

УДК 004.891:678.01

DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-4-946-962

## Архитектура системы анализа и управления качеством продукции тонких каландрированных материалов на базе нечётких моделей

Тедтоев А.Ч. , Макарук Р.В. , Чистякова Т.Б.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),  
Санкт-Петербург, Россия

190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24-26/49 литера А

E-mail: [ajam88@mail.ru](mailto:ajam88@mail.ru), [makaruk\\_rv@sapr.lti-gti.ru](mailto:makaruk_rv@sapr.lti-gti.ru), [chistb@mail.ru](mailto:chistb@mail.ru)

**Аннотация.** В работе представлена автоматизированная информационная система анализа и управления показателями качества тонких каландрированных материалов (бумаги и полимерной пленки) на производстве, основанная на нечетких моделях. На высокоавтоматизированных предприятиях по производству тонких каландрированных материалов не все показатели качества продукции измеряются автоматически, в контуре управления по-прежнему присутствует оператор, оценивающий качественные показатели продукции на некоторых участках производственной линии, что делает актуальной разработку соответствующей автоматизированной системы поддержки принятия решений. Актуальность применения системы анализа и контроля качества на базе нечетких моделей обусловлена ее гибкостью, перенастраиваемостью на различные типы производств и продукции, возможностью анализировать качество продукции на ранних стадиях производства (для полимерных пленочных материалов – на стадии экструдата), а также тем, что ее применение позволит снизить время, затрачиваемое оператором на анализ качества продукции и принятие управленческих решений, что в конечном итоге может привести к снижению количества брака продукции. Результатом работы представленной системы является совет по управлению качеством продукции для производственного персонала предприятия. В работе приведен алгоритм синтеза нечетких моделей для анализа и контроля качества различных тонких каландрированных материалов. Представлен системный подход к анализу качества продукции этого класса объектов, а также определены общие признаки производств как объектов управления – технологические процессы, оборудование, сырье, управляющие воздействия и их различия. Интеграция описываемой разработки в уже существующие системы для обработки больших промышленных данных позволит производить комплексный анализ качества продукции и уменьшить влияние неполноты входных данных об объекте исследования на результаты систем оценки качества продукции, а также снизить количество брака на производстве.

**Ключевые слова:** нечеткая модель, показатель качества, потребительская характеристика, тонкий каландрированный материал, анализ промышленной продукции, контроль качества, полимерная пленка, бумажный материал, цветовая характеристика, обработка больших промышленных данных

**Для цитирования:** Тедтоев А.Ч., Макарук Р.В., Чистякова Т.Б. 2024. Архитектура системы анализа и управления качеством продукции тонких каландрированных материалов на базе нечётких моделей. Экономика. Информатика, 51(4): 946–962. DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-4-946-962

---

## Architecture of a System for Analysis and Quality Control of Thin Calendered Products Based on Fuzzy Models

Azamat Ch. Tedtoev , Roman V. Makaruk , Tamara B. Chistyakova

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

"St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)"

b. 24-26/49, l. A Moskovskij Ave, Saint-Petersburg 190013, Russia

E-mail: [ajam88@mail.ru](mailto:ajam88@mail.ru), [makaruk\\_rv@sapr.lti-gti.ru](mailto:makaruk_rv@sapr.lti-gti.ru), [chistb@mail.ru](mailto:chistb@mail.ru)

**Abstract.** The paper presents an automated information system based on fuzzy models for analysis and control of quality indicators of thin calendered materials such as paper and polymer film at a production facility.

At highly automated enterprises for the manufacturing of thin calendered materials, not all product quality indicators are measured automatically; there is still a human operator in the control loop who evaluates product quality indicators in some areas of the production line, which makes it urgent to develop an appropriate automated decision support system. The relevance of using a system of analysis and quality control based on fuzzy models is due to its flexibility, adaptability to various types of production and products, the ability to analyze product quality at the early stages of production (for polymer film materials – at the extrudate stage), as well as the fact that its use will reduce the time spent by the operator on analyzing product quality and making management decisions, which ultimately can lead to a reduction in the number of product defects. The result of using the proposed system is advice on product quality management for the production personnel of the enterprise. The paper presents an algorithm for synthesizing fuzzy models for the analysis and quality control of various thin calendered materials. A systemic approach to analyzing the quality of products of this class of objects is presented, and the general characteristics of production facilities as control objects are identified – technological processes, equipment, raw materials, control actions and their differences. The integration of the described development into existing systems for processing large industrial data will allow for a comprehensive analysis of product quality, reduce the impact of incomplete input data about the analyzed object on the results of product quality assessment systems and decrease the number of manufacturing defects.

**Keywords:** fuzzy model, quality indicator, consumer characteristic, thin calendered material, analysis of industrial products, quality control, polymer film, paper material, color characteristic, processing of large industrial data

**For citation:** Tedtoev A.Ch., Makaruk R.V., Chistyakova T.B. 2024. Architecture of a System for Analysis and Quality Control of Thin Calendered Products Based on Fuzzy Models. Economics. Information technologies, 51(4): 946–962 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-4-946-962

## Введение

Крупнотоннажные производства тонких каландрированных материалов (ТКМ) – полимерных пленок и бумажной продукции, производимых методом каландрования, характеризуются большими объемами накопленных производственных данных, а также неполнотой информации о показателях качества продукции. На современных производствах количество контролируемых параметров продукции может исчисляться сотнями, однако неконтролируемых показателей – еще больше [Щербак, 2019; Чарват, 2009].

К примеру, по данным ООО «Клэкерн Пентапласт Рус», современные производства полимерных пленок являются [Колерт, 2020]:

- международными (например, 41 экструзионно-каландровая линия корпорации Klöckner Pentaplast в 9 странах мира);
- многоассортиментными (10 типов однослойных и многослойных жестких поливинилхлоридных пленок, производимых корпорацией Klöckner Pentaplast для упаковки фармацевтических препаратов);
- крупнотоннажными (~1000 кг/ч на 1 линии, ~400 тыс. тонн жесткой поливинилхлоридной пленки в год на 41 линии) и характеризуются:
  - большими объемами накопленных производственных данных (~500 тыс. значений параметров процесса на экструзионно-каландровой линии № 2 завода ООО «Клэкерн Пентапласт Рус» в Санкт-Петербурге за месяц производства);
  - большим количеством контролируемых и неконтролируемых показателей качества продукции, нелинейно связанных между собой (около 100 показателей качества и более 800 связей между ними, к примеру связь: повышение температуры валков каландра → понижение вязкости → понижение давления → повышение производительности при снижении толщины);
- неполнотой информации о показателях качества экструдата и пленки.

Важное место в определении эффективности производства занимает среднее количество брака продукции. Производства как полимерных пленок, так и бумаги являются сложными, многостадийными и многооперационными процессами. Брак на таких предприятиях – неизбежность [Манукян, 2021]. При работе бумагоделательной машины процент брака составляет в среднем 10 %, а при производстве тонких видов бумаги – доходит до 30 % (между понятиями бумага и картон отсутствует четкое разделение, но для краткости в дальнейшем будет использоваться формулировка “производство бумаги”). В зависимости от типа установки и количества этапов производства брак при изготовлении полимерных пленочных материалов может варьироваться в диапазоне от 0,5 % до 10 %.

Предприятия по производству ТКМ оснащены современными АСУ ТП, основанными на алгоритмах работы с большими данными, однако работоспособность систем анализа больших производственных данных снижается из-за неполноты входных данных о показателях качества.

Большинство ключевых показателей продукции измеряется и контролируется на производстве, однако некоторые, как, например, усадка полимерной пленки – не измеряется в силу дороговизны специализированных измерительных приборов и программного обеспечения для обработки получаемых результатов. Именно по этой причине даже на современных высокоавтоматизированных производствах ТКМ в контуре управления зачастую присутствует оператор, субъективно оценивающий качество продукции на промежуточных стадиях. В связи с этим между обнаружением отклонений показателей качества продукции от эталонных и поступлением регулирующих воздействий создается задержка, неизбежно приводящая к увеличению количества брака.

На рисунке 1 приведена схема производства полимерной пленки с участием оператора установки, контролирующего продукцию после выхода из экструдера и после каландрования.

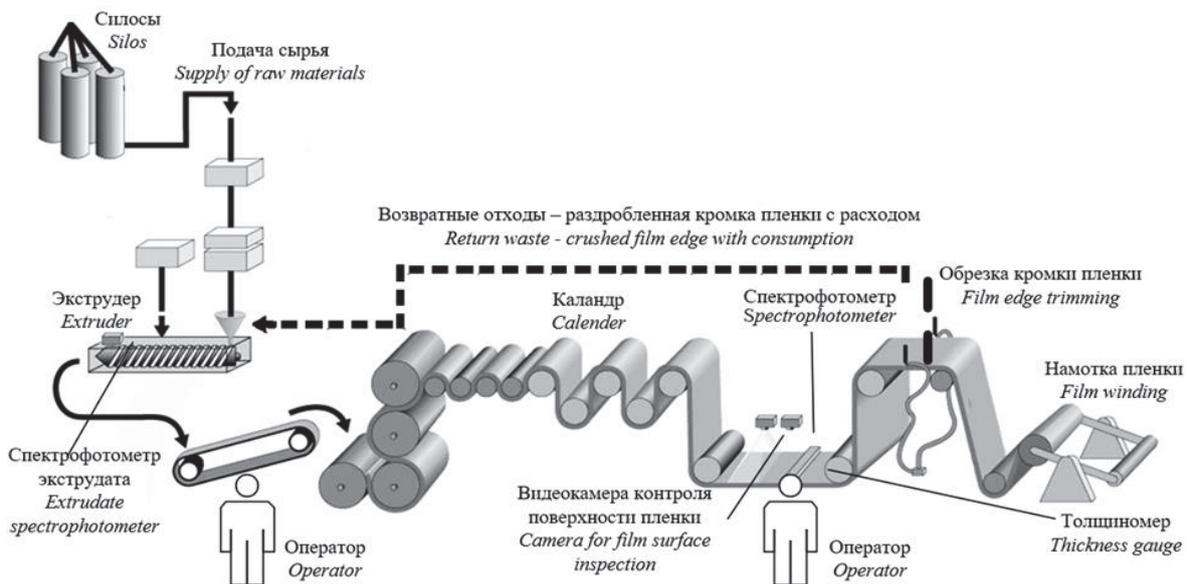


Рис. 1. Схема экструзионно-каландрового производства полимерной пленки  
Fig. 1. Scheme of extrusion-calender production of polymer film

Интеграция в системы управления качеством продукции на предприятии описываемого программного комплекса, использующего механизм нечеткой логики наряду со знаниями и оценками экспертов в предметной области, позволит решить описанные выше проблемы, минимизировав негативное влияние неполноты входных данных об анализируемой продукции, а также оказав помощь оператору линии в принятии управленческих решений [Кондрашкова и др., 1989, Гусеница и др., 2024].

## Анализ общих признаков производств ТКМ как объектов управления

Современные производства ТКМ являются многоассортиментными, энергоемкими, непрерывными, а также характеризуются множеством и сложностью связей между оборудованием, технологическими режимами и характеристиками продукции на всех стадиях [Чистякова и др., 2007; Носов, Бугров, 2013; Kohlert et al., 2015; Тетерин и др., 2017; Камаев и др., 2019; Шашихина и др., 2021].

Технологические процессы, происходящие на отдельных участках производства ТКМ, отличаются большим разнообразием физико-химических механизмов. Так, процессы подготовки и транспортировки бумажной или полимерной массы, отлива и формования – это в основном гидромеханические процессы, а для участков формования и сушки характерны процессы тепло- и массообмена.

Как правило, на производствах ТКМ применяются различные виды датчиков (измерения температуры, давления, расходов, уровня) и регуляторов, используемых вместе с современными АСУ ТП.

Многообразие процессов определяет многообразие параметров их характеризующих. Вместе с тем процессы происходят в аппаратах, особенности конструкции которых оказывают существенное влияние на ход процессов. Этим и обусловлено разнообразие средств контроля и управления процессами и аппаратами на производствах ТКМ [Манукян, 2021].

В связи со всем вышеизложенным можно заключить, что управление качеством продукции для описываемого класса объектов является сложной наукоемкой задачей. В дальнейшем для наглядности и емкости будут приводиться лишь некоторые из управляющих воздействий и показателей качества продукции, так как в реальности количество контролируемых и неконтролируемых показателей качества продукции, равно как и количество управляющих воздействий, может исчисляться десятками, а на особо крупных производствах и сотнями.

С целью формализации процесса производства продукции ТКМ была разработана упрощенная схема этого процесса, представленная на рисунке 2. Обобщенный процесс производства ТКМ включает в себя такие стадии, как: подготовка сырья (бумажной массы, полимерной смеси), обработка сырья (формирование бумажной массы, процесс пластикации полимеров), формование, термическая обработка, каландрирование, намотка.



Рис. 2. Упрощенная схема процесса производства ТКМ

Fig. 2. Simplified diagram of the TCM (thin calendered materials) production process

Наиболее сложными стадиями процесса производства ТКМ являются стадии формования (экструзии) и каландрования.

Такое представление позволит определить контролируемые показатели качества для каждой из стадий и определить дальнейший ход разработки системы контроля качества ТКМ на базе нечетких моделей.

Одной из ключевых задач в работе является определение основных контролируемых параметров продукции, так как задача управления качеством сводится к определению оптимальных управляющих воздействий. Контролируемые показатели качества при производстве как бумаги, так и полимерной пленки различаются в зависимости от комплектации установки и типа производимой продукции. На всех крупных производствах перечень основных контролируемых показателей определяется ГОСТом и технологическим регламентом [Фляте, 1988; ГОСТ, 2018]. В рамках работы актуальным является

определение основных показателей качества продукции, контролируемых на типовых производствах ТКМ, среди которых особую значимость имеют нижеописанные [Чистякова и др., 2007; Носов, Бугров, 2013; Kohlert et al., 2015; Тетерин и др., 2017; Камаев и др., 2019; Шашихина и др., 2021]:

1. Для полимерной пленки: *количественные* – толщина, плотность, степень деструкции, температуры (валков каландра, корпуса экструдера и т. д.), скорости вращения валков каландра, лопастей экструдера, шнеков; *качественные* – цвет, блеск, степень прозрачности.

2. Для бумаги: *количественные* – объемная масса, разрывная длина по двум направлениями, влажность, толщина, плотность, зольность, проклейка, посторонние включения; *качественные* – непрозрачность, белизна (цвет), глянец.

Стоит учитывать и то, что в зависимости от типа производимой продукции список контролируемых показателей может изменяться и дополняться.

Для большей наглядности в таблице 1 приведены основные контролируемые показатели качества на производствах ТКМ.

Таблица 1  
Table 1

Основные показатели качества, контролируемые на производствах ТКМ  
 Main quality indicators controlled in TCM production

Полимерные пленки <i>Polymer films</i>	Бумага и картон <i>Paper and cardboard</i>
<b>Количественные</b> <i>Quantitative</i>	
Толщина <i>Thickness</i>	Толщина <i>Thickness</i>
Плотность <i>Density</i>	Плотность <i>Density</i>
Гладкость <i>Smoothness</i>	Гладкость <i>Smoothness</i>
Посторонние включения <i>Foreign inclusions</i>	Посторонние включения <i>Foreign inclusions</i>
Степень деструкции <i>Degree of destruction</i>	Влажность <i>Humidity</i>
<b>Качественные</b> <i>Qualitative</i>	
Цвет пленки <i>Film color</i>	Цвет (белизна) <i>Color (whiteness)</i>
Блеск <i>Gloss</i>	Блеск (Глянец) <i>Gloss</i>
Степень прозрачности <i>Degree of transparency</i>	Степень прозрачности <i>Degree of transparency</i>
Цвет экструдата <i>Extrudate color</i>	

Проведенное аналитическое исследование позволяет утверждать, что рассматриваемые объекты управления (производства ТКМ) имеют много общих черт: организация производственных линий и их техническое обеспечение, производственные процессы, технологические стадии, показатели качества продукции. Благодаря этому можно выделить общие входные и выходные показатели и управляющие воздействия и разработать первичные математические модели для управления качеством продукции – рисунок 3.

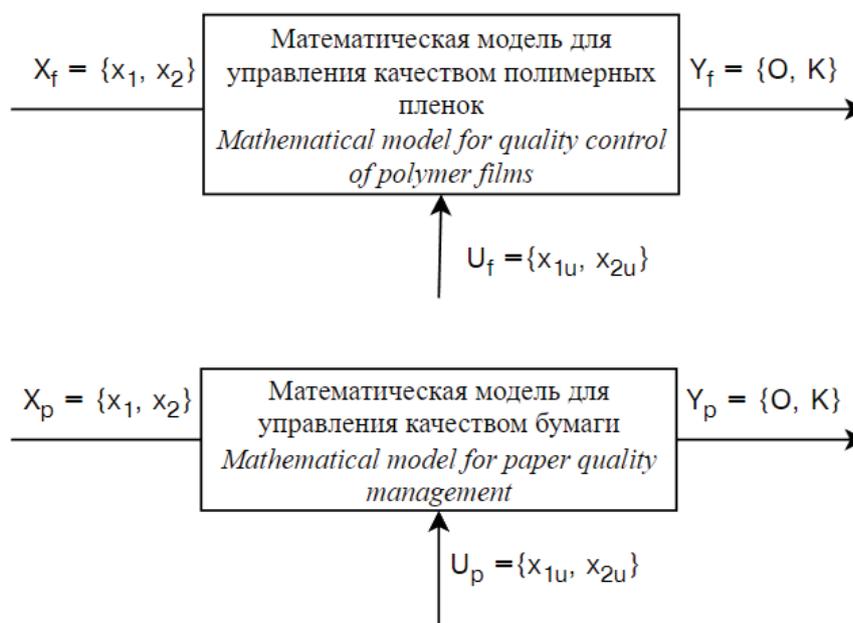


Рис. 3. Формализованное описание применения математической модели для управления качеством продукции ТКМ

Fig. 3. Formalized description of the use of a mathematical model for quality management of TCM products

Обозначения, принятые на рисунке 3:

Вектора с индексом P – относятся к производству бумаги, а с индексом F – к производству пленки.

X – вектор входных параметров математической модели:

$x_1$  – измеряемые или контролируемые показатели качества продукции. Для полимерной пленки это – толщина, плотность, гладкость, посторонние включения, поверхностные натяжения, температурные профили, степень деструкции, термическая усадка; для бумаги – толщина, плотность, гладкость, посторонние включения, жесткость при статическом изгибе, влажность, проклейка, зольность.

$x_2$  – качественные (не контролируемые автоматизировано) показатели продукции. Для полимерной пленки это – цвет, блеск, степень прозрачности; для бумаги – цвет (белизна), глянец, степень прозрачности.

U – вектор управляющих воздействий математической модели:

$x_{1u}, x_{2u}$  – воздействия, оказываемые на соответствующие регуляторы на производственной линии.

Y – вектор выходных параметров математической модели:

O – изображение образца с выделенными дефектными областями (при наличии).

K – советы по управлению качеством, основанные на экспертных знаниях и оценках и формулируемые на основе текущего состояния продукции.

Описанная выше модель управления качеством может быть сведена к выражению вида:  $Y = F(x_1, x_2, U)$ .

Исходя из схожести описываемых производств и возможности унифицировать процесс управления качеством продукции ТКМ, было разработано единое формализованное описание процесса управления качеством ТКМ – рисунок 4.

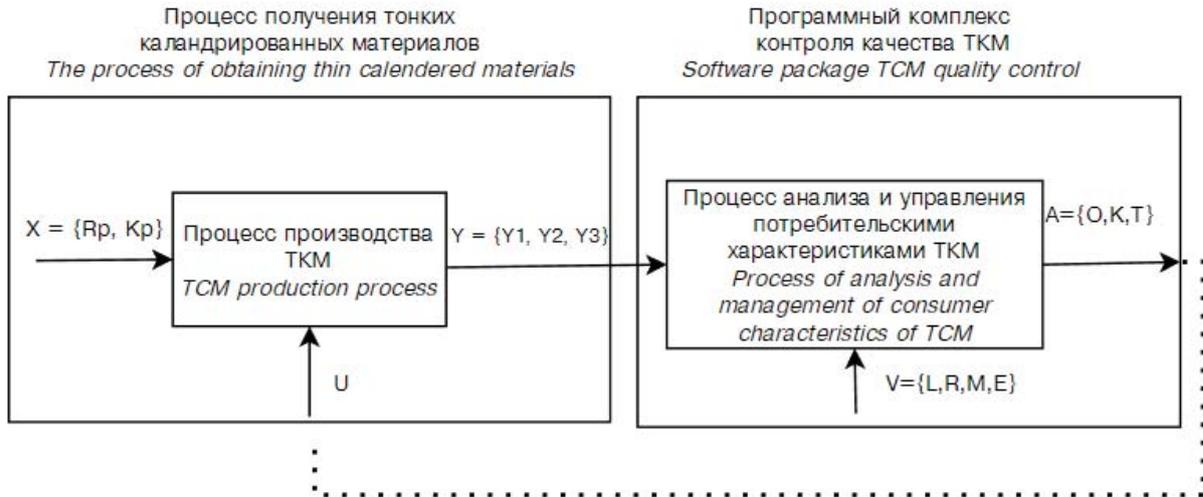


Рис. 4. Формализованное описание процесса управления качеством ТКМ  
 Fig. 4. Formalized description of the TCM quality management process

Обозначения, принятые на рисунке 4:

X – вектор входных параметров процесса производства:

$R_p$  – характеристики сырья, добавок, красителей

$K_p$  – конфигурация производственной линии (количество валков каландра, тип производимой продукции).

U – вектор варьируемых параметров производства – управляющие воздействия производства, такие как температуры и скорости вращения валков.

Y – вектор показателей качества потребительских характеристик продукции:

$y_1$  – вектор количественных показателей качества, *контролируемых* на производстве и/или *рассчитываемых* в системах контроля качества.

$y_2$  – вектор *качественных* показателей потребительских характеристик продукции.

V – вектор варьируемых параметров процесса анализа и управления потребительскими характеристиками ТКМ:

L – допустимая величина отклонения (отклонение, задаваемое термами по типу “сильно”, “не сильно”),

R – точность анализа изображения (размер анализируемой за раз области изображения в пикселях),

M – нечеткая модель (установленная модель для выбранного производства),

E – характеристики производственных правил (настраиваемые пользователем параметры производственных правил).

A – вектор выходных параметров процесса анализа и управления потребительскими характеристиками ТКМ:

O – изображение образца с выделенными дефектными областями,

K – советы по управлению качеством ТКМ при помощи изменения U.

T – тренды качества продукции.

*Задача анализа и управления* показателями качества класса объектов (ТКМ) при помощи математических и нечетких моделей заключалась в поиске регулирующих воздействий, обеспечивающих минимальные отклонения от эталонных показателей качества, их классификации при помощи нечетких моделей и выдаче советов по управлению для производственного персонала.

Для решения данной задачи были разработаны *нечеткие модели* и *программный комплекс* для анализа и управления качеством продукции ТКМ на базе нечетких моделей.

### Синтез нечетких моделей для анализа и оценки потребительских характеристик продукции

Механизм нечеткой логики уже давно применяется в различных сферах жизни общества, в том числе и в различных отраслях производств. Актуальность применения гибридных (нечетких и классических) систем неоднократно подтверждалась множеством как российских, так и зарубежных проектов, и научных трудов [Байченко и др., 2014; Kong et al., 2019; Seletkov et al., 2019; Abaei et al., 2020; Савченко и др., 2021]. Основная причина применения механизма нечеткой логики – гибкость, возможность перевести качественно оцениваемые показатели в количественные эквиваленты, а также возможность восполнить неполноту входных данных об объекте исследования или управления благодаря ядру таких систем – базе нечетких производционных правил.

При разработке системы синтеза нечетких моделей, а также тестовых нечетких моделей для анализа качества продукции ТКМ использовались экспертные оценки специалистов в области производства ТКМ и данные из специализированной литературы и технологических регламентов [Chistyakova et al., 2020; Чистякова и др., 2021; Фозилов и др., 2021;]. Разработка базы нечетких производционных правил, как и нечетких моделей, осуществлялась с использованием передовых подходов в этой области и в соответствии с рекомендациями специализированной литературы [Макарук, Гиляров, 2013; Чистякова, Полосин, 2019; Ерошкин, Поляков, 2005].

Алгоритм синтеза нечеткой модели представлен на рисунке 5.

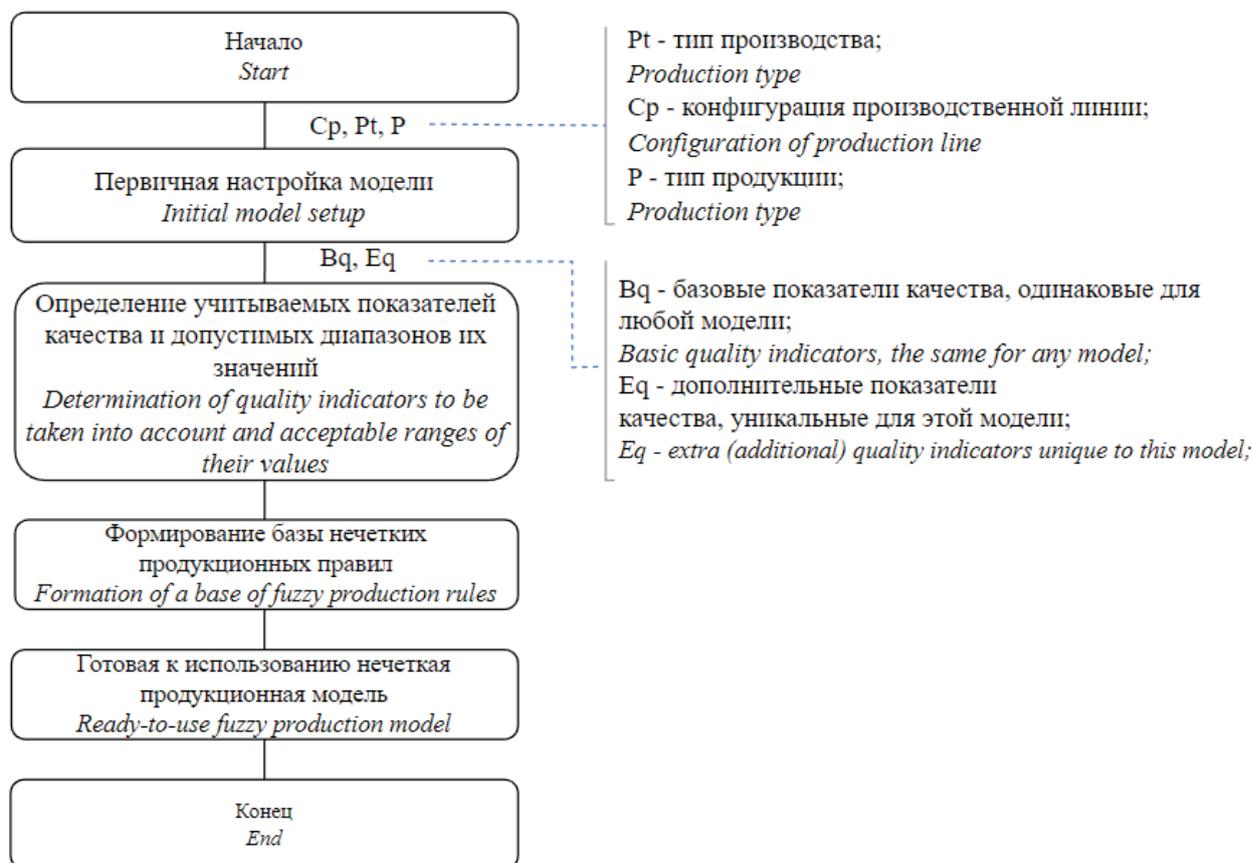


Рис. 5. Синтез нечеткой модели для конкретного типа продукции  
 Fig. 5. Synthesis of a fuzzy model for a specific type of product

Как видно из рис. 5, процесс формирования нечеткой модели состоит из нескольких последовательных шагов:

1. Первичная настройка модели – включает в себя заполнение шаблона модели информацией о типе производства (полимерные пленки / бумага), сведениями о конфигурации производственной линии (задаваемыми в виде заполнения таблицы сведения), а также о типе производимой продукции (рецептура; специальное название, принятое на производстве; описание);

2. Определение учитываемых показателей качества – включает в себя добавление в модель дополнительных контролируемых показателей качества, специфичных для конкретной продукции, задание допустимых диапазонов, как для базовых (основных контролируемых показателей качества, единых для любого типа продукции), так и для дополнительных показателей качества;

3. Формирование базы нечетких производственных правил – благодаря последовательному выполнению предыдущих этапов создается шаблон базы нечетких производственных правил (уникальный для данной нечеткой модели), который специалисту предстоит заполнить в соответствии с технологическим регламентом и собственными оценками. После этого нечеткая модель может быть использована для оценки качества производимой продукции.

Как было упомянуто ранее, современные производства ТКМ являются многолинейными, часто перенастраиваемыми и непрерывными. Необходимость работать с различными производственными линиями и продукцией определяет необходимость использования гибких, настраиваемых систем анализа качества. Описываемый подход к синтезу нечеткой модели позволяет подстроиться под конкретные производственные линии и тип продукции без больших временных затрат, так как нечеткие модели подготовленный специалист сможет разработать заранее, а затем потребуются лишь переключиться между ними.

Гибкость представляемого подхода достигается при помощи разделения контролируемых показателей качества на основные и дополнительные, что также позволит экономить ресурсы при разработке модели – основные контролируемые показатели качества едины для всех ожидаемых типов продукции. Такой подход стал возможным благодаря схожести производств полимерных пленочных материалов и бумаги (таблица 1).

Ядром описываемой нечеткой модели является база формализованных экспертных знаний и оценок, содержащая правила вида: Если  $x_1 = S_1(w_1)$  И  $x_2 = S_2(w_2)$  И  $x_n = S_n(w_n)$  ТО  $y = K(D)(W_T)$ .

В правилах такого вида  $x$  – входные числовые переменные,  $S$  – фиксированные значения входных переменных,  $w \in [0, 1/n]$ , где  $n$  – число фигурирующих в правиле переменных – относительный вес каждой переменной, входящей в правило,  $W_T \in [0, 1]$  – получаемый из суммы  $w$  переменных удельный вес правила, на основании которого правилам отдается приоритет при проведении анализа образца продукции,  $D$  – приоритет правила данного вида,  $K$  – совет по управлению в описываемой правилом ситуации для управленческого персонала производства. Упрощенные примеры производственных правил для оценки цветовых характеристик экструдата приведены в таблице 2.

Для анализа цветовых характеристик образца и его дальнейшего сравнения с эталоном программный комплекс преобразует параметры цветового пространства RGB в цветовую пространственную модель CIE Lab. В этой модели  $L$ ,  $a$  и  $b$  – обозначения координат системы ( $L^*$  – светлота, а  $a^*$  и  $b^*$  – координаты цветности) [Чарват, 2009]. Значение входных параметров нечеткой модели:  $\Delta L$ ,  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta E$  – разности между соответствующими координатами эталонного и анализируемого образцов.

Также следует обратить внимание на то, что при расчете результата учитываются как количественные показатели продукции, так и качественные. Достигается это путем формализации показателей, оцениваемых качественно, при помощи алгоритмов фазсификации и дефазсификации (с применением центроидного метода) и алгоритма нечеткого вывода Мамдани.

Таблица 2  
 Table 2

Продукционные правила нечеткой модели для оценки цветовых характеристик продукции  
 Fuzzy model production rules for assessing the color characteristics of products

$\Delta L$	$\Delta a$	$\Delta b$	$\Delta E$	WT	D	<b>Вывод</b> <i>Conclusion</i>
$\Delta L \geq 5$	$\Delta a \geq 5$	$\Delta b \geq 5$	$\Delta E \geq 5$	1	1	Все показатели вышли за допустимые диапазоны, проверьте корректность выбора эталонного образца. <i>All indicators are outside the acceptable ranges, check that the reference sample is selected correctly</i>
$\Delta L \geq 0$	$\Delta a \geq 3$	$\Delta b \geq 0$	$\Delta E \geq 3$	1	0.8	Зафиксировано превышение среднего значения $\Delta E$ , а также повышенное значение $\Delta a$ . Необходимо увеличить объем красного красителя и понизить температуру корпуса экструдера. <i>An excess of the average value of <math>\Delta E</math>, as well as an increased value of <math>\Delta a</math>, was recorded. It is necessary to increase the volume of red dye and lower the temperature of the extruder body.</i>

Результатом анализа показателей качества продукции является текстовая рекомендация по управлению качеством продукции.

Представленная модель была реализована в разработанном программном комплексе и протестирована на данных, взятых из специализированных источников [Щербак, 2019; Гусеница и др., 2024]. Результаты тестирования совпали с результатами, полученными в программном пакете MATLAB и с советами по управлению, описанными в специализированной литературе, что подтверждает адекватность модели. В то же время точность результатов, выдаваемых моделью, целиком зависит от тщательности заполнения базы нечетких продукционных правил, на данном этапе разработки модель выдавала корректный результат во всех тестах. Экономичность модели обусловлена отсутствием необходимости использовать стороннее платное ПО, а также низким временем расчета результатов (0,2–0,3мс). Универсальность модели определяется ее гибкостью, перенастраиваемостью на различные типы производств, продукционных линий и продукции.

Более подробно принцип формирования нечетких моделей и результаты их применения для производств ТКМ были описаны в предыдущих трудах [Tedtoev et al., 2022; Тедтоев и др., 2023].

### Архитектура системы анализа и управления качеством полимерных пленок и бумаги

Из сложности описываемых объектов и решаемой задачи следует необходимость разработки гибридной системы, позволяющей производить анализ качества продукции с применением как детерминированных, так и нечетких моделей.

Повышение эффективности системы управления потребительскими характеристиками ТКМ достигается за счет разработанных нечетких моделей для анализа и оценки количественных и качественных показателей потребительских характеристик ТКМ и реализованного на их основе гибкого настраиваемого на различные типы производств и продукции интегрируемого программного комплекса, результатом работы которого являются советы по управлению качеством продукции для управленческого производственного персонала.

Структура разработанной системы (программного комплекса) для анализа и управления качеством ТКМ представлена на рисунке 6.

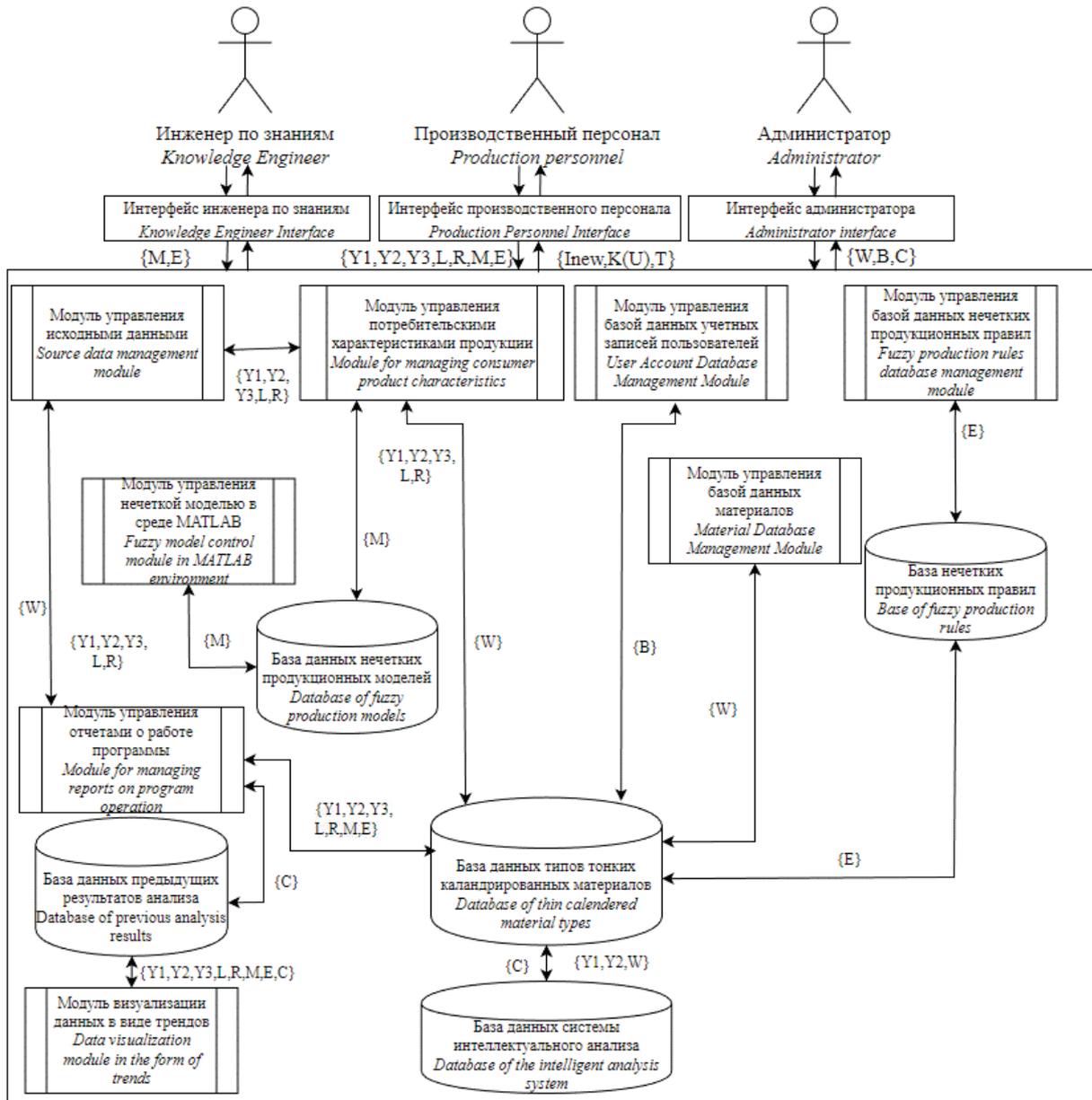


Рис. 6. Функциональная структура программного комплекса

Fig. 6. Functional structure of the software package

Новые обозначения, использованные на рисунке 6:

М – нечеткая производственная модель (установленная модель для выбранного производства);

Е – характеристики производственных правил (настраиваемые пользователем параметры производственных правил);

В – данные пользователя (логин, пароль, личный блокнот);

С – параметры отчетов о работе программы (файл с отчетом о работе программы);

$I_{new}$  – изображение с локализованным дефектом (файл в формате .jpg);

$K(U)$  – советы по управлению качеством ТКМ, включающие рекомендуемое изменение управляющих воздействий производства  $U$ ;

Т – тренды качества продукции.

Как видно из приведенной функциональной структуры – система рассчитана на три вида пользователей – инженера по знаниям, производственный персонал и администратора.

Администратор – отвечает лишь за настройку программного обеспечения и соблюдение требований информационной безопасности и корпоративной политики.

Инженер по знаниям – основной задачей пользователей этого типа является разработка нечетких моделей, весь необходимый инструментарий предусмотрен в пользовательском интерфейсе инженера по знаниям, что позволяет не обращаться к сторонним платным программным пакетам. Задача разработки нечетких моделей подразумевает в том числе и наполнение базы нечетких производственных правил. Несмотря на гибкость программного комплекса и его модульность, позволяющую не разрабатывать каждую модель заново, а лишь модифицировать базовую версию, это самый наукоемкий и ресурсозатратный процесс. Качество работы системы напрямую зависит от качества базы производственных правил, которая, как правило, составляется на основе технологических регламентов, специализированной литературы и формализованных знаний экспертов в предметной области.

Производственный персонал – разработанный программный комплекс может работать в двух режимах – автоматическом (непрерывном) и ручном. В первом случае систему нужно лишь запустить и настроить, после чего она будет автоматически взаимодействовать с базой данных, проверять сведения о текущем состоянии продукции, передаваемые с различных датчиков на производственной линии, и, в случае необходимости, дополнять базу данных. Во втором случае пользователь может вручную провести внеочередную проверку образца продукции, выбрав подходящий тип нечеткой модели и введя все необходимые сведения об образце. Наличие в программе двух режимов работы позволяет применять ее как на реальных производствах, так и в обучающих целях.

Разработанная система предназначена для интеграции в «Программный комплекс обработки больших промышленных данных» (ПКОБД) [Чистякова, Полосин, 2019]. Интеграция описываемой системы в ПКОБД позволит дополнить имеющуюся в базах данных информацию о продукции производств ТКМ, что позволит улучшить результаты работы системы анализа больших данных, снизить количество производственного брака путем обеспечения более точных результатов анализа образцов продукции и сообщения своевременных рекомендаций по управлению производственному персоналу.

### Заключение

Проведен анализ процесса производства целлюлозно-бумажных изделий, а также процесса производства полимерных пленок как объектов управления. Подробно изучены типовые технологические регламенты этих производств, соответствующие ГОСТы и производственные данные. Выявлены схожие и отличительные черты этих производств и продукции. Определена актуальность и целесообразность разработки системы анализа и управления качеством продукции полимерных и целлюлозно-бумажных производств на базе нечетких моделей.

Приведено обоснование использования механизмов нечеткой логики, описан процесс синтеза нечетких моделей, приведен пример нечеткой модели, а также часть базы нечетких производственных правил.

Описана архитектура системы (программного комплекса) для анализа и управления качеством продукции ТКМ. Разработанный программный комплекс позволяет производить анализ характеристик продукции даже в условиях неполноты входных данных, оперируя как количественными, так и качественными показателями продукции, что является основной отличительной чертой разработки.

Описанный программный комплекс может быть применен как для анализа продукции на конечной, так и на промежуточной стадии (для полимерной пленки – на стадии экструдата), благодаря чему появляется возможность определить брак продукции на ранних стадиях и минимизировать временные затраты на подачу регулирующих воздействий, что приведет к уменьшению количества брака.

Разработка является открытой, настраиваемой и автономной – для использования описываемого программного обеспечения необходимо лишь установить сопутствующие драйвера и саму программу. Однако описанная система разрабатывалась с учетом возможности интеграции в «Программный комплекс обработки больших промышленных данных».

Искомый эффект – улучшение качества производимой продукции, достигается за счет полноты данных об анализируемых образцах. Критерий эффективности описываемой системы – приведение качественных данных к количественному виду и интеграция полученных данных в базу остальных количественных оценок системы анализа больших данных. Благодаря этому ПКОбД получит возможность выдавать более точные советы по управлению качеством продукции, что сократит время на принятие управленческих решений и поспособствует повышению качества продукции.

### Список литературы

- Байченко А.А., Байченко Л.А., Арет В.А. 2014. Применение нечеткой логики в управлении предприятием пищевой промышленности. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 3: 35–69.
- ГОСТ Р 58106-2018. 2018. Национальный стандарт Российской Федерации. Бумага для офисной техники. Технические условия. М.: Стандартинформ
- Гусеница Я.Н., Гречкина О.В., Ляскин А.С. 2024. Методика ранжирования свойств компетентности эксперта на основе анализа иерархий. Известия Тульского государственного университета. 4: 115–118. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-115-116.
- Ерошкин С.Ю., Поляков В.В. 2005. Анализ подходов к оценке экспертной информации при прогнозировании инновационных решений. Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 3: 150–169.
- Камаев А.В., Разыграев А.С., Чистякова Т.Б. 2019. Программный комплекс для управления толщиной каландрированных материалов. Математические методы в технике и технологиях: сборник трудов международной научной конференции: в 12 т. Т. 12 / под общ. ред. А.А. Большакова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 214–217.
- Колерт К., Воскресенский А.М., Красовский В.Н. 2020. Интенсификация процессов каландрования полимеров / Под ред. А.М. Воскресенского. Л.: Химия, 224.
- Кондрашкова Г.А., Леонтьев В.Н., Шапоров О.М. 1989. Автоматизация технологических процессов производства бумаги. – М.: Лесная промышленность, 328.
- Макарук Р.В., Гиляров В.Н. 2013. Нечёткие модели и программный комплекс для анализа характеристик вычислительной сети. Экономика. Информатика. 22-1: С.165–170.
- Манукян Г.А. 2021. Анализ брака и потерь от брака. Форум молодых ученых. 4(56): 256–259.
- Носов А.Н., Бугров А.Н. 2013. Современные средства и технологии обеспечения анализа и планирования производств. Системный анализ в науке и образовании. 2: 118–132.
- Савченко Д.В., Резникова К.М., Смышляева А.А. 2021. Нечеткая логика и нечеткие информационные технологии. Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 1(8). DOI: 10.15862/10ECOR121.
- Тедтоев А.Ч., Макарук Р.В., Чистякова Т.Б. 2023. Нечеткие модели и программный комплекс для анализа и управления потребительскими характеристиками тонких каландрированных материалов. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 65(91): 97–104. DOI: 10.36807/1998-9849-2023-65-91-97-104.
- Тетерин М.А., Разыграев А.С., Аразтаганова А.М., Чистякова Т.Б. 2017. Гибридная система для интеллектуального анализа больших данных и управления качеством полимерных материалов. Математические методы в технике и технологиях: сборник трудов международной научной конференции: в 12 т. Т. 8 / под общ. ред. А.А. Большакова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 22–26.
- Фляте Д.М. 1988. Технология бумаги. М.: Лесная промышленность, 440.
- Фозилов М.М., Чистякова Т.Б., Полосин А.Н. 2021. Компьютерная система анализа промышленных данных для оценки состояния экструзионного оборудования в производствах полимерных

- пленок. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 57: 81–89. DOI: 10.36807/1998-9849-2021-57-83-81-89.
- Чарват Р.А. 2009. Производство окрашенных пластмасс / пер. с англ. 2-е изд. СПб.: НОТ, 400.
- Чистякова Т.Б., Полосин А.Н., Тетерин М.А., Кляйнерт Ф. 2021. Компьютерная система обработки промышленной информации для управления производством многоассортиментных полимерных пленок. Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах, 1: 231–234.
- Чистякова Т.Б., Куликов С.И., Полосин А.Н., Колерт К. 2007. ПО для управления толщиной каландрованных тонких материалов. Автоматизация в промышленности. 1: 8–11.
- Чистякова Т.Б., Полосин А.Н. 2019. Математические модели и программный комплекс для управления экструзионными процессами в гибких многоассортиментных производствах полимерных материалов. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математическое моделирование и программирование». 12(4): 5–28. DOI: 10.14529/mmp190401
- Шашихина О.Е., Чистякова Т.Б. 2021. Компьютерная система для оптимального планирования полимерных производств. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 59: 94–100. DOI: 10.36807/1998-9849-2021-59-85-94-100.
- Щербак Н.В. 2019. Расчет и подбор оборудования в производстве бумаги: учебное пособие. Архангельск: САФУ, 152.
- Abaei G., Selamat A., Al Dallah J. 2020. A fuzzy logic expert system to predict module fault proneness using unlabeled data. Journal of King Saud University Computer and Information Sciences. 32(6): 684–699. DOI: 10.1016/j.jksuci.2018.08.003.
- Chistyakova T.B., Kleinert F., Teterin M.A. 2020. Big data analysis in film production. Studies in Systems, Decision and Control. 259: 229–236. DOI: 10.1007/978-3-030-32579-4\_18.
- Kohlert M., Chistyakova T.B. 2015. Advanced process data analysis and on-line evaluation for computer-aided monitoring in polymer film industry. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 29: 83–88.
- Kong L., He W., Yang C., Sun C. 2019. Adaptive fuzzy control for coordinated multiple robots with constraint using impedance learning. IEEE transactions on cybernetics. 49(8): 3052–3063, DOI: 10.1109/TCYB.2018.2838573.
- Seletkov I.P., Yasnitsky L.N. 2019. Application of Matrix Fuzzy Logic in Machine Independent Temperature Controller. Advances in Intelligent Systems and Computing. 850: 443–449.
- Tedtoev A.Ch. Makaruk R.V., Chistyakova T.B. 2022. Methods and technologies of application of fuzzy models for processing industrial data and quality management of polymer materials. Proceedings of 2022 25rd International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2022: 25, 34–37. DOI 10.1109/SCM55405.2022.9794846.

## References

- Baychenko A.A., Baychenko L.A., Aret V.A. 2014. Application of fuzzy logic in the management of food industry enterprises. Scientific journal NRU ITMO Series "Economics and Environmental Management". 3: 35–69 (in Russian).
- GOST R 58106-2018. 2018. Nacionalnyj standart Rossijskoj Federacii. Bumaga dlya ofisnoj texniki Texnicheskie usloviya [State Standard R 58106-2018. Paper for office equipment. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ.
- Gusenicza Ya.N., Grechkina O.V., Lyaskin A.S. 2024. Method for ranking properties of expert competence based on hierarchy analysis. Izvestiya Tula State University. 4: 115–118 (in Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-115-116.

- Eroshkin S. Yu., Polyakov V. V. 2005. Analiz podkhodov k ocenke ekspertnoj informacii pri prognozirovanii innovacionnyx reshenij [Analysis of approaches to assessing expert information when predicting innovative solutions]. Nauchny'e trudy: Institut narodnoozyajstvennogo prognozirovaniya RAN [Scientific works: Institute of National Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences]. 3:150–169.
- Kamaev A. V., Razygraev A. S., Chistyakova T. B. 2019. Programmnyj kompleks dlya upravleniya tolshhinoj kalandrirovannyx materialov [Software package for controlling the thickness of calendered materials]. Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyax: sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii [Mathematical methods in engineering and technology: collection of proceedings of the international scientific conference]. Ed. by A. A. Bolshakov. 12: 214–217.
- Kohlert C., Voskresenskij A. M., Krasovskij V. N. 2020. Intensifikaciya processov kalandrovaniya polimerov [Intensification of polymer calendering processes]. Ed. by A. M. Voskresenskij. Leningrad, Ximiya, 224.
- Kondrashkova G. A., Leontev V. N., Shapоров O. M. 1989. Avtomatizaciya tekhnologicheskix processov proizvodstva bumagi [Automation of paper production processes]. Moscow, Lesnaya promyshlennost, 328.
- Makaruk R. V., Gilyarov V. N. 2013. Nechyotkie modeli i programmnyj kompleks dlya analiza xarakteristik vychislitelnoj seti [Fuzzy models and software package for analyzing the characteristics of a computer network]. Ekonomika. Informatika [Economics. Information technologies]. 22-1: 165–170.
- Manukyan G. A. 2021. Analysis of marriage and losses from marriage. forum-nauka.ru. 4(56): 256–259 (in Russian).
- Nosov A. N., Bugrov A. N. 2013. Sovremennyye sredstva i tekhnologii obespecheniya analiza i planirovaniya proizvodstv [Modern tools and technologies for providing analysis and production planning]. Sistemnyj analiz v nauke i obrazovanii. 2: 118–132 (in Russian).
- Savchenko D. V., Reznikova K. M., Smyshlyaeva A. A. 2021. Fuzzy logic and fuzzy information technology. Russian journal of resources, conservation and recycling. 8(1) (in Russian). Available at: <https://resources.today/PDF/10ECOR121.pdf>. (accessed 28.04.2024) DOI: 10.15862/10ECOR121.
- Tedtoev A. Ch., Makaruk R. V., Chistyakova T. B. 2023. Fuzzy models and software package for analysis and control of consumer characteristics of thin calendered materials. Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 65(91): 97–104. DOI: 10.36807/1998-9849-2023-65-91-97-104.
- Teterin M. A., Razygraev A. S., Araztaganova A. M., Chistyakova T. B. 2017. Gibridnaya sistema dlya intellektual'nogo analiza bol'shix dannyx i upravleniya kachestvom polimernyx materialov [Hybrid system for intelligent big data analysis and quality management of polymer materials]. Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyax: sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii [Mathematical methods in engineering and technology: collection of proceedings of the international scientific conference], Ed. by A. A. Bolshakov. 8: 22–26 (in Russian).
- Flyate D. M. 1988. Tekhnologiya bumagi [Paper technology]. Moscow, Lesnaya promyshlennost [Forestry industry], 440.
- Fozilov M. M., Chistyakova T. B., Polosin A. N. 2021. A computer system of industrial data analysis for evaluation of extrusion equipment state at polymeric film production. Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 57: 81–89 (in Russian). DOI: 10.36807/1998-9849-2021-57-83-81-89.
- Charvat R. A. 2009. Coloring of plastics. Fundamentals. 2 ed. Saint Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii, 400.
- Chistyakova T. B., Polosin A. N., Teterin M. A., Kleinert F. 2021. Computer system for processing industrial information for controlling the production of multi assortment polymeric films. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya po problemam upravleniya v tekhnicheskix sistemax [International scientific conference on control problems in technical systems]., 1: 231–234.
- Chistyakova T. B., Kulikov S. I., Polosin A. N., Kolert K. 2007. PO dlya upravleniya tolshhinoj kalandrovannyx tonkix materialov [Thickness management software for calendered thin materials]. Avtomatizaciya v promyshlennosti. 1: 8–11.

- Chistyakova T.B., Polosin A.N. 2019. Matematicheskie modeli i programmnyj kompleks dlya upravleniya ekstruzionnymi processami v gibkix mnogoassortimentryx proizvodstvax polimernyx materialov [Mathematical models and software package for controlling extrusion processes in flexible multi-product production of polymer materials]. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming. 12(4): 5–28. DOI: 10.14529/mmp190401.
- Shashikhina O.E., Chistyakova T.B. 2021. Computer system for optimal planning of polymer productions. Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 59: 94–100 (in Russian). DOI: 10.36807/1998-9849-2021-59-85-94-100.
- Shcherbak N.V. 2019. Raschet i podbor oborudovaniya v proizvodstve bumagi [Calculation and selection of equipment in paper production]. 2 ed. revised. Arkhangel'sk, NArFU, 152 p.
- Abaei G., Selamat A., Al Dallal J. 2020. A fuzzy logic expert system to predict module fault proneness using unlabeled data. Journal of King Saud University Computer and Information Sciences. 32(6): 684–699. DOI: 10.1016/j.jksuci.2018.08.003.
- Chistyakova T.B., Kleinert F., Teterin M.A. 2020. Big data analysis in film production. Studies in Systems, Decision and Control. 259: 229–236. DOI: 10.1007/978-3-030-32579-4\_18.
- Kohlert M., Chistyakova T.B. 2015. Advanced process data analysis and on-line evaluation for computer-aided monitoring in polymer film industry. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 29: 83–88.
- Kong L., He W., Yang C., Sun C. 2019. Adaptive fuzzy control for coordinated multiple robots with constraint using impedance learning. IEEE transactions on cybernetics. 49(8): 3052–3063, DOI: 10.1109/TCYB.2018.2838573.
- Seletkov I.P., Yasnitsky L.N. 2019. Application of Matrix Fuzzy Logic in Machine Independent Temperature Controller. Advances in Intelligent Systems and Computing. 850: 443–449.
- Tedtoev A.Ch. Makaruk R.V., Chistyakova T.B. 2022. Methods and technologies of application of fuzzy models for processing industrial data and quality management of polymer materials. Proceedings of 2022 25rd International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2022: 25, 34–37. DOI 10.1109/SCM55405.2022.9794846.

**Конфликт интересов:** о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

**Conflict of interest:** no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 24.09.2024

Received September 24, 2024

Поступила после рецензирования 03.12.2024

Revised December 03, 2024

Принята к публикации 05.12.2024

Accepted December 05, 2024

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Тедтоев Азамат Черменович**, аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования и управления, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

[ORCID: 0009-0003-2396-0389](https://orcid.org/0009-0003-2396-0389)

**Azamat Ch. Tedtoev**, Postgraduate student of the Department of Computer-Aided Design and Control, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Saint Petersburg, Russia

[ORCID: 0009-0003-2396-0389](https://orcid.org/0009-0003-2396-0389)

**Макарук Роман Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и управления, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

[ORCID: 0000-0002-9035-9353](https://orcid.org/0000-0002-9035-9353)

**Roman V. Makaruk**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer-Aided Design and Control, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Saint Petersburg, Russia

[ORCID: 0000-0002-9035-9353](https://orcid.org/0000-0002-9035-9353)



**Чистякова Тамара Балабековна**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой систем автоматизированного проектирования и управления, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

 [ORCID: 0000-0002-0145-9679](https://orcid.org/0000-0002-0145-9679)

**Tamara V. Chistyakova**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer-Aided Design and Control, St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Saint Petersburg, Russia

 [ORCID: 0000-0002-0145-9679](https://orcid.org/0000-0002-0145-9679)