, а это существенно влияет на типы функций, которые более эффективно исполняются каждой из моделей.

Нейронная сеть — это сеть с конечным числом слоев из однотипных элементов — аналогов нейронов с различными типами связей между слоями. При этом число нейронов в слоях выбирается исходя из необходимости обеспечения заданного качества решения задачи, а число слоев нейронов — как можно меньшее для сокращения времени решения задачи.

Хотя один нейрон и способен выполнять простейшие процедуры распознавания, сила нейронных вычислений проистекает от соединений нейронов в сетях.

Исследований возможности применения нейросетевых технологий в сфере организационного управления и экономических системах крайне мало. Это делает особенно актуальным построение модели совершенной конкуренции в условиях рыночной экономики с использованием базовых положений данной технологии.

Искусственный нейрон имитирует свойства биологического нейрона. На вход искусственного нейрона поступает некоторое множество сигна-

лов, каждый из которых является выходом другого нейрона. Каждый вход умножается на соответствующий вес, аналогичный синаптической силе, и все произведения суммируются, определяя уровень активации нейрона. Множество  $H$  входных сигналов поступает на искусственный нейрон. Эти входные сигналы соответствуют сигналам, приходящим в синапсы биологического нейрона. Каждый сигнал умножается на соответствующий вес  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_l$  и поступает на суммирующий блок  $\Sigma$ . Каждый вес соответствует «силе» одной биологической синаптической связи. Множество весов в совокупности обозначается вектором  $\Omega$ . Суммирующий блок, соответствующий сине, складывает взвешенные входы алгебраически, создавая выход  $\psi$ :

$$\psi = \sum_{k=1}^l h_k \omega_k, \quad (1)$$

Сигнал  $\psi$  далее преобразуется активационной функцией  $F$  и даёт выходной нейронный сигнал  $\Psi$ :

$$\Psi = F(\psi). \quad (2)$$

Таким образом, работа искусственного нейрона сводится к преобразованию входного вектора  $H$  в некоторое значение функции  $\Psi$  на выходе.

Применим данную концепцию к условиям совершенной конкуренции.

Каждый товар имеет множество ценовых параметров. Следовательно, этот факт можно отразить одним нейроном (рис. 1).

Правомочность суммирующего блока  $g$  подтверждается тем, что все учитываемые параметры товара  $t_k$  носят ценовой характер. Неценовые параметры товара в условиях совершенной конкуренции не учитываются.

Однако на рынке независимо функционирует  $m$  производителей, которые выпускают одинаковый ассортимент стандартизованного товара. Таким образом,  $k$ -й товар у разных производителей имеет одинаковый набор параметров  $\{h^1_k, \dots, h^y_k, \dots, h^w_k\}$ . В этом случае каждый товар будет описы-

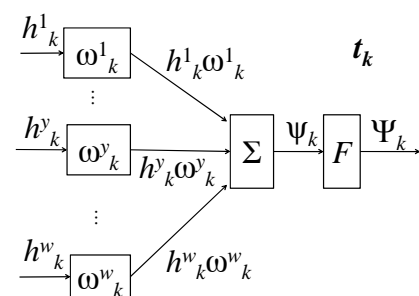


Рис. 1. Искусственный нейрон  $k$ -го товара

ваться вектором характеристик, число которых будет равно числу производителей на рынке.

Для получения этих характеристик необходимо построить нейронную сеть и определить оптимальное число скрытых слоев и число нейронов в них.

Непрерывная функция может быть аппроксимирована с высокой точностью нейросетью с единственным слоем, но неограниченным числом нейронов. Практически реализовать такую сеть невозможно. При ограничении числа нейронов возрастает ошибка сети. Это может потребовать её периодического переобучения. Нейросеть со скрытым слоем обладает лучшей способностью к обобщению при ограниченном числе нейронов, но процесс её обучения становится сложнее. С одной стороны, слишком малое количество скрытых нейронов приводит к недостаточной способности сети к обобщению. С другой – слишком большое количество скрытых нейронов способствует увеличению времени обучения и времени реакции (отклика) обученной сети. Предложено значительное количество методов, позволяющих определить число скрытых нейронов. Часть из них основана на том, что скрытые нейроны добавляются во время процесса обучения, другие методы, наоборот, используют удаление их в ходе этого процесса [7, 8].

С учётом особенностей решаемой задачи предлагается для выбора архитектуры сети руководствоваться требованиями точности функционирования сети, а также сложности и протяжённости процесса её обучения.

В силу того что все учитываемые параметры товара  $t_k$  носят ценовой характер, в качестве активационной функции может быть выбрана линейная зависимость между выходом и входами

нейрона. Это обосновывается тем, что характеристика  $k$ -го товара у  $j$ -го производителя может линейно изменяться при соответствующем изменении входного вектора параметров. Однако в этих условиях может возникать дополнительная неточность при отклонении входных значений от величин обучающей выборки. Если некоторая неточность допустима, то предлагается представить  $k$ -й товар всех производителей однослойной нейронной сетью  $NS_k$  с линейной активационной функцией (рис. 2).

В нейронной сети вектор  $\{\Psi_{1k}, \dots, \Psi_{jk}, \dots, \Psi_{mk}\}$  представляет собой взвешенные характеристики  $k$ -го товара всех производителей. Число нейронов равно числу производителей. Такая сеть обеспечит высокую скорость реакции и обучения, но даст некоторую неточность выходных параметров, особенно когда в качестве входных параметров ей предъявляются значения, не использованные в процессе обучения. Если требуется высокая точность и допустимо большее время на реакцию и обучение сети, предлагается двухслойная нейронная сеть с нелинейной активационной функцией.

В нейронной сети (рис. 3) вектор  $\{\Psi_{1k}, \dots, \Psi_{jk}, \dots, \Psi_{mk}\}$  также представляет собой взвешенные характеристики  $k$ -го товара всех производителей. Число нейронов скрытого слоя равно числу характеристик  $k$ -го товара, а количество нейронов выходного слоя равно числу производителей. Такая сеть обеспечит достаточно высокую точность выходных параметров для рассматриваемой проблемы.

Однако для решения поставленных выше задач моделирования рынка совершенной конкуренции недостаточно, поэтому предлагается создать нейронную систему.

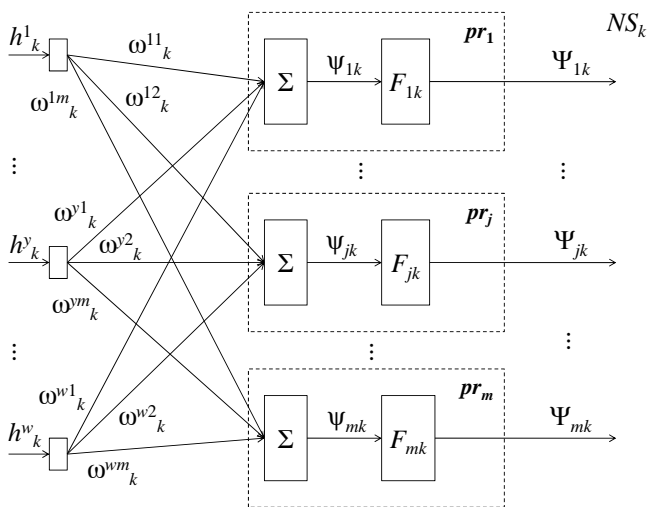


Рис. 2. Искусственная нейронная сеть  $NS_k$   $k$ -го товара с линейной функцией

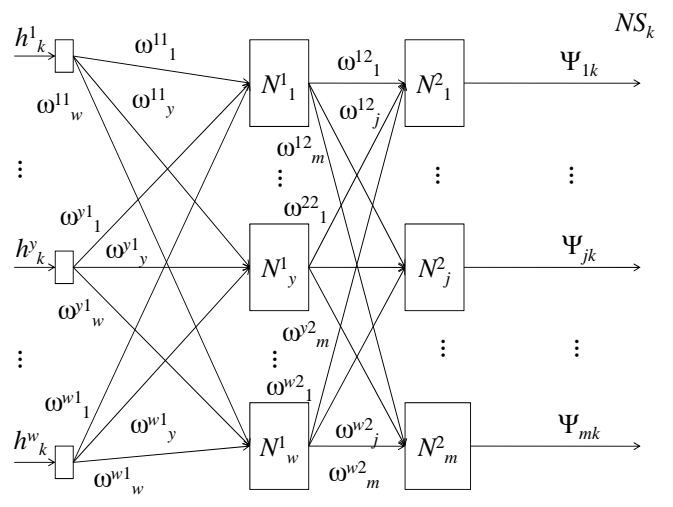


Рис. 3. Искусственная нейронная сеть  $NS_k$   $k$ -го товара с нелинейной функцией

Под нейронной системой рынка совершенной конкуренции будем понимать совокупность взаимосвязанных реально или условно по выходам и (или) входам нейронных сетей сегментов рынка, объединённых в единую структуру.

В этой системе выделим две подсистемы:  
 производственный сегмент – подсистема производителей товара;  
 потребительский сегмент – подсистема потребителей товара.

На рынке  $R$  независимо функционирует  $m$  производителей  $l$ -го количества товаров. Тогда производственный сегмент рынка можно представить совокупностью из  $l$  независимых нейронных сетей (рис. 4).

Таким образом, первый слой нейронных сетей производственного сегмента рынка представляет собой подсистему нейронной системы. Полученное множество векторов  $\{\{\Psi\}_1, \dots, \{\Psi\}_k, \dots, \{\Psi\}_l\}$  отражает совокупную характеристику всех товаров всех производителей. Общий объём множества равен  $l \times m$ .

Однако такой вариант рассмотрения рыночного процесса не позволяет охарактеризовать каждый товар или каждого производителя в целом.

Дополним производственную подсистему нейронной системы рынка вторым слоем. Причём этот слой должен иметь два уровня, обеспечивающих независимое решение задач 1 и 2.

Рассмотрим уровень общения характеристик производителей (задача 1) (рис. 5). Слой состоит из  $m$  нейронов. Каждый нейрон этого слоя представляет собой производителя товара  $pr_j$ . Данный слой связывает независимые нейронные сети пре-

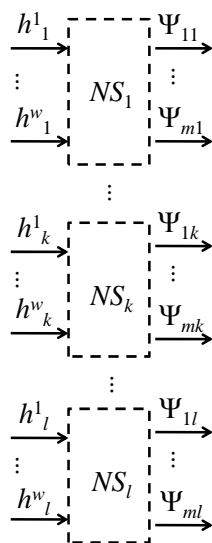


Рис. 4. Искусственные нейронные сети первого слоя нейронной системы

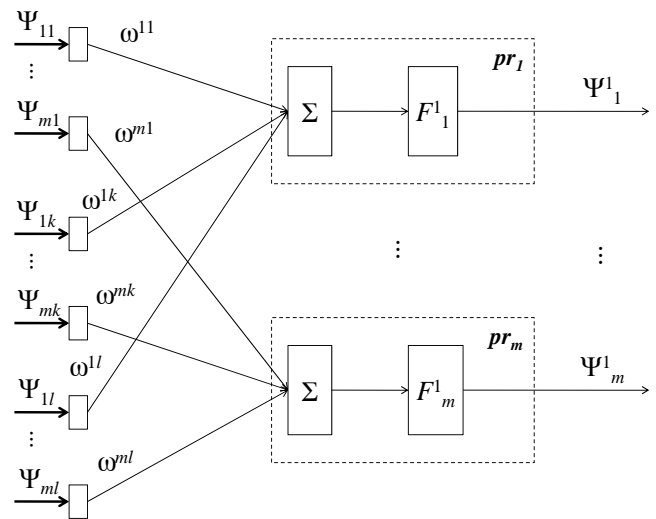


Рис. 5. Искусственная нейронная сеть первого уровня второго слоя

дыдущего слоя системы в единую структуру. Задача слоя состоит в объединении отдельных характеристических величин по признаку производителя товара.

Таким образом, из  $l \times m$  характеристических величин  $\Psi$  получаем  $m$  выходов  $\Psi^1$ . Причём,  $\Psi^1_j$ , являющаяся характеристикой  $j$ -го производителя на рынке  $R$ , фактически представляет собой взвешенную величину, которая учитывает параметры других участников рынка. Особо следует отметить, что значения весовых коэффициентов из вектора  $\Omega$  позволят учесть влияние товаров из множества товаров  $T$ , если они для данного производителя имеют различную значимость.

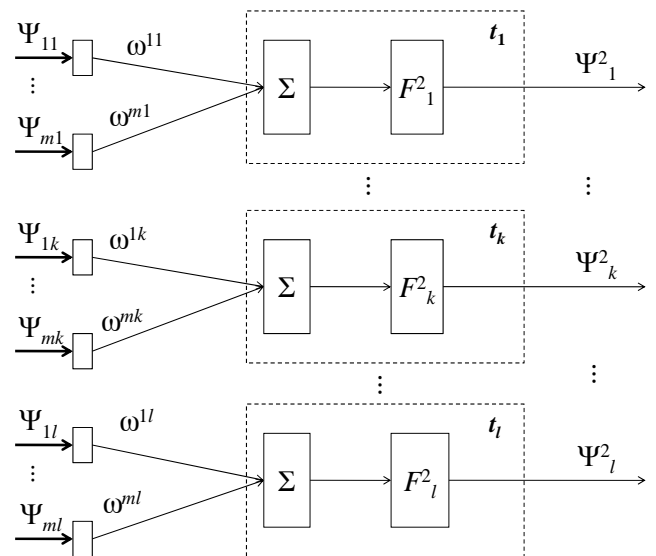


Рис. 6. Искусственная нейронная сеть второго уровня второго слоя

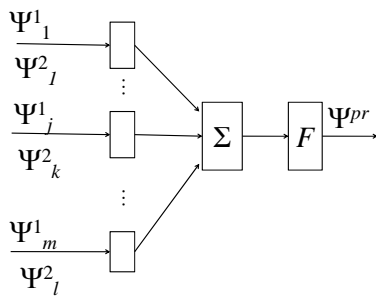


Рис. 7. Искусственный нейрон *k*-го товара

По аналогии с первым уровнем второго слоя второй уровень второго слоя предлагается представить из *l* нейронов (рис. 6). Каждый нейрон представляет собой товар  $t_k$ .

Таким образом, *l* выходов  $\Psi^2_k$  являются характеристиками каждого из товаров рынка, что соответствует решению задачи 2, поставленной выше. Особо следует отметить, что значения весовых коэффициентов позволят учесть влияние производителей, если они для данного товара имеют различную значимость.

Для решения задачи 3 необходимо обобщить отдельные характеристические величины  $\Psi$  для получения единого параметра, описывающего всю производственную подсистему в целом. Для этой цели необходим третий слой, состоящий из

одного нейрона. Причём совокупный показатель можно формировать как на основе характеристик  $\Psi^1$ , так и на основе  $\Psi^2$  (рис.7). Величина  $\Psi^{pr}$  является характеристикой состояния всего производственного сегмента рынка.

На рис. 8 представлена сложная архитектура производственной подсистемы нейронной системы рынка. Аналогично можно построить архитектуру нейронной подсистемы потребительского сегмента рынка. В результате нейронная система рынка будет иметь вид, представленный на рис. 9.

Совокупность векторов характеризует состояние рыночного процесса в условиях совершенной конкуренции. При этом характеристики производственного и потребительского сегмента представляют собой агрегированные величины, полученные на основе векторов характеристик товара. Эти векторы соответствуют виртуальному и реальному уровню конкуренции на рынке, а также тому, какой из этих уровней рассматривается в реальной ситуации.

**Заключение.** Общие характеристики производственного сегмента и потребительского сегмента, полученные с помощью третьего слоя, позволяют судить о состоянии рынка в целом. При равенстве их значений состояние рынка можно считать равновесным. Однако в силу большого (бесконечно большого) числа участников рыночного процесса, такую ситуацию можно считать идеальной. Для реализации механизмов памяти в процессе дли-

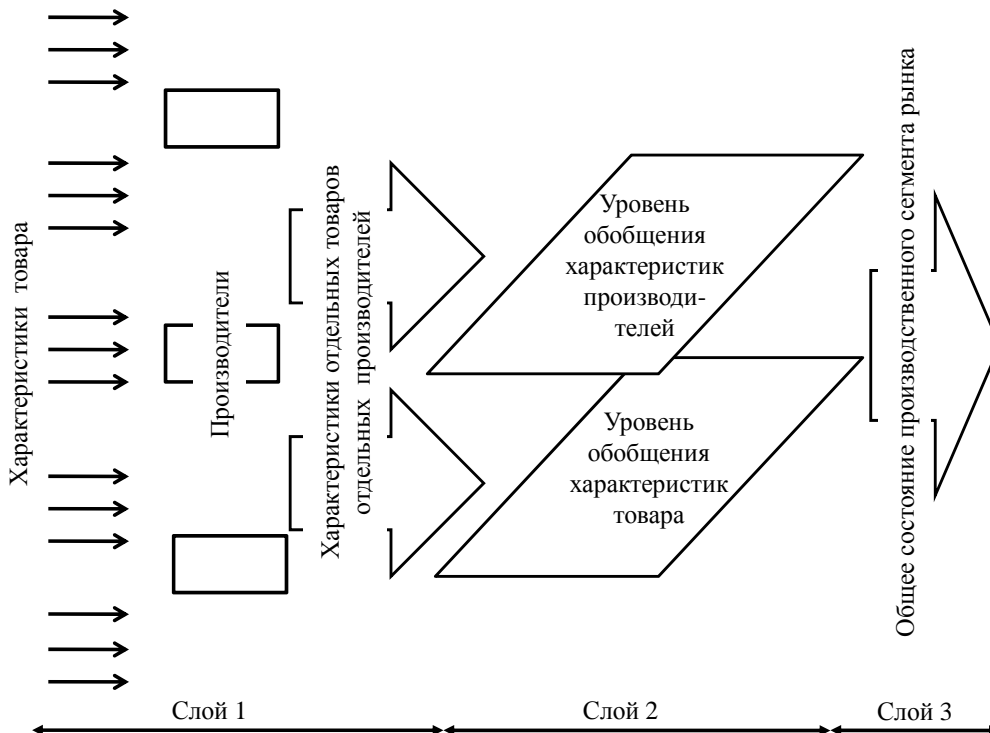


Рис. 8. Обобщённая архитектура производственного сегмента рынка нейронной системы

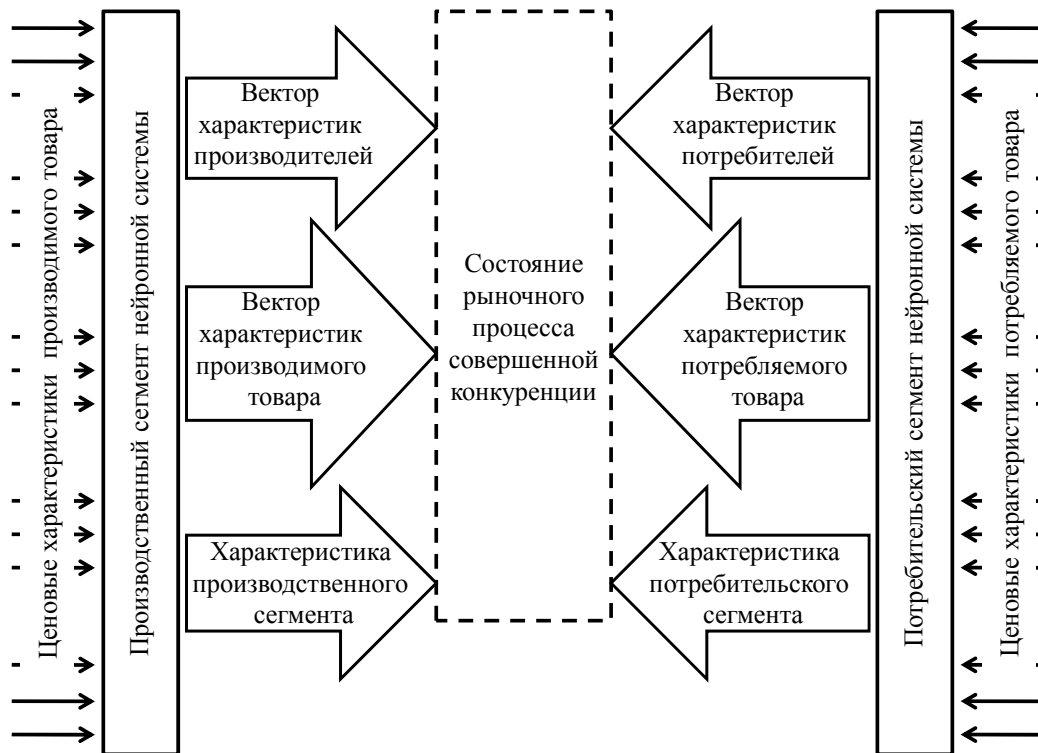


Рис. 9. Нейронная система рынка

тельной эксплуатации следует проверять правильность функционирования системы. При отклонении характеристических значений необходимо проводить переобучение нейронных сетей.

Предложенная архитектура зависит от изменения числа товаров или субъектов на рынке. Однако характер связей нейронов не является сложным и может быть легко изменён. Число уровней системы при любом числе субъектов неизменно.

#### Библиографические ссылки

1. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики (перцептроны и теория механизмов мозга). М.: Мир, 1965. 175 с.
2. Hopfield J., Tank D. Neural computation of decision in optimization problems, Biol. Cybernet, 1985. Vol. 52. P. 141–152.
3. Бубеников А.Н. Архитектурно-технологический облик интеллектуальных нейронных сетей на кремниевых пластинах и трехмерных нейрокомпьютеров // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 4. С. 34–51.
4. Галушкин А.И., Крысанов А.И. Оценка производительности нейрокомпьютеров // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 4. С. 22–33.
5. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Пер. с англ. М.: Мир, 1992. 240 с.
6. Ли У. Техника подвижных систем связи / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. 391 с.
7. He G., Tang P., Pang X. Neural Networks Approaches to Implementation of Optimum Multiuser Detection in CDMA Channels, Intl. Journ. Of Electronics, 1996. Vol. 80. P. 425–431.
8. Галушкин А.И. Современные направления развития нейрокомпьютеров в России // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 4. С. 3–17.

## Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присылаемых для публикации,  
можно найти на сайте [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)

УДК 658.512.011.56

Н.А. Лучкин, А.Г. Янишевская, канд. техн. наук, доц.  
(Омский государственный технический университет)

anna-yanish@mail.ru

## СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА

*Предложен подход к созданию системы автоматизированного проектирования технологических процессов в промышленности, в частности транспортировки газа, отражающий идею структурно-функциональной декомпозиции.*

**Ключевые слова:** автоматизация предприятия, математическое моделирование, интегрированная производственная система.

*Approach to automatic designing system creature of the industry technological processes, gas transportation in particular, reproducing structural-functional decomposition idea is proposed.*

**Key words:** enterprise automation, mathematical modeling, integrated production system.

Создание систем автоматизированного проектирования является сложным видом деятельности, который требует применения методов, связанных с математическим описанием процессов, математическим моделированием и использованием информационных технологий. Программные средства автоматизации проектирования позволяют создать:

программы для моделирования процессов производства изделий;

универсальные средства, предназначенные для изготовления чертежей;

программные средства автоматизации расчётных работ;

интегрированные системы автоматизации проектирования.

В настоящее время разработано большое количество мощных дорогостоящих систем автоматизированного проектирования (САПР) различного назначения. Однако, как показывает опыт применения подобных систем, возможности их остаются недоиспользованными, поскольку у проектировщиков нет времени на их освоение.

Одним из основных результатов исследований явилось представление модели расширенной производственной системы (рис. 1).

В реальных условиях схема удовлетворения потребностей рынка сложнее, и она может включать жизненный цикл изделия CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support – поддержка жизненного цикла изделия). Кроме производственного цикла, существенную роль играют циклы распределения, потребления и утилизации отходов. Совокупность всех этих производств образует единую производственную сеть для удовлетворения рассматриваемой потребности рынка.

Понятия изделия и его жизненного цикла являются центральными в рассматриваемой концепции. Они лежат в основе анализа организационной структуры производственной системы, а также методологии создания новых видов сложной продукции. Более того, рассматривая сложное изделие как систему, можно в рамках общего подхода применить задачу построения методологии проектирования, внедрения и сопровождения производственных систем.

В настоящее время всё большее распространение получает концепция управления предприятием на основе понятия жизненного цикла изделия. Жизненный цикл изделия имеет определённую структуру, т. е. он разбивается на ряд отрезков. Для каждого вида изделий могут существовать свои варианты разбиения циклов.

Детальная разработка открытой производственной системы является результатом исследований. Рассмотрим один из таких вариантов. Жизненный цикл разбивается на ряд фаз, каждая из которых решает свои специфические задачи в общем процессе создания изделий. Фазы могут частично перекрываться, что соответствует естественному ходу событий, и, кроме того, позволяют сократить сроки создания изделия.

Предлагаемый вариант декомпозиции процесса жизненного цикла изделия включает следующие фазы:

анализ и предпроектное исследование потребности в изделии;

проектирование изделия;

техническая подготовка производства изделия;

производство изделия;

продвижение изделия к потребителю;

использование и утилизация изделия.



Рис. 1. Модель расширенной производственной системы, замкнутой на рынок

Разбиение на фазы позволяет произвести в первом приближении декомпозицию задачи управления жизненным циклом изделия. Однако этого недостаточно для определения функциональной структуры предприятия, постоянно создающего новые изделия. Необходима дополнительная декомпозиция по функциям управления жизненным циклом (рис. 2).

В функции управления жизненным циклом входят элементы, представленные на рис. 2. Каждая функция имеет свою интерпретацию для соответствующей фазы. Так, например, функция изготовления в фазе технической подготовки может включать изготовление опытного образца, а в фазе производства – выпуск деталей, сборочных

единиц и серийных машин. Соответственно в этих двух фазах существенно различаются требования к уровню автоматизации, методы планирования и др. В результате получается матрица задач «функция–фаза», которая фактически определяет матричную структуру предприятия.

На следующем уровне декомпозиции можно рассматривать разбиение фаз на более мелкие этапы и (или) уточнить список функций. В результате получается новый набор матриц. Подобная процедура декомпозиции носит регулярный характер, что позволяет упорядочить процесс построения организационной структуры предприятия и структурировать управление жизненным циклом.

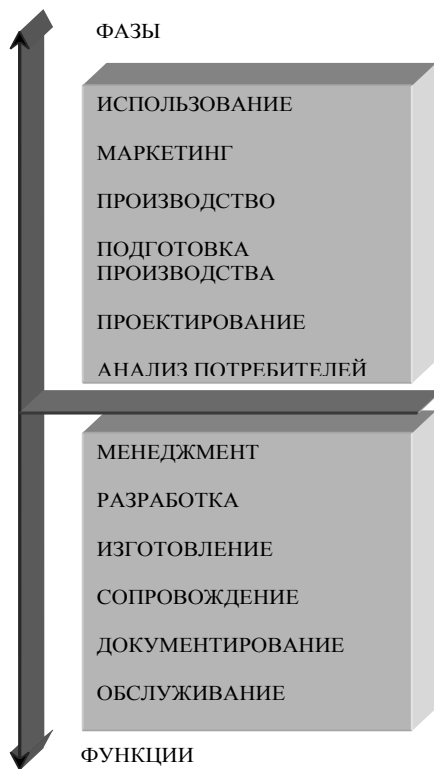


Рис. 2. Модель «функция–фаза»

Автоматизированное проектирование технологических процессов (ТП), особенно деталей сложной конструкции и ответственного назначения, способствует сокращению сроков и снижению материальных и трудовых затрат как при технологической подготовке производства, так и при основном производстве. Высокий уровень и комплексность автоматизации проектирования обеспечиваются применением рациональных расчётных методов и процедур. В свою очередь, это необходимо для создания САПР ТП.

Под интегрированной производственной системой понимается система, которая ориентирована на выпуск именно изделий и поддерживает полный жизненный цикл выпускаемых изделий от момента возникновения потребности в новом изделии до использования его потребителем [1].

В настоящее время интегрированную производственную систему можно представить в виде теоретической модели компьютеризированного интегрированного производства:

$$\forall a \exists u \{ [A(a_1, a_2, \dots, a_n) \rightarrow P(u_1, u_2, \dots, u_m)] \vee [A(a_1, a_2, \dots, a_n) \vee P(u_1, u_2, \dots, u_m)] \}, \quad (1)$$

где  $a$  – предметная постоянная, отражающая технологический элемент производственного процесса;  $u$  – предметная постоянная, отражающая состав тех-

нологического оборудования и оснастки;  $A(a_1, \dots, a_2, \dots, a_n)$  – предикат состава технологического оборудования и оснастки;  $P(u_1, \dots, u_2, \dots, u_m)$  – предикат производственного процесса изготовления изделия.

На промышленном предприятии, использующем сложную технологию изготовления изделия или транспортировки продукции, производство, как правило, функционирует по технологическому принципу.

Производство с учётом конструкторского состава изделия может быть описано выражением

$$\forall a_1, \forall a_2, \dots, \forall a_1, \forall a_2, \dots, \exists \{ [A(a_1, a_2, \dots, a_n) \vee \dot{A}(\dot{a}_1, \dot{a}_2, \dots, \dot{a}_k)] \rightarrow P(u_1, u_2, \dots, u_m) \}. \quad (2)$$

Исключив в выражении (2) знак импликации, получим

$$\forall a_1, \forall a_2, \dots, \forall a_1, \forall a_2, \dots, \exists u \{ [\bar{A}(a_1, a_2, \dots, a_n) \& \dot{A}(\dot{a}_1, \dot{a}_2, \dots, \dot{a}_k)] \rightarrow P(u_1, u_2, \dots, u_m) \}, \quad (3)$$

где  $\dot{A}(\dot{a}_1, \dot{a}_2, \dots, \dot{a}_k)$  – предикат конструкторского состава изделия (2), аргументами которого служат технологические факторы, изменяющие технологический элемент производственного процесса (1).

Состав производства с учётом конструкторского состава изделия запишем через элементарные предикаты, отражающие его функциональную зависимость:

$$A(a_1, a_2, \dots, a_k) \Leftrightarrow [G(g_1, g_2, \dots, g_\alpha) \& B(h_1, h_2, \dots, h_\beta) \& C(i_1, i_2, \dots, i_\nu) \& D(m_1, m_2, \dots, m_\sigma) \& E(n_1, n_2, \dots, n_\xi) \& F(s_1, s_2, \dots, s_\zeta)], \quad (4)$$

где  $G(g_1, \dots, g_2, \dots, g_\alpha)$  – предикат состава технологического оборудования и оснастки, для которых требуется введение признака «уровень готовности»;  $B(h_1, \dots, h_2, \dots, h_\beta)$  – предикат нового технологического оборудования и оснастки, образованных по технологической необходимости;  $C(i_1, \dots, i_2, \dots, i_\nu)$  – предикат сборок, которые исключаются из состава технологического оборудования и оснастки как самостоятельные единицы;  $D(m_1, \dots, m_2, \dots, m_\sigma)$  – предикат, учитывающий замену материала для изделия в силу экономико-производственной необходимости;  $E(n_1, \dots, n_2, \dots, n_\xi)$  – предикат вариантов исполнения технологического оборудования и оснастки, необходимость которых вызвана требованиями заказчика;  $F(s_1, \dots, s_2, \dots, s_\zeta)$  – предикат состава технологического оборудования и оснастки, учитывающий только номенклатуру нормализованных и стандартизованных деталей и узлов.



Конечно, в производстве другого предприятия могут появляться предикаты, отличные от рассмотренных (4).

Тогда формула (3) с учётом выражения (4) примет вид

$$\begin{aligned} &\forall a_1, \forall a_2, \dots, \forall a'_1, \forall a'_2, \dots, \exists u \{ A(a_1, a_2, \dots, a_n) \& \\ &\& [G(g_1, g_2, \dots, g_\alpha) \vee B(h_1, h_2, \dots, h_\beta) \vee \\ &\vee C(i_1, i_2, \dots, i_\nu) \vee D(m_1, m_2, \dots, m_\sigma) \vee \\ &\vee E(n_1, n_2, \dots, n_\xi) \vee F(s_1, s_2, \dots, s_\zeta) \rightarrow \\ &\rightarrow P(u_1, u_2, \dots, u_\mu) \}. \end{aligned} \tag{5}$$

Таким образом, состав производства с учётом конструкторского состава изделия имеет математическую зависимость (5).

Учитывая, что объём информации, содержащий сведения о составе сложного технологического оборудования и оснастки, является одним из наиболее крупных и постоянно используемых в решении задач автоматизации проектирования технологических процессов, проблема его минимизации становится весьма актуальной.

Множество, представляющее собой область рабочего поля магнитного носителя, на котором записан объединённый массив состава технологического маршрута производства, технологического оборудования и оснастки, можно выразить следующим неравенством:

$$M_{\sigma\mu} \Leftrightarrow M_\sigma \& M_\mu, \tag{6}$$

где  $M_\sigma$  – подмножество элементов поля состава технологического оборудования и оснастки;  $M_\mu$  – подмножество элементов поля технологического маршрута изготовления изделия в производстве.

Подмножество  $M_\sigma$  (6) выражается функциональной зависимостью

$$M_\sigma = Cf(A_i, A_\xi, W_\xi), \tag{7}$$

где  $A_i$  – шифр технологического оборудования и оснастки;  $A_\xi$  – шифр  $i$ -й оснастки, входящей в  $i$ -е технологическое оборудование;  $W_\xi$  – входимость  $j$ -й оснастки в  $i$ -е технологическое оборудование, шт.

Постоянная величина  $C$ , зависящая от принадлежности  $j$ -й оснастки или технологического оборудования к соответствующему виду (оригиналь-

ных, нормализованных, стандартизованных и т. д.), учитывает усреднённую значимость шифра соответствующего вида технологического оборудования и оснастки и зависит от шифра цеха:

$$C = f(P_v, Z_v),$$

где  $P_v$  – значимость шифра технологического оборудования и оснастки, принадлежащей к соответствующему виду;  $Z_v$  – значимость шифра цеха.

Подмножество поля  $M_\mu$  можно записать как

$$M_\mu = f(A_\xi, Z_{vj}, Z_{oj}) \text{ при } j \in (1, k),$$

где  $k$  – число этапов ( $Z_v \rightarrow Z_o$ ) маршрута движения  $i$ -го изделия;  $Z_v, Z_o$  – значимость шифра цеха и операций соответственно.

На множестве, представляющем собой объединённый массив состава технологического оборудования и оснастки и технологического маршрута движения изготовления изделия  $M_{\sigma\mu}$ , определим предикаты. Множество  $M_{\sigma\mu}$  назовём областью. Каждому предикату переменной  $F(X)$  можно поставить в соответствие множество элементов  $Y$  из области  $M_{\sigma\mu}$ . Каждому множеству  $M_\sigma$ , содержащемуся в  $M_{\sigma\mu}$ , можно поставить в соответствие предикат  $P(x)$ , представляющий собой истинное высказывание тогда и только тогда, когда  $x \in M_\sigma$ . Предикат принимает истинное значение И на подмножестве  $M_\sigma$  и ложное Л вне  $M_{\sigma F}$ , следовательно, подмножество  $M_\sigma = M_{\sigma F}$ . Это соответствие между подмножествами  $M_{\sigma\mu}$  и предикатами от одной переменной взаимно однозначно.

Аналогично доказательство и для подмножества  $M_\mu$ .

Выделим из области  $M_{\sigma\mu}$  поле  $M_\sigma$  (7) под файл состава технологического оборудования и оснастки с минимально допустимой частью рабочего поля магнитного носителя:

$$\begin{aligned} M_\sigma(x)_{\min} \Leftrightarrow & K_\xi(x) \& \{ A_i(x) \& [ [ A_\xi(x) \& W_{\xi i}(x) ] \vee \\ & \vee [ A_v(x) \& W_{vi}(x) ] \vee [ A_\zeta(x) \& W_{\zeta i}(x) ] ] \& R_j \} \end{aligned}$$

при  $x \in M_\sigma, A_\xi(x) \neq A_v(x) \neq A_\zeta(x), \Delta x = 0,$

где  $K_\xi(x)$  – предикат коэффициента заполнения поля магнитного носителя при записи;  $A_\xi(x), A_v(x), A_\zeta(x)$  – предикат значности шифра соответственно  $\xi$ -й – оригинального,  $v$ -й – нормализованного,  $\zeta$ -й – стандартизованного технологического оборудования и оснастки, зависящий от аргумента  $x$ ;  $W_{\xi i}(x),$

$W_{vi}(x)$ ,  $W_{\zeta i}(x)$  – предикат входимости в  $i$ -е технологическое оборудование и оснастку соответствующих видов  $\xi$ ,  $v$ ,  $\zeta$ -х единиц технологического оборудования и оснастки;  $R_j$  – ранг входимости  $j$ -й оснастки в  $i$ -е технологическое оборудование и оснастку;  $\Delta x$  – приращение шифра технологического оборудования и оснастки незначащими символами.

Выделим из области  $M_{\sigma\mu}$  максимально допустимую часть для файла  $M_{\sigma}$ :

$$M_{\sigma}(x)_{\max} \Leftrightarrow K_{\zeta}(x) \& \{A_i(x) [(A_{\xi}(x) \vee \Delta x_{\xi}) \& W_{\xi i}(x)] \vee [(A_v(x) \vee \Delta x) \& W_{vi}(x)] \vee [(A_{\zeta}(x) \vee \Delta x_{\zeta}) \& W_{\zeta i}(x)]\} \& R_j \}$$

$$\text{при } x \in M_{\sigma}, (A_{\xi}(x) \vee \Delta x_{\xi}) \Leftrightarrow (A_v(x) \vee \Delta x_v) \Leftrightarrow (A_{\zeta}(x) \vee \Delta x_{\zeta}),$$

где  $A_{\xi}(x)$ ,  $A_v(x)$ ,  $A_{\zeta}(x)$  – предикат предметного шифра соответствующих видов  $\xi$ ,  $v$ ,  $\zeta$ -х единиц технологического оборудования и оснастки.

Объём информации, записанной на магнитном носителе через максимально допустимые области, зарезервированные под эти цели, упрощает построение модели, так как файл формируется на магнитном носителе из эквивалентных длин шифров, приведённых к структуре предметного шифратора максимальной длины, принадлежащего одному из видов деталей. Однако это приводит к появлению пустых фрагментов на магнитном носителе и нерациональным затратам машинного времени.

Если обозначить элементарную часть приращения пустого поля на магнитном носителе подмножеством  $M_{\sigma\mu}$  через  $\Delta m$ , а пустые символы в шифре детали через  $\Delta x$ , то темп роста пустого поля можно определить из уравнения

$$T_{\xi}(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta x}.$$

Пустое поле магнитного носителя области множества  $M_{\sigma\mu}$  от файла состава технологического оборудования и оснастки можно выразить формулой

$$M_{\rho\sigma}^n = \int_{\xi=0} T_{\xi}(x) dx \text{ при } \xi \in \{0, n\}.$$

Таким образом, изменение структуры информации, записанной на магнитном носителе, со-

става технологического оборудования и оснастки должно сводиться к критериям:

обеспечения эквивалентности шифров всех единиц  $\xi$ ,  $v$ ,  $\zeta$  технологического оборудования и оснастки;

достижения такого состояния в заполнении рабочего поля магнитного носителя, при котором  $M_{\rho\sigma}$  стремилось бы к нулю.

С учётом изменения структур формируется импликационный шаблон-шифратор состава изделия, в котором предпосылкой служит предметный оптимизированный шифратор для оригинального технологического оборудования и оснастки, а следствием – абстрактный предметный шифратор на нормализованное и стандартизованное технологическое оборудование и оснастку [2].

Представим абстрактный предметный шифратор выражением

$$[A_{\xi}(x) \rightarrow F_v(x)] \& [A_{\zeta}(x) \rightarrow F_{\zeta}(x)], \quad (8)$$

где  $F_v(x)$ ,  $F_{\zeta}(x)$  – предикаты абстрактного и укороченного предметного шифра ( $v$ -го нормализованного и стандартизованного  $\zeta$ -го технологического оборудования и оснастки соответственно).

При соблюдении условия (8) файл состава технологического оборудования и оснастки  $M_{\sigma}$  будет располагать оптимальным объёмом информации:

$$M_{\sigma}(x)_{opt} \Leftrightarrow K_{\zeta}(x) \& \{A_i(x) \& [(A_{\xi}(x) \& W_{\xi i}(x)) \vee [(A_v(x) \vee \overline{\Delta x_v}) \& W_{vi}(x)] \vee [(A_{\zeta}(x) \vee \overline{\Delta x_{\zeta}}(x)) \& W_{\zeta i}(x)]] \& R_i\}. \quad (9)$$

Затем формируется изменённый шифратор состава технологического оборудования и оснастки.

Фактическое осуществление интеграции предполагает решение следующих комплексов задач: декомпозиции функций управления жизненным циклом изделия;

разработки организационной структуры и схемы взаимодействия подразделений;

построения конкретных методов решения частных задач (т. е. осуществления функций) управления жизненным циклом и их реализации.

Разработанная модель производственной системы нового поколения, в отличие от созданных ранее, учитывает технологический элемент про-

изводственного процесса и автоматизацию проектирования ТП на промышленном предприятии при следующих ограничениях:

сохранении функциональности подразделений;

минимизации связей между подразделениями;

постоянстве размеров подразделений (на каждом уровне иерархии) в разумных пределах для обеспечения управляемости;

обеспечении гибкости реорганизации.

Основными требованиями к автоматизации производственных систем являются:

охват функционально законченной системы в организационном, производственном и управленческом плане в соответствующей подсистеме, с тем чтобы уменьшить трудности её интеграции в реальный производственный процесс;

наличие развитой организационно-методической поддержки разработки, внедрения, обучения, использования и сопровождения;

открытость системы, т. е. для неё должен быть определён на программно-аппаратном уровне интерфейс, обеспечивающий её стыковку с другими автоматизированными системами;

присутствие регулярного механизма структурной, функциональной и параметрической настройки на конкретные условия применения;

обеспечение удобного для персонала интерфейса, рассчитанного на неподготовленного пользователя;

общение (диалог) системы с пользователем в терминах и понятиях предметной области, привычной для пользователя.

Рассмотренные выше понятия образуют концептуальную базу исследований по созданию компьютеризированных интегрированных производств. Следующим шагом является разработка их архитектуры.

Под архитектурой технической системы (в данном случае интегрированной производственной системы) понимается структурно-функциональная модель, описывающая:

элементы системы (подсистемы, комплексы задач и задачи);

функции элементов;

связи и взаимодействие (интерфейсы) элементов;

правила композиции элементов.

Важной особенностью архитектуры системы является то, что каждая выделяемая при её декомпозиции подсистема имеет конкретное функциональное назначение. Кроме того, уточнение

функции подсистемы достигается с помощью описания интерфейса подсистемы, т. е. полного набора её связей (материальных, информационных, алгоритмических и т. д.) с другими системами [3].

Подход, основанный на функциональной структуризации, имеет следующие основные преимущества:

особое внимание уделяется функциональному описанию системы, которое является наиболее важным и сложным при автоматизации проектирования систем, имеющих сложное поведение;

каждая функция выделяется как самостоятельная лишь в том случае, когда возможно её определение через чёткое и неоднозначное описание внешнего поведения компонента, реализующего данную функцию;

определяются предпочтительные варианты реализации системы, в которых граница между «реальными» подсистемами проходит по границе между подсистемами, выделенными в структурно-функциональной модели (таким образом, реализация сохраняет логическую структуру);

обеспечивается возможность распараллеливания системы на возможно более ранней стадии работ по её проектированию и реализации;

упрощается стыковка компонентов и комплексная отладка системы за счёт чётких требований к взаимодействию подсистем и компонентов;

облегчается развитие системы за счёт улучшения реализации, а также удаления (добавления) отдельных элементов при соблюдении их системных интерфейсов, при этом изменения всегда носят «локальный» характер.

Примером архитектуры сложной технической системы может служить модель соединения открытых систем, описывающая принципы иерархически-модульного проектирования процессов транспортировки газа.

#### *Библиографические ссылки*

1. **Багрецов С.А., Везиров В.Н. и др.** Технология синтеза организационных структур сложных систем управления. М.: ГУП ВИМИ, 1998. 153 с.

2. **Моисеев Н.Н.** Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1987. 200 с.

3. **Дмитриев А.Р., Мальцев П.А.** Основы теории построения и контроля сложных систем. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 391 с.

УДК 625.724

**Е.А. Аникеев**, канд. техн. наук, доц. (Воронежская государственная лесотехническая академия),  
**Д.В. Шекалев**, канд. техн. наук. (ООО «Инженерпроект», г. Воронеж)

EAnikeev@gmail.com

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ КРИВОЙ КРИВОЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА ДОРОГИ БЕЗ КРУГОВОЙ ВСТАВКИ

*Предложен способ построения переходной кривой криволинейного участка дороги, учитывающий особенности рельефа местности. Применение предлагаемого способа позволит проектировать более плавные по форме трассы.*

**Ключевые слова:** клотоида, моделирование, автомобильные дороги, переходная кривая.

*Construction method of the transition curve for curvilinear road section, taking into account country relief features, is proposed. Offered method application will permit to design road with more smooth forms.*

**Key words:** clotoid, modeling, main road, transition curve.

**Введение.** Значительное число криволинейных участков автомобильных дорог с преимущественно малыми радиусами при проектировании (с учётом особенностей рельефа местности) обуславливает неравномерный скоростной режим транспортных средств, что приводит к повышенному расходу топлива, ухудшению экологической обстановки, преждевременному износу автомобильной техники. Повышение точности вписывания переходной кривой в рельеф с учётом особенностей движения автомобиля поможет снизить негативное влияние этих факторов.

Используемые в настоящее время на криволинейных участках переходные кривые переменного радиуса задаются непрерывными аналитическими функциями. В результате «вписывание» в рельеф местности аналитически заданной кривой сводится к дискретному набору кривых, из которых выбирается та, которая более подходит под рельеф данной местности. Другие используемые переходные кривые (сплайновые, коробовая кривая) не имеют чётких алгоритмов построения, явно учитывающих такие важные факторы, как компенсация центробежной силы, вписывание в рельеф местности, расчёт уширения проезжей части и объёма земляных работ.

**Основная часть.** Предлагается гладкая составная многоцентровая кривая (ГлСМК) [1] в качестве трассы криволинейного участка автомобильной дороги, состоящая из сопряжённых дуг окружностей различных радиусов. Такой подход позволяет учитывать компенсацию центробежной силы на каждом секторе этой кривой, максимально точно вписывать переходную кривую в рельеф местности, а также наиболее точно учитывать профильный объём основных земляных работ за счёт точного расчёта объёма каждого сектора виража, основанного на ГлСМК. При построении

ГлСМК используются только линейные функции, что упрощает расчёты по сравнению с традиционными переходными кривыми, использующими степенные функции второго порядка и выше.

Математическая модель для определения параметров ГлСМК приведена ниже.

Длина ГлСМК равна сумме длин дуг окружностей определённого набора радиусов (см. рисунок):

$$K = \sum_{i=1}^i C_i, \quad (1)$$

где  $C_i$  – длина дуги  $i$ -го сектора составного виража.

Дуги и хорды  $i$ -го сектора составного виража определяются по формулам

$$C_i = R_i \gamma_i \frac{\pi}{180^\circ}; \quad (2)$$

$$U_i = 2R_i \sin \frac{\gamma_i}{2}, \quad (3)$$

где  $U_i$  – хорда  $i$ -го сектора составного виража;  $R_i$  – радиус  $i$ -го сектора составного виража;  $\gamma_i$  – центральный угол  $i$ -го сектора составного виража.

Преобразовав выражение (3) для определения величины центрального угла и подставив формулу (4) в выражение (2), получим прямую зависимость длины дуги от длины хорды  $i$ -го сектора составного виража:

$$\gamma_i = 2 \arcsin \frac{U_i}{2R_i}; \quad (4)$$

$$C_i = 2R_i \arcsin \left( \frac{U_i}{2R_i} \right) \frac{\pi}{180^\circ}. \quad (5)$$

Таким образом, полную длину ГлСМК запишем в виде

$$K_{\text{ГлСМК}} = \sum_{i=1}^i \left( 2R_i \arcsin \left( \frac{U_i}{2R_i} \right) \frac{\pi}{180^\circ} \right). \quad (6)$$

Для назначения основных параметров поворота (угол поворота лесовозной автомобильной дороги  $\alpha$ , радиус круговой кривой  $R_k$ , биссектриса Б) используются данные о категории проектируемой дороги, сведения о топографических, геологических и других особенностях рельефа места предполагаемого дорожного строительства [2].

Рассмотрим кривую  $ACA_1$ , состоящую из двух ветвей сопряжённых ГлСМК, когда круговая кривая обращается в точку (см. рисунок).

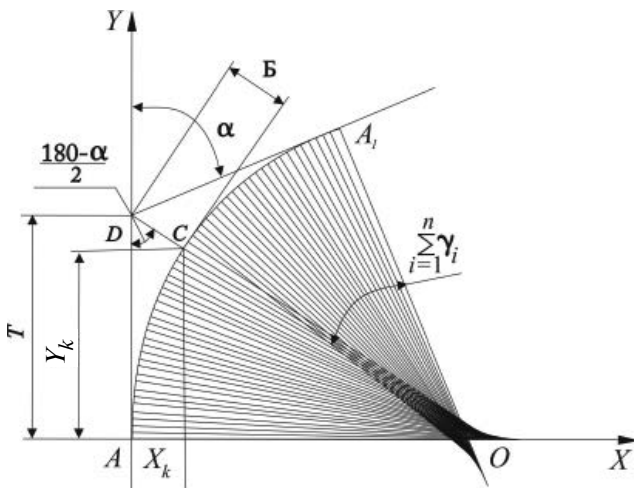
Координаты  $i$ -й точки ГлСМК  $X_i$  и  $Y_i$  определяются по формулам:

$$X_i = U_i \sin \left( \frac{\gamma_i}{2} + \sum_{i=1}^{i-1} \gamma_i \right) + X_{i-1}; \quad (7)$$

$$Y_i = U_i \cos \left( \frac{\gamma_i}{2} + \sum_{i=1}^{i-1} \gamma_i \right) + Y_{i-1}, \quad (8)$$

где  $\gamma_i$  – угловой раствор  $i$ -го сектора ГлСМК;  $U_i$  – длина хорды  $i$ -го сектора ГлСМК.

Координаты конца ГлСМК  $X_k$  и  $Y_k$  (см. рисунок, точка  $C$ ), т. е. точки сопряжения её с круговой кривой (которая в данном случае обращается в точку), имеют вид



**Устройство криволинейного участка дороги при помощи гладкой составной многоцентровой кривой без круговой вставки:**

$\alpha$  – угол поворота трассы;  $\sum_{i=1}^n \gamma_i$  – сумма центральных углов всех секторов ГлСМК;  $X_k$  и  $Y_k$  – координаты конца ГлСМК;  $T$  – тангенс ГлСМК;  $B$  – биссектриса ГлСМК

$$X_k = U_k \sin \left( \frac{\gamma_k}{2} + \sum_{i=1}^{i-1} \gamma_i \right) + X_{i-1}; \quad (9)$$

$$Y_k = U_k \cos \left( \frac{\gamma_k}{2} + \sum_{i=1}^{i-1} \gamma_i \right) + Y_{i-1}. \quad (10)$$

Тангенс  $T$  ГлСМК – расстояние от начала кривой до центра угла поворота (рисунок, отрезки  $AD$  и  $DA_1$ ), определяется по формуле

$$T = Y_k + \frac{X_k}{\operatorname{tg} \left( 90^\circ - \frac{\alpha}{2} \right)}. \quad (11)$$

Биссектриса  $B$  ГлСМК – расстояние от центра кривой до центра угла поворота (отрезок  $DC$ ), определяется по формуле

$$B = \frac{X_k}{\sin \left( 90^\circ - \frac{\alpha}{2} \right)}. \quad (12)$$

Длина гладкой составной многоцентровой кривой  $K$  (кривые  $AC$  или  $A_1C$ ) определяется по формуле (1).

Домер  $D$  ГлСМК равняется разности между двумя тангенсами и длиной кривой:

$$D = 2T - 2K = 2(T - K). \quad (13)$$

**Заключение.** Предлагаемая в качестве трассы криволинейного участка автомобильной дороги ГлСМК позволяет проектировать более плавную по форме в плане трассу, чем применяемые в существующих методиках, благодаря выбору более рациональной стратегии проектирования. Предложенный подход к проектированию трассы криволинейного участка дороги позволяет учитывать топографические, геологические и другие особенности ландшафта. Кроме того, представляется возможным сформировать оптимизированный ряд унифицированных плитных элементов составного дорожного покрытия, количество типоразмеров в котором будет в 1,5–2,5 раза меньше, чем при использовании клотоиды в качестве переходной кривой.

**Библиографические ссылки**

1. Харин В.Н. Применение равнохордовых составных кривых в проектировании разворотов / В.Н. Харин, Е.А. Аникеев // Прикладные задачи моделирования и оптимизации: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. проф. В.Н. Фролова. Воронеж: ВГТУ, 2000. С. 124–131.
2. Алябьев В.И. Сухопутный транспорт леса: Учеб. / В.И. Алябьев, Б.А. Ильин, Г.Ф. Грехов, Б.И. Кувалдин. М.: Лесная промышленность, 1990. 416 с.

**ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ**

УДК 621.002.51

**По страницам журналов**

**Векторизация фотоизображений городских сцен для 3D-реконструкции.** *Информационные технологии.* 2010. № 3.

Предложен подход к векторизации изображений применительно к задаче реконструкции сцен городской обстановки по последовательности фотоизображений, основанный на комбинированном применении детектора границ Canny и процедуры построения пиксельного остова с последующей векторизацией. Особенность подхода заключается в разработке дополнительных средств обработки данных, направленных на повышение качества векторизации и отвечающих двум различным по требованиям режимам векторизации в контексте вышеупомянутого приложения. Представлены два реализующих подход алгоритма векторизации – для детектирования линий, используемых в задаче калибровки камер и для построения векторной основы в задаче 3D-реконструкции объектов городской застройки.

**Математическая модель задачи проектирования вентиляционной системы.** *Безопасность жизнедеятельности.* 2010. № 3.

Рассмотрен процесс формирования математической модели задачи проектирования вентиляционной системы с механическим побуждением. Сформулирована и исследована математическая модель, позволяющая определить оптимальное значение скорости движения воздуха по воздуховоду и диаметр воздуховода. Указаны направления совершенствования модели.

**Фактор Куртозиса как диагностический признак неисправностей подшипника.** *Контроль. Диагностика.* 2010. № 3.

Проанализированы методы исследования временных сигналов вибрации. Рассмотрена возможность использования фактора Куртозиса в качестве диагностического признака неисправностей подшипников. Приведены результаты обработки экспериментальных данных и математического моделирования. Даны практические рекомендации. Рассмотрен пример внедрения результатов исследования.

**Влияние нагрева электродов на изменение их массы при электроискровой обработке.** *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2010. № 4.

Выявлены факторы, оказывающие существенное влияние на изменение массы катода в на-

чальный период электроискровой обработки. Установлено, что уменьшение фиксируемой по результатам взвешивания массы обусловлено снижением толщины водяной плёнки на поверхности катода и поверхности чашки аналитических весов. Определена зависимость массы водяной плёнки от времени охлаждения. Для устранения влияния этого явления на результаты измерения массы рекомендуется выдерживать образцы перед взвешиванием до их полного остывания в контролируемых по влажности воздуха условиях.

**Марковская модель механического взаимодействия шероховатых поверхностей в процессе трения.** *Трение и смазка машин и механизмов.* 2010. № 3.

Предложена марковская модель изменения высот выступов шероховатых поверхностей в процессе трения. В основу заложен вероятностный механизм однократного контактного взаимодействия двух выступов с известными высотами. Результатом взаимодействия считается изменение высот выступов. Механизм взаимодействия учитывает упруго-пластическую деформацию выступов и их усталостное разрушение. Реализация модели на ЭВМ позволяет по физическим свойствам материалов, характеристикам исходной шероховатости и величине нагрузки оценивать изменение во времени характеристик трения (площадь контакта, силы трения, износ) и параметров шероховатости (среднеарифметические отклонения).

**Расчёт вибрационных и шумовых характеристик станков при проектировании.** *Инженерный журнал «Справочник».* 2010. № 3.

Приведены математическая модель упругой системы станка и методика расчёта вибрационных и шумовых излучений элементов модели под действием совокупности источников колебаний.

**Особенности управления работой струйных поворотных устройств.** *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2010. № 3.

Предложена конструкция поворотного стола со струйным приводом и система управления им. Рассмотрены особенности определения времени всплытия детали на воздушной прослойке и её поворота под действием струи сжатого воздуха, что необходимо для программы управления устройством. Предложенные математические модели также позволяют выбирать конструктивные и рабочие параметры поворотного стола.



# “ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ”

П Р Е Д С Т А В Л Я Е Т

**Головин Ю.И.**

## **НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ**

М.: Машиностроение. 2009

**Цена 693 р. с НДС**

Описаны принципы, методы и средства для реализации испытаний и определения механических свойств в наномасштабе, которые получили в последние годы большое распространение под общим названием "наноиндентирование". Обсуждены информационные возможности этого большого и многофункционального семейства методов нано- и микромеханических испытаний. Рассмотрены различные аспекты и особенности поведения твердых тел в условиях сильно стесненной деформации, возникающей при локальном нагружении поверхности микронагрузкой. Описаны способы извлечения механических характеристик тонких приповерхностных слоев разнообразных материалов, пленок и многослойных покрытий при локальном нагружении. Особое внимание уделено физическим механизмам деформации и разрушения в этих условиях.

Книга адресована научным и инженерно-техническим работникам, занимающимся созданием, исследованием и аттестацией новых наноструктурных материалов и систем, полезна студентам и аспирантам, обучающимся по направлениям нанотехнологии и наноматериаловедения.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы: по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4;

по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru).

Дополнительную информацию можно получить по телефонам:

(499) 269-66-00, 269-52-98

и на сайте [WWW.MASHIN.RU](http://WWW.MASHIN.RU)