

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»

**З. М. СЕЛИВАНОВА, К. С. СТАСЕНКО**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДОПУСКОВОГО  
КОНТРОЛЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Рекомендовано Научно-техническим советом ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
в качестве монографии



---

Тамбов  
◆ Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» ◆  
2015

УДК 681.518.3:536.212.3

ББК 3965.06+Н307

С29

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО

«Пензенский государственный университет»

*Н. К. Юрков*

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО

«Тамбовский государственный технический университет»

*Д. М. Мордасов*

**Селиванова, З. М.**

С29 Теоретические основы построения интеллектуальных информационно-измерительных систем допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов : монография / З. М. Селиванова, К. С. Стасенко. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 200 с. – 500 экз.

ISBN 978-5-8265-1494-8.

Представлено математическое, алгоритмическое и информационное обеспечение для разработки интеллектуальных информационно-измерительных систем допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов, а также пример структуры и алгоритм функционирования интеллектуальной измерительной системы.

Будет полезна аспирантам, студентам и специалистам, занимающимся разработкой интеллектуальных информационно-измерительных систем.

УДК 681.518.3:536.212.3

ББК 3965.06+Н307

**ISBN 978-5-8265-1494-8**

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО ТГТУ), 2015

## ВВЕДЕНИЕ

---

В современном мире из-за быстрого роста цен на энергоносители первостепенной становится проблема улучшения энергоэффективности производственных и жилых зданий и сооружений. Одним из возможных вариантов решения данной проблемы является использование при строительстве зданий качественных теплоизоляционных материалов.

Производство теплоизоляционных материалов, отвечающих требованиям нормативно-технической документации, зависит от точности технологического процесса их изготовления и контроля теплопроводности выпускаемых материалов. Точность технологического процесса определяется соответствием его режимных параметров заданным допустимым значениям. Точный допусковый контроль теплопроводности материалов зависит от метрологического уровня измерительных средств.

Для контроля теплофизических свойств (ТФС) теплоизоляционных материалов широко применяются информационно-измерительные системы (ИИС) допускового контроля. Но как показывают проведённые исследования, существующие ИИС не в полной мере отвечают всем необходимым характеристикам: оперативности и точности контроля, требуемому диапазону для теплопроводности исследуемых материалов, устойчивости к воздействию дестабилизирующих факторов, функционированию в условиях неопределённости.

Основным направлением повышения точности допускового контроля режимных параметров технологического процесса изготовления теплоизоляционных материалов и их теплопроводности является разработка интеллектуальной информационно-измерительной системы (ИИИС) допускового контроля, позволяющей принимать решения в условиях неопределённости для выбора оптимальных режимных параметров на основе создания базы знаний, метода повышения точности допускового контроля и алгоритмического обеспечения ИИИС. В связи с этим задача создания ИИИС допускового контроля, повышающей качество теплоизоляционных материалов, является важной и актуальной.

Измерительные системы допускового контроля рассмотрены в работах М. П. Чапенко, Г. Г. Раннева, А. В. Фремке, Е. С. Платунова, А. Ф. Фомина и др. Однако существующие ИИС не оценивают точность допускового контроля теплопроводности и в алгоритмах

мониторинга режимных параметров (РП) технологического процесса производства теплоизоляционных материалов не учитывают порог принадлежности к зоне допуска контролируемых параметров.

Теоретические основы построения интеллектуальных систем изложены в научных трудах Д. А. Поспелова, К. А. Пупкова, Д. В. Гаскарова, Э. И. Цветкова, В. А. Геловани, М. Минского, Т. А. Гаврилова, Ж. Л. Лорьера, В. Н. Романова, В. С. Соболева, Д. Хофмана, С. М. Мандельштама, Н. Нильсона, Э. Ханга, Ю. Я. Любарского, Р. А. Алиева, А. В. Андрейчикова и других авторов. Анализ представленных интеллектуальных измерительных средств показывает, что не представлены ИИИС, повышающие точность допускового контроля контролируемых параметров, и существует необходимость их разработки.

Теоретические основы создания методов и устройств неразрушающего контроля теплофизических свойств твёрдых материалов изложены в трудах А. В. Лыкова, В. П. Вавилова, Е. Г. Карслоу, Г. М. Кондратьева, Е. С. Платунова, А. Г. Шашкова, С. В. Мищенко, С. В. Пономарёва, В. В. Власова, В. В. Клюева, В. П. Козлова и др. В рассмотренных методах не учитывается воздействие дестабилизирующих факторов при контроле теплопроводности теплоизоляционных материалов.

Научная задача исследования заключается в повышении качества теплоизоляционных материалов в результате разработанного метода повышения точности допускового контроля, отличающегося определением порога принадлежности к зоне допуска контролируемых параметров с использованием разработанной ИИИС.

Целью представленного исследования является повышение точности изготовления и допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов (ДК ТТМ) для повышения их качества в результате применения разработанной ИИИС ДК ТТМ, позволяющей получать оперативную и точную информацию о теплофизических свойствах материалов и в соответствии с этим изготавливать теплоизоляционные материалы с заданной теплопроводностью.

Для достижения поставленной цели в данной работе решаются следующие задачи:

- проведения анализа технологического процесса изготовления минераловатных плит в целях определения воздействующих факторов и параметров, влияющих на качество теплоизоляционных материалов;
- разработки математической модели допускового контроля теплоизоляционных материалов, необходимой для разработки метода и алгоритма ДК;

- получения аналитической зависимости теплопроводности минераловатных плит от управляемых и неуправляемых параметров технологического процесса изготовления теплоизоляционных материалов;
- разработки метода повышения точности допускового контроля и изготовления минераловатных плит с заданной теплопроводностью;
- разработки алгоритма мониторинга и допускового контроля, а также коррекции управляемых и неуправляемых параметров технологического процесса производства минераловатных плит;
- создания модели представления знаний и на её основе базы знаний ИИИС;
- разработки структуры ИИИС ДК ТТМ с соответствующим метрологическим и программным обеспечением и алгоритма её функционирования, реализующей разработанные метод допускового контроля и алгоритм мониторинга и коррекции параметров техпроцесса изготовления минераловатных плит.

При выполнении исследования применялись методы теории измерительных систем и допускового контроля, искусственного интеллекта, теории нечётких множеств, принятия решений, информационных технологий, классической теории теплопроводности, математического и имитационного моделирования.

В монографии представлены полученные новые научные результаты:

1. Разработана математическая модель допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов с учётом управляемых режимных параметров технологического процесса (концентрация исходного сырья ( $C$ ); влажность, фракционный и химический состав сырья ( $W_{вс}$ ); концентрация модифицирующих добавок ( $C_d$ ); концентрация связующего компонента ( $C_{св}$ ); параметр термообработки минераловатного «ковра» ( $P_T$ ); скорость вращения валков центрифуги ( $S_{ц}$ )) и неуправляемых (температура окружающей среды ( $T_{oc}$ ) и относительная влажность в помещении ( $V_{oc}$ )), точности определения теплопроводности теплоизоляционных материалов и метрологического уровня ИИИС, а также допустимых значений параметров структурных компонентов модели.

2. Создан метод повышения точности допускового контроля режимных параметров и изготовления минераловатных плит с заданной теплопроводностью, заключающийся в поэтапном контроле режимных параметров на стадиях техпроцесса изготовления минват, обеспечивающий требуемую точность технологического процесса и теплопро-

водности готовой продукции, отличающийся определением при допусковом контроле порога принадлежности (вновь введённого понятия) к зоне допуска контролируемых параметров в результате реализации интеллектуальной процедуры определения функций принадлежности нечётких множеств к зоне допуска режимных параметров.

Экспериментальным путём установлено, что порог принадлежности к зоне допуска должен быть не более 1% от значений контролируемых режимных параметров, при котором обеспечивается погрешность измерения теплопроводности до 4%, что необходимо при допусковом контроле минераловатных плит в диапазоне теплопроводности от 0,032 до 0,046 Вт/(м·К).

3. Разработан алгоритм мониторинга и допускового контроля управляемых и неуправляемых режимных параметров технологического процесса производства минераловатных плит, отличающийся коррекцией управляемых и учётом влияния неуправляемых параметров технологического процесса их изготовления.

4. Предложена структура интеллектуальной информационно-измерительной системы допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов и алгоритм её функционирования, реализующая созданные метод и алгоритм мониторинга параметров технологического процесса изготовления минераловатных плит, отличающаяся созданными блоками мониторинга и коррекции режимных параметров, базой знаний, содержащей процедурные правила определения порога принадлежности к зоне допуска контролируемых параметров при функционировании ИИИС.

Созданное математическое и алгоритмическое обеспечение ИИИС ДК ТТМ позволило повысить точность контролируемых параметров до 4% и вероятность выхода качественной продукции с 0,80 до 0,95.

Разработано программное обеспечение для реализации алгоритмов мониторинга режимных параметров и функционирования ИИИС ДК ТТМ.

Структурно монография состоит из введения, трёх глав, заключения, списка используемых источников и приложений.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, описана цель, решаемые задачи и методы исследования, полученные научные результаты, краткое содержание глав.

В **первой главе** рассмотрены и подробно проанализированы существующие информационно-измерительные системы неразрушающего контроля теплофизических свойств твёрдых материалов, методы неразрушающего контроля, проведён анализ технологических процессов изготовления теплоизоляционных материалов.

В результате установлено, что оптимальным методом для экспериментального определения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов является неразрушающий метод, исключаяющий влияние внешних условий на процесс исследования и основанный на измерениях температур на поверхности образца; существующие ИИС контроля теплопроводности не обеспечивают требуемого уровня точности допускового контроля режимных параметров на этапе технологического производства материалов; на этапе технологического процесса производства материалов необходим учёт и коррекция управляемых параметров, их точное измерение и контроль, а также учёт влияния неуправляемых режимных параметров, что не обеспечивается при алгоритмическом обеспечении известных ИИС. На основе анализа существующих методов и информационно-измерительных систем допускового контроля осуществлена постановка задач исследования.

Во **второй главе** исследуется точность изготовления и допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов в целях повышения их качества. Проведён анализ воздействующих факторов на технологический процесс изготовления теплоизоляционных материалов и ИИИС ДК ТТМ.

На каждом этапе производства происходит воздействие различных факторов, влияющих на качество изготавливаемых минераловатных плит. Основное влияние на качество продукции оказывают три режимных параметра: ( $T_{oc}$ ), ( $C$ ) и ( $P_T$ ).

Разработана математическая модель допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов в виде совокупности аналитических зависимостей  $\lambda = f(Q_u)$ ,  $\lambda = f(Q_m)$ ,  $\lambda = f(\delta_{иис})$ .

Получены аппроксимирующие и экспериментальные зависимости  $\lambda$  для рипора и изорупа от управляемых параметров (входных параметров исходного сырья  $\lambda = f(C_n)$ , состава габбро-базальтовой породы  $\lambda = f(C_{гбп})$ , концентрации минераловатной смеси  $\lambda = f(Q_c)$ ); изофаса-ЛМ и неуправляемых параметров (температуры  $\lambda = f(T_{oc})$  и влажности окружающей среды  $\lambda = f(V_{oc})$ ); изофаса-ЛМ и параметров метрологического уровня ИИИС ( $\lambda = f(\sigma_{иис})$ ), использующиеся в базе знаний (БЗ) ИИИС для принятия решений о точности технологического процесса изготовления минераловатных плит и необходимости коррекции режимных параметров.

Создан метод повышения точности допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов в результате определения порога принадлежности к зоне допуска контролируемых параметров в целях повышения точности технологического процесса изготов-

ления минераловатных плит с заданной теплопроводностью при мониторинге и коррекции управляемых режимных параметров и учётом влияния неуправляемых параметров.

Получены функции принадлежности к порогу зоны допуска для основных видов минераловатных плит и восьми контролируемых РП.

Экспериментальным путём получены значения порога принадлежности к зоне допуска (варьированием значением порога допуска от 0,1 до 10%) для параметров сырья, управляемых РП, неуправляемых РП, входных параметров. Исходя из анализа порога допуска, расчёта теплопроводности и погрешности измерения, становится очевидным, что наименьшее значение погрешности при изменении порога на 0,1%, следовательно, возможное отклонение от допуска будет равным  $\Delta = 1\%$  (РП). Сформированы рекомендации по допусковым значениям для РП.

В **третьей главе** представлена структура ИИИС ДК ТТМ с соответствующим информационным, алгоритмическим и метрологическим обеспечением.

Создан алгоритм мониторинга и допускового контроля на основе использования математической модели и метода допускового контроля с использованием разработанной базы знаний ИИИС ДК ТТМ.

Информационное обеспечение ИИИС ДК ТТМ осуществляется с использованием созданной базы знаний и базы данных. В базе знаний хранятся процедурные правила в виде фреймов, использующиеся при реализации алгоритмического обеспечения ИИИС.

Разработаны процедурные правила для реализации метода допускового контроля в базе знаний ИИИС, используемые при принятии решений по коррекции технологического процесса изготовления минват, если контролируемые параметры не соответствуют допуску.

Разработана структурная схема ИИИС ДК ТТМ и алгоритм функционирования ИИИС, реализующий созданный метод повышения точности допускового контроля. Отличительными компонентами структурной схемы ИИИС являются: алгоритмическое обеспечение, блок мониторинга и допускового контроля, блок коррекции, база знаний и данных.

В процессе функционирования ИИИС происходит сравнение полученных результатов измерений с допустимыми. Если значение РП не соответствует порогу принадлежности к зоне допуска РП, то следует обращение к БЗ для выполнения интеллектуальной процедуры принятия решения о коррекции режимных параметров технологического процесса изготовления теплоизоляционных материалов. После этого

поэтапная процедура сравнения РП с их допустимыми значениями повторяется до наступления соответствия зоне допуска РП. Затем осуществляется измерение и ДК теплопроводности ТМ. В ИИИС применяется метод неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов, заключающийся в тепловом воздействии на поверхность ТМ линейного нагревателя измерительного зонда импульсами заданной частоты и мощности с последующей регистрацией температурно-временных характеристик в области контакта зонда и ТМ, информация о которых используется в базе знаний ИИИС для расчёта коэффициента теплопроводности ТМ. Согласно алгоритму ДК, происходит определение принадлежности  $\lambda \in \lambda_{\text{доп}}$  и  $\delta_\lambda \in \delta_{\lambda, \text{доп}}$ . В случае их несоответствия области допустимых значений цикл измерения и контроля РП повторяется.

Как показывает анализ расчётных и экспериментальных данных, вероятность производства качественных минераловатных плит в результате применения ИИИС ДК ТТМ возрастает с 0,80 до 0,95.

Проведён метрологический анализ результатов измерения  $\lambda$  ТМ с использованием ИИИС ДК ТТМ: проведены метрологический анализ и оценка погрешностей (систематических погрешностей, случайных погрешностей, полная оценка погрешностей с учётом случайной и систематической).

Метрологический анализ результатов исследований погрешностей показывает, что относительная погрешность измерений  $\lambda$  минераловатных плит составляет не более 4%, что соответствует допустимым значениям для данного класса измерительных средств.

**В заключении** изложены основные результаты исследования, решения поставленных задач и достижения цели работы.

**В приложениях** представлены: процедурные правила, функции принадлежности, листинг программы реализации алгоритма функционирования интеллектуальной информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств теплоизоляционных материалов и мониторинга режимных параметров.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

---

$C$	– концентрация исходного сырья;
$W_{\text{всс}}$	– влажность, фракционный и химический состав сырья;
$C_{\text{д}}$	– концентрация модифицирующих добавок;
$C_{\text{св}}$	– концентрация связующего компонента;
$P_T$	– параметр термообработки минераловатного «ковра»;
$S_{\text{ц}}$	– скорость вращения валков центрифуги;
$T_{\text{ос}}$	– температура окружающей среды;
$V_{\text{ос}}$	– относительная влажность в помещении;
$\lambda$	– коэффициент теплопроводности;
$Q_u$	– управляемые параметры техпроцесса изготовления минват;
$Q_m$	– неуправляемые параметры техпроцесса изготовления минват;
$\Delta_{\text{ИИИС}}$	– метрологический уровень интеллектуальной информационно-измерительной системы;
$C_{\text{и}}$	– входные параметры исходного сырья;
$C_{\text{ГБП}}$	– состав габбро-базальтовой породы;
$Q_{\text{с}}$	– концентрация минераловатной смеси;
$\Delta$	– возможное отклонение от порога принадлежности к зоне допуска;
$\lambda_{\text{доп}}$	– область допустимых значений для коэффициента теплопроводности;
$\delta_{\lambda}$	– заданная точность определения теплопроводности;
$\delta_{\lambda \text{ доп}}$	– область допустимых значений для точности определения теплопроводности;
$\alpha$	– температуропроводность;
$\tau$	– момент времени, когда разница между избыточными температурами в двух находящихся на разном расстоянии от линейного источника тепла поверхностных точек исследуемого тела достигнет некоторого, заранее требуемого и заданного значения;
$E_T$	– термо-ЭДС;
$\lambda_{\text{эт}}$	– эталонное значение коэффициента теплопроводности для образцового материала;
$\alpha_{\text{эт}}$	– эталонное значение коэффициента температуропроводности для образцового материала;
$q$	– тепловой поток;
$R$	– заданное расстояние от плоскости контакта тел;

$a$	– координата сечения;
$T$	– значение температуры;
$S$	– интегральное во времени значение температуры;
$T_0$	– первоначальная температура;
$T_{\text{зад}}$	– заранее заданное значение температуры;
$F_x$	– поток тепловых импульсов;
$T_{\text{изм}}$	– значение температуры измеренное;
$R$	– радиус круга;
$A_{\text{физ } i}$	– $i$ -я измеряемая физическая величина;
$A_{\text{эл } i}$	– $i$ -й электрический сигнал;
$A_{\text{рег}}$	– регулирующая величина;
$Q_{PG}$	– расход (поток) объёма газа;
$\Delta P$	– перепад давления;
$S_0$	– площадь сечения образца;
$e$	– толщина образца;
$\mu$	– динамическая вязкость газа;
$K$	– проницаемость;
$\varepsilon_S$	– пористость среды;
$k$	– структурный фактор;
$S_v$	– удельная поверхность;
$\eta$	– динамическая вязкость воздуха;
$r$	– удельное сопротивление воздухопроницанию;
$K_T$	– критерий точности технологического процесса изготовления минераловатных плит;
$X$	– вектор оптимальных режимных, энергетических и структурных параметров процесса, которые контролируются и корректируются в ходе процесса изготовления;
$\alpha_1$	– ошибка первого рода;
$\beta$	– ошибка второго рода;
$Y$	– вектор параметров техпроцесса, которые не варьируются в процессе производства, но оказывают влияние на значения критерия точности;
$\mathcal{E}$	– вектор показателей экономической эффективности, определяющий потери оперативности и экономичность технологического процесса;
$K_H$	– критерий надёжности;
$K_H$	– общая эффективность технологического процесса изготовления минераловатных плит;
$Q_{\text{д.п}}$	– доля дефектной продукции;
$M$	– математическое ожидание;

$\sigma_i$	– среднеквадратичное отклонение;
$P$	– доля годной продукции;
$\Delta D$	– область допустимых нормируемых значений по каждому режимному параметру;
$\Delta x_n$	– порог принадлежности к зоне допуска контролируемых параметров (нижний предел);
$\Delta x_b$	– порог принадлежности к зоне допуска контролируемых параметров (верхний предел);
$P_{\text{доп}}$	– допустимая вероятность получения качественной продукции;
$A$	– уровень доверия результатам измерения;
$\sigma_X$	– среднеквадратичное отклонение;
$D$	– дисперсия;
$N$	– объём выборки для контролируемых параметров;
$P_{г.б}$	– вероятность признания объекта контроля не удовлетворяющим установленным требованиям;
$P_{б.г}$	– вероятность признания объекта контроля удовлетворяющим требованиям;
$P_{г.г}$	– вероятность признания объекта контроля удовлетворяющим требованиям;
$P_{б.б}$	– вероятность признания объекта контроля не удовлетворяющим требованиям;
$D$	– дисплей;
$G$	– информационные сигналы с устройств;
$K_{\text{мк}}$	– сигнал контроля с микроконтроллера;
$G_P$	– информационный сигнал о состоянии режимных параметров;
$G_S$	– согласующий сигнал;
$G_R$	– регулирующий сигнал;
$G_K$	– сигнал контроля;
$U_S$	– управляющий сигнал;
$I$	– информационный сигнал;
$M$	– множество используемых в ИИИС методов контроля теплопроводности;
$O$	– множество исследуемых материалов;
$D_f$	– множество дестабилизирующих факторов;
$\tau_{\text{уст}}$	– установившееся время, при котором критерий, комплексно учитывающий потери точности и оперативности, минимален;
$\Delta_{\text{П.т}}$	– прирост показателя точности;

$\Delta_{\text{Пон}}$	– прирост показателя оперативности;
$\gamma$	– приведённая погрешность;
$\varepsilon$	– погрешность для одного младшего значащего разряда;
$\Delta_c$	– систематическая погрешность;
$\Delta_{\text{сл}}$	– случайная погрешность;
ТФС	– теплофизические свойства;
ИИС	– информационно-измерительные системы;
ИИИС	– интеллектуальные информационно-измерительные системы;
РП	– режимные параметры;
ИИИС	– интеллектуальная информационно-измерительная система
ДК ТТМ	допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов;
НК	– неразрушающий контроль;
ДФ	– дестабилизирующие факторы;
БЗ	– база знаний;
БД	– база данных;
ИВС	– измерительно-вычислительная система;
КИС	– компьютерно-измерительная система;
АЦП	– аналогово-цифровой преобразователь;
ЦАП	– цифроаналоговый преобразователь;
СКТФП	– система контроля теплофизических параметров;
ГСП	– государственная система приборов;
ПП	– первичный преобразователь;
АСУ	– автоматизированная система управления;
КС	– контроль свойств;
БПР	– блок принятия решений;
ПИИ	– пользовательский интеллектуальный интерфейс;
П	– пользователь;
Э	– эксперт;
БЛВ	– блок логического вывода;
К	– компьютер;
ИД	– интеллектуальный датчик;
СИП	– система измерительных преобразователей;
ПВБ	– переносной вычислительный блок;
ИИЗ	– интеллектуальный измерительный зонд;
МК	– микроконтроллер;
УФИН	– устройство формирования импульсов напряжения;
БДУ	– блок дифференциальных усилителей;

ИЯ	– измерительная ячейка;
Д	– датчики;
ИВУ	– интеллектуальное вычислительное устройство;
Ини	– интеллектуальный интерфейс;
СДК	– система допускового контроля;
ЖКИ	– жидкокристаллический индикатор;
КЛ	– клавиатура;
БЛВ	– блок логического вывода;
ПК	– персональный компьютер;
ЛУ	– логические устройства;
ВД	– весовое дозирование;
ИК	– измерительный канал;
КК	– канал контроля;
КМ	– канал мониторинга;
КАЦП	– канал аналогово-цифрового преобразования;
КП	– канал питания;
СКО	– среднеквадратичное отклонение;
$D_{в}$	– верхняя граница допуска;
$D_{н}$	– нижняя граница допуска;
ПММ	– полиметилметакрилат;
БМДКР	– блок мониторинга и допускового контроля режимных параметров;
П	
УОУД	– устройство обработки и управления данными;
ТЛИМП	– технологическая линия изготовления минераловатных плит;
ОПС	– оборудования для подготовки сырья;
ОФВ	– оборудование для формирования волокна;
УКК	– устройство климат-контроля;
МП	– минераловатные плиты;
УСИУД	– устройство согласования и управления данными;
УФТВ	– устройство формирования тепловых воздействий;
СД	– система датчиков;
Н	– нагреватель;
ТБ	– термобатарей;
ИУ	– измерительные устройства;
$P_{т}$	– показатель точности;
$P_{оп}$	– показатель оперативности;
МРЗ	– младший значащий разряд

# 1. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

---

## 1.1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Информационно-измерительные системы предназначены для автоматизированного получения количественной информации об исследуемом объекте с помощью процедур измерения и контроля, обработки данной информации и передачи её в виде множества именованных чисел, изречений, графиков и т.д., демонстрирующих состояние исследуемого объекта. ИИС принимают измеряемые величины непосредственно от объекта, а на выходе должна формироваться количественная информация об объекте. Системы измерения значительно отличаются от других информационных систем и систем автоматического управления. Так, системы вычислительные, связи и управления могут получать на входе информацию от других систем. Безусловно, информация, которая получается на выходе системы, применяется для принятия решений, тем не менее использование информации обычно не является функцией ИИС [1].

В измерительных системах соединяются технические средства, начиная от датчиков и оканчивая устройствами выдачи информации, а также программы, нужные как для управления работой непосредственно самой системы, так и дающие возможность решать в системе измерительные и вычислительные задачи, а также контролировать определённый поставленный эксперимент.

В соответствии с определением в ГОСТ 8.437–81 [2] можно сделать вывод, что информационно-измерительные системы – объединяющее определение. Под ним имеется в виду класс средств, соединяющий системы измерения, контроля, технической диагностики и опознавания.

Методы определения теплофизических свойств материалов очень разнообразны. Классифицировать их можно следующим образом:

- по тепловому режиму – стационарные и нестационарные;
- по виду измеряемой величины – методы определения тепловой активности, способы нахождения коэффициента теплопроводности, способы объединённого установления коэффициентов тепло- и температуропроводности ( $\lambda$ ,  $\alpha$ ).

Также все известные способы и формализующие их средства измерения делятся на два вида: контактные и бесконтактные. Количество контактных методов и подходов существенно превышает число бесконтактных. Это объясняется тем, что контактные методы появились гораздо раньше в экспериментальной теплофизике. И тем не менее в последнее время наблюдается значительный рост применения и использования бесконтактных методов и средств, что разъясняется необходимостью высокой производительности измерений, возможностями дистанционного управления и обширными функциональными возможностями применения по диапазонам и классам исследуемых материалов, в том числе расширением номенклатуры, объёма выпуска и совершенствованием выпускаемой серийно измерительной и теплофизической аппаратуры, работающей с помощью инфракрасного излучения.

Характерной особенностью контактных методов неразрушающего контроля теплофизических свойств теплоизоляционных материалов является то, что измерительный зонд, на поверхности контакта с материалом которого расположены нагреватели и термодатчики, подвергается контакту с участком поверхности исследуемого объекта, или же участок поверхности контролируемого материала приводится в контакт с эталонным образцом, в качестве которого применяется материал с постоянным во времени и известным до некоторой степени определённости точности теплофизических свойств, а в плоскости их соединения размещаются нагреватель и термопреобразователи.

Установление теплофизических свойств стационарным методом базируется на том, что поток тепла, проходящий через рассматриваемое тело в момент измерения, остаётся устойчивым по величине и направлению. Известные стационарные методы [3, 4] различаются по способам учёта и по возмещению потерь, по формам и размерами исследуемых материалов, расположением нагревателей, конструктивными особенностями измерительных ячеек, способами регистрации и обработки измерительной информации [5 – 7].

Основными методами определения теплофизических свойств материалов являются методы, образованные на закономерностях нестационарного потока тепла [9]. Нестационарные методы контроля качественных свойств материалов разделяются на группы [10 – 13]:

- а) методы регулярного режима;
- б) методы, созданные на основании установления параметров нестационарного температурного поля в момент начального периода его формирования.

Существуют регулярные режимы 1-го, 2-го и 3-го рода. В целом применение методов регулярного режима изучено Г. М. Кондратьевым [9] и его последователями. Многочисленные вариации данных методов рассматриваются в работах, которые описывают способы измерения теплофизических свойств материалов в форме цилиндров, стержней, многоуровневых конструкций и т.д.

Более всего подходящими для точного и быстрого неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов считаются методы измерения, созданные на основании определения параметров нестационарного температурного поля в начальной стадии процесса его формирования. В таких методах изучаемый образец представляется в виде полуограниченного тела [14 – 16].

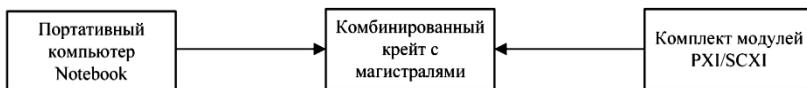
При неразрушающем контроле комплекса теплофизических характеристик широкое применение получили методы, основанные на импульсном тепловом действии линейного источника тепла. В этих методах образцовый объект контроля представляет собой полубесконечное (в отношении тепла) тело, отделённое плоскостью, на поверхность которого помещены линейный источник тепла и температурный датчик [17].

## **1.2. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Под ИИС понимается класс средств информационно-измерительной техники, в который входят системы измерения, контроля, технической диагностики и распознавания.

Основу информационно-измерительной системы составляют технические средства (от датчиков и до устройств выдачи информации) и программы реализации управления функционированием непосредственно системы, а также решения в ИИС вычислительных и измерительных задач, управления конкретным экспериментом.

Известна информационно-измерительная система для регистрации теплофизических параметров. Система регистрирует аналоговые сигналы термопар при поочерёдном опросе каналов с возможностью компенсации температуры холодного спая, а также регистрацию сигналов термометров сопротивления при последовательном опросе каналов. ИИС разработана по модульному принципу на основе нынешних известных стандартов на измерительно-управляющее оборудование. Структура ИИС обеспечивает вероятность усовершенствования с помощью установки необходимых модулей, смены модулей или замещения используемого программного обеспечения. Структурная схема информационно-измерительной системы приведена на рис. 1.1 [18].



**Рис. 1.1. Структурная схема ИИС для регистрации теплофизических параметров**

Усложнение современных объектов исследований, увеличение числа и диапазонов измеряемых параметров, повышение требований к точности измерений и их быстродействию привело к появлению компьютерно-измерительных систем (КИС) и их разновидности – виртуальным приборам [19]. Компьютер в составе системы работает в режиме реального масштаба времени или в режиме *online*. КИС отличаются следующими преимуществами: высокое количество типовых используемых компьютерных программ, к которым имеет доступ оператор, дающих возможность решать широкий спектр поставленных целей и задач (контроль и измерение сигналов, снятие информации с датчиков, мониторинг многочисленных промышленных установок и т.д.); вероятность быстрой передачи результатов измерений по ограниченным и всеобщим компьютерным сетям; значительно проработанный графический интерфейс, дающий возможность быстро освоиться пользователю при работе с системой; применение памяти большой ёмкости; вероятность разработки программ для компьютера в целях разрешения поставленных задач измерения; оперативное использование различных устройств документирования результатов измерений.

Пример структурной схемы КИС предоставлен на рис. 1.2 [19].



**Рис. 1.2. Структурная схема КИС**

Схема воссоздаёт как последовательную, так и параллельную конфигурацию строения системы.

Отдельные элементы системы взаимодействуют с помощью внутренней шины компьютера. К ней подключают и внешние устройства (дисплей, внешняя память, принтер), и измерительную схему, включающую в себя коммутатор, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и блок эталонных управляемых программой показателей напряжения и частоты. При использовании цифроаналогового преобразователя (ЦАП) появляется возможность воспроизводить контролируемые аналоговые сигналы. Интерфейсный модуль коммутирует измерительный прибор с магистралью интерфейса приборов. Коммутатор служит гарантией подачи аналоговых напряжений с датчиков вне системы на её узлы. Относительно элементарные компьютерно-измерительные системы размещают на единственной плате компьютера. Бывают и более сложноорганизованные виды схематических конструкций КИС. В них в зависимости от требующей решения задачи по выбранной и разработанной программе присоединяют необходимые элементы измерений, таким образом видоизменяется архитектура строения системы.

На рисунке 1.3 представлена структурная схема ИИС неразрушающего контроля (НК) теплофизических свойств материалов (ТФСМ) [20].

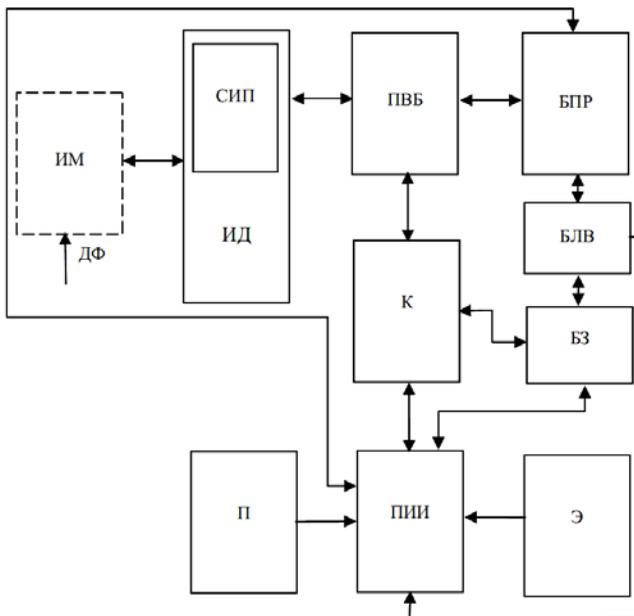


Рис. 1.3. Структурная схема ИИС НК ТФСМ

ИИС включает следующие основные компоненты: база знаний (БЗ), блок принятия решений (БПР), пользовательский интеллектуальный интерфейс (ПИИ) общения пользователя (П) и эксперта (Э), блок логического вывода (БЛВ). Состоит система из следующих блоков и узлов: компьютер (К), интеллектуальный датчик (ИД), в состав которого входит система измерительных преобразователей (СИП), переносной вычислительный блок (ПВБ). В СИП производится выбор соответствующих измерительных преобразователей в зависимости от поставленной измерительной задачи по определению характеристик материалов. ПВБ необходим для измерения, регистрации, обработки и хранения экспериментальных данных, определения информации о воздействующих ДФ, запуска алгоритма измерений и структуры ИИИС в зависимости от измерительной ситуации, выполнения последовательности измерения, принятия решений и представления выходной информации в виде, удобном для пользователя.

### 1.2.1. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

В настоящее время широко применяются интеллектуальные ИИС [21]. В качестве примера можно привести разработанную в Тамбовском государственном техническом университете интеллектуальную информационно-измерительную систему неразрушающего контроля теплофизических свойств твёрдых материалов. Разработанная ИИИС предназначена для неразрушающего контроля ТФС различных твёрдых материалов, применяемых в строительной и химической промышленности, авиации, энергетике, приборостроении. Данная система предоставляет возможность контроля широкого комплекса измеряемых параметров материалов, оперативности, высокого метрологического уровня результатов измерения, достаточно высокой устойчивости к воздействию дестабилизирующих факторов. В ИИИС реализован принцип теплофизических измерений, заключающийся в активном тепловом воздействии измерительного зонда на поверхность исследуемого объекта, регистрации температурно-временных характеристик в плоскости их контакта и последующей их обработке с помощью микроконтроллера ИИИС в соответствии с математической моделью теплопроводности двух неограниченных полумассивов с мгновенным линейным источником тепла в плоскости их контакта.

Структурная схема ИИИС представлена на рис. 1.4. ИИИС включает следующие устройства: интеллектуальный измерительный зонд ИИЗ, состоящий из микроконтроллера МК1 со встроенным аналогово-

цифровым преобразователем, устройства формирования импульсов нагрева УФИН, БДУ – блока дифференциальных усилителей, измерительных ячеек ИЯ1, ИЯ2, датчик температуры окружающей среды  $D_{T_{oc}}$ ; ИВУ – интеллектуальное вычислительное устройство, включающее БЗ, Ини – интеллектуальный интерфейс, БПР – блок принятия решений, СДК – систему допускового контроля, микроконтроллер МК2, ЖКИ – жидкокристаллический индикатор, Кл – клавиатуру; БЛВ – блок логического вывода; ПК – персональный компьютер.

Применение данной ИИИС НК ТФСМ, например, для контроля теплопроводности при производстве бетонов позволяет сократить потери тепловой энергии до 30% в решении задачи энергосбережения при отоплении зданий и сооружений.

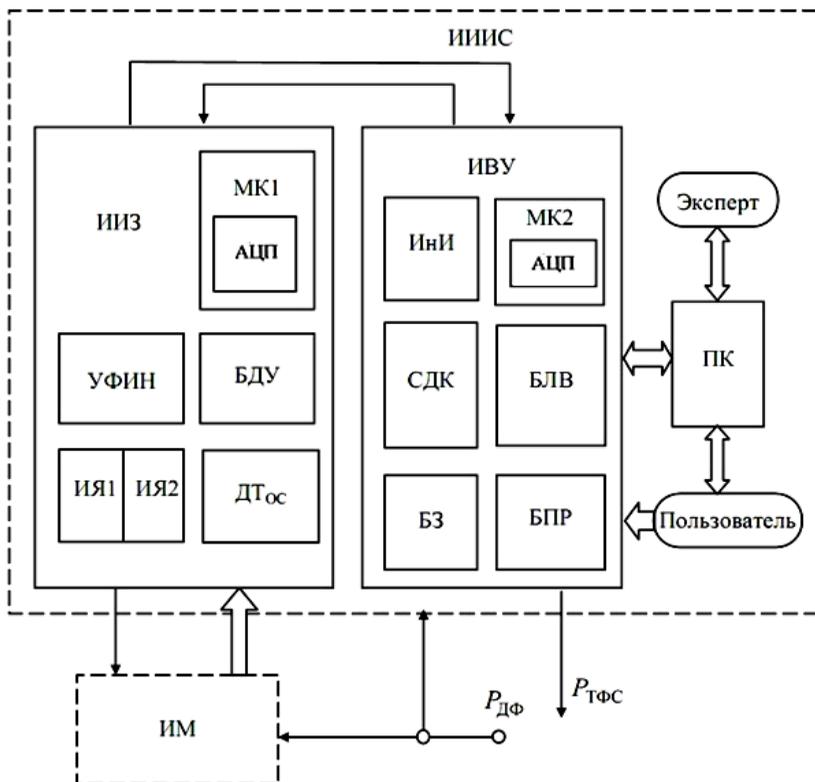


Рис. 1.4. Структурная схема ИИИС неразрушающего контроля ТФС твёрдых материалов

## 1.2.2. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ

Известен измеритель-регулятор ТРМ 138 [22], который предназначен для измерения, регистрации и регулирования температуры, а также обладает возможностью регистрации измеренных параметров на персональном компьютере (рис. 1.5). Благодаря своей универсальности, а именно наличию восьми входов, к ТРМ 138 могут быть подключены датчики разного типа и конфигурации, что даёт возможность одновременно измерять и контролировать несколько различных параметров. Измеритель ТРМ 138 с термопарами имеет диапазон измерений  $-50...+750$  °С, разрешающую способность  $0,1$  °С, предел основной приведённой погрешности  $0,25\%$ .

Блок обработки данных ТРМ 138 содержит восемь логических устройств (ЛУ). К каждому ЛУ может быть подключено одно из восьми выходных устройств, порядковый номер которого задаётся при программировании.

Основные функции:

- допусковый контроль температуры или другой физической величины (давления, влажности, уровня и т.п.) в нескольких зонах одновременно (до 8-ми);
- восемь входов для подключения датчиков;
- подключение к разным входам датчиков разных типов из числа приведённых в списке для одной модификации;
- сигнализация «авария объекта» о выходе любой из контролируемых величин за заданные пределы;
- сигнализация «авария датчика» при обрыве или коротком замыкании датчика;
- два выходных реле для включения аварийной сигнализации или аварийного отключения установки;



Рис. 1.5. Измеритель-регулятор температуры ТРМ 138

- индикация измеренных величин и заданных для них уставок на двух встроенных индикаторах;
- программирование кнопками на лицевой панели прибора;
- сохранение заданных параметров при отключении питания;
- регистрация контролируемых параметров на персональный компьютер через адаптер.

Допусковый контроль и сбор данных для определения теплофизических свойств веществ, материалов и изделий (температуропроводности, теплоёмкости, теплопроводности) производится системой *SCADA*. *SCADA* – система *OWEN PROCESS MANAGER (OPM)* – программное обеспечение, предназначенное для осуществления связи ПК с приборами ОВЕН, подключёнными с помощью преобразователя интерфейса *RS-485 AC 3*.

### 1.2.3. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Анализатор *TCi* может использоваться с одним или двумя сенсорами, и время измерений теплопроводности твёрдых, жидких веществ, порошков и паст составляет менее чем 5 с (рис. 1.6) [23]. Поэтому после измерения неизменённый образец можно вернуть в первоначальную партию.

Применяемые современные серийные приборы допускают определение теплофизических свойств на материалах (образцах) некрупных размеров в форме дисков, пластин, трубок малой толщины или проволок.



Рис. 1.6. Анализатор теплопроводности *TCi*

Если подробнее рассмотреть прибор *ТСi*, для него объект измерения должен соответствовать следующим размерам: диаметр 15 мм, толщина 1...5 мм. Кроме того, объекты, для которых требуется определить теплофизические характеристики, помимо заранее определённых габаритов, должны иметь особые специализированные пазы небольшого радиуса для внедрения термопар.

Подобные ограничения значительно обедняют потенциал применения приборов серийного производства устройств мониторинга теплоизоляционных, строительных и твёрдых материалов. Некоторые образцы материалов (гетерогенных, композиционных) не допускают возможности уменьшения до требуемой степени. Теплоизоляционные материалы располагают своими особенностями структуры и формы. Также следует учесть, что по стандартам государства, чтобы исследовать свойства строительных или теплоизоляционных материалов, их образцы производятся в форме квадратной призмы.

Таким образом, наиболее соответствующим методом для проведения экспериментов по исследованию теплофизических свойств теплоизоляционных материалов является метод неразрушающего контроля, который не допускает воздействия условий извне на процедуру исследования и основывающийся на измерении температуры непосредственно вдоль поверхности материала. Исследование стабилизированного теплового режима в теплоизоляционных материалах представляет собой не только практический, но и важный научный интерес.

### **1.3. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Используя современные научные знания и технологии, создаются новые искусственные материалы для строительства, эффективность которых многократно превышает все ранее известные. Их применение в строительстве позволяет снизить расходы на отопление зданий, а условия проживания людей сделать более комфортными. Одним из таких современных материалов являются минеральные ваты.

В настоящее время выпускаются теплоизоляционные материалы высокого качества, востребованные строительным рынком России. Выпуск теплоизоляционных материалов в Тамбовской области осуществляет предприятие ЗАО «Изорок» [24].

Влага – это один из факторов, разрушающих или ухудшающих качества строительных конструкции. Минераловатная продукция ИЗОРОК обработана специальными водоотталкивающими добавками, препятствующими проникновению молекулярной влаги в структуру

материала и повышающими тем самым стабильность теплозащитных свойств утеплителя.

Ограждающая конструкция, утеплённая минераловатной продукцией ИЗОРОК, обладает более высокой паропроницаемостью, по сравнению с традиционными строительными материалами (кирпич, бетон, пенопласт и др.). Это преимущество позволяет выводить лишнюю влагу из строительных конструкций и дополнительно вентилировать внутреннее воздушное пространство.

Структурная схема, отражающая технологию производства, представлена на рис. 1.7 [24].

При подборе сырьевых компонентов задаются главные потребительские свойства минеральной ваты. Основное сырьё – вулканические горные (базальты, диабазы, габбро) и осадочные (мергели, доломиты, известняки) породы. Здесь важно точное соблюдение пропорций, химического, фракционного состава и влажности сырья. Исходные компоненты обрабатываются до получения нужного минерального, фракционного состава, влажности и подаются в плавильный агрегат.

Плавка компонентов происходит в печах при температуре 1500 °С. Плавка происходит в ванной печи или коксовой вагранке. Ванная печь представляет собой разогреваемый горелками резервуар с расплавом, куда дозаторами подаются исходные компоненты.



Рис. 1.7. Структурная схема процесса производства минеральной ваты

Расплав попадает на центрифугу, где под действием центробежных сил образуется волокно, выдуваемое воздушным потоком в камеру волоконосаждения. В камере волокно дополнительно обрабатывается связующим и модифицирующими гидрофобизирующими и обеспыливающими добавками.

Получение волокна происходит на многовалковой центрифуге со скоростью вращения валков до 7000 об/мин. Полученное волокно осаждается в камере барабанного типа и обрабатывается водоотталкивающими и обеспыливающими добавками.

Распределение волокна в минераловатном «ковре» надлежащим образом задаёт маятниковый раскладчик, который укладывает «ковёр» в несколько слоёв с разнонаправленной ориентацией волокон. Далее происходит дополнительная подпрессовка «ковра» в гофрировщике. Волокно подаётся в маятниковый раскладчик, который формирует «ковёр» из нескольких слоёв разнонаправленных волокон, а гофрировщик дополнительно подпрессовывает «ковёр». Режим работы раскладчика и линии синхронизирован по производительности для придания «ковру» требуемой плотности.

Сформованный «ковёр» поступает в камеру термообработки, где происходит полимеризация связующего и продукт приобретает требуемые свойства. Минераловатный «ковёр», сформованный маятниковым раскладчиком, поступает в камеру термообработки, где происходит полная полимеризация связующего и «ковёр» приобретает требуемые плотность, прочность и толщину.

Современный узел резки способен придать продукции требуемые размеры с высокой точностью и производительностью. Узел резки с высокой производительностью и прецизионной точностью, вертикальными фрезами и горизонтальными ленточными ножами создаёт плиты и маты необходимой длины, ширины и толщины.

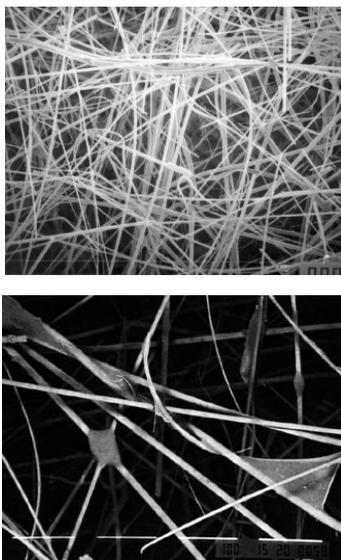
Упаковка изделий в термоусадочную плёнку производится на линии, состоящей из трёх машин, режим работы которых автоматически подбирается исходя из условий производительности и вариантов выпускаемой продукции. Конвейерные манипуляторы автоматически сортируют плиты и маты заданных размеров. Упаковка готовой продукции ведётся в термоусадочную плёнку. Производительность упаковочных машин автоматически синхронизирована со скоростью линий.

Готовая к отгрузке покупателем продукция, хранящаяся в сухих закрытых помещениях, с помощью автомобильных погрузчиков загружается, по желанию заказчика, на автомобильный или железнодорожный транспорт. Упаковки с отсортированной продукцией, прошедшей строгий контроль качества, формируются в паллеты и поступают на склад, откуда отгружаются потребителям в разные регионы.

Теплофизические и физико-механические свойства теплоизоляционных материалов находятся в зависимости от широкого спектра факторов, таких как: состояние исходного сырья, технологический способ формирования волокна, внутренние объёмные размеры (диаметр, длина) волокон, фазовый и химический состав смеси, конфигурация материала, класс связующего компонента.

Главными действующими факторами на проницаемость материалов для теплоизоляции из стекловолокна при их одинаковой плотности считаются усреднённый диаметр волокна, удельная поверхность и взаиморасположение волокон внутри материала.

Для теплоизоляционных изделий с низкой плотностью структуры в наибольшей степени проявляется воздействие диаметра волокна на проницаемость. Примеры микроструктуры теплоизоляционных материалов из стекловолокна разного диаметра, зафиксированные с одинаковым увеличением на электронном микроскопе, представлены на рис. 1.8. На фотографиях изображены изделия равной пористости и плотности (около  $30 \text{ кг/м}^3$ ), различия только лишь в диаметре волокна. На первом снимке диаметр волокна примерно равен  $3 \dots 4 \text{ мкм}$ , а на втором –  $10 \dots 12 \text{ мкм}$ . На запечатлённых кадрах очевидно, что даже при равной плотности (или пористости), структура материалов, а исходя из этого, и их технические показатели сильно различаются.



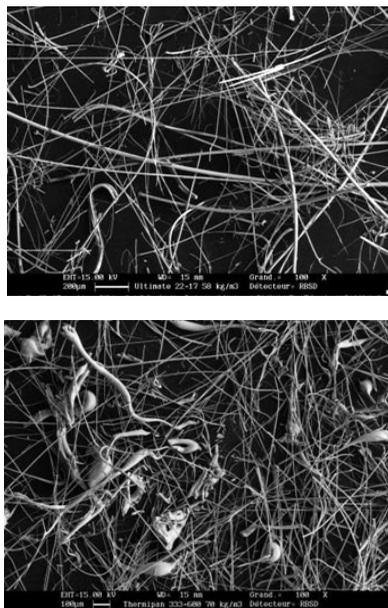
**Рис. 1.8. Примеры структуры теплоизоляционных материалов на основе стекловолокна**

Изделие, у которого диаметр волокна меньше, обладает более высокой удельной поверхностью. В момент протекания воздушного потока сквозь материал существенно увеличиваются силы трения воздуха о поверхность волокон, это приводит к снижению проницаемости материала.

Следовательно, если показатели плотности равны, материалы для теплоизоляции, изготовленные из стекловолокна, обладают как минимум в 2 раза наименьшей проницаемостью, чем теплоизоляционные изделия, сделанные из каменной ваты.

Таким образом, чтобы получить равную проницаемость воздуха, материал из каменной ваты должен быть минимум в 2 раза более плотным по структуре, чем теплоизоляционный материал из стекловолокна.

Подробное изучение внутреннего микроскопического строения материалов (рис. 1.9) позволяет сделать вывод, что даже при равной плотности (одинаковом количестве фазы твёрдого вещества в одной единице объёма) материалы из каменной ваты содержат кроме волокнистых ещё и неволокнистые частицы – «корольки», содержание которых колеблется в районе 15...20% по массе.



**Рис. 1.9. Пример микроструктуры теплоизоляционных материалов из стекловолокна и каменной ваты**

Неволокнистые частицы довольно крупные по объёму (диаметр может достигать до 100 мкм), их присутствие ощутимо снижает число волоконистых составляющих в единице объёма, а, следовательно, и удельную поверхность, находящуюся в контакте с воздухом. Значение коэффициента теплопроводности материалов (как и проницаемость) зависит от параметров структуры (пористости, диаметра волокон, удельной поверхности и распределения (ориентации) волокна в материале). При различных условиях эксплуатации теплопроводность материала находится в зависимости от температуры и влажности окружающей среды, а также факторов конструктивных особенностей.

Уменьшение диаметра волокон в материалах для теплоизоляции и улучшение однородности волокон по отношению к диаметру (если иные условия равны) приводят к снижению коэффициента теплопроводности этих материалов и к вытекающему из этого увеличению энергоэффективности изделий с применением подобных материалов.

Во внутреннем микроскопическом объёме материала волокнистые частицы выполняют роль сквозных или же несквозных включений, влияющих на теплопроводность. Укрупнение числа теплопроводных частиц в случае сохранения той же плотности материала (общей площади сечения) снижает пропускаемый ими поток тепла. Снижение диаметра и повышение числа волокон на единицу объёма уменьшают проницаемость газа и скорость конвекции вследствие становящейся больше удельной поверхности волокон и усиливающегося сопротивления трению на месте разделения фазы газа и поверхности волокнистых частиц. Снижается и радиационная составляющая потока тепла из-за увеличения числа экранов, отвечающих за отражение, на единицу объёма материала. Все обозначенные выше особенности плюсуются и отражаются в уменьшении итогового показателя коэффициента теплопроводности для материалов с равной плотностью в результате уменьшения диаметра волокна.

Все эти известные результаты исследований позволяют сделать ряд выводов:

- показатели качества материалов для теплоизоляции, производимых разнообразными предприятиями, варьируются в большом диапазоне;
- теплопроводность и проницаемость материалов для теплоизоляции в случае, когда остальные условия равны, находятся в зависимости от структуры волокна, в частности, от усреднённого диаметра волокна и присутствия неволокнистых частиц;

– в случае материалов из минваты ещё одним фактором, влияющим на ухудшение качества изделий, является содержание в микроструктуре неволоконистых частиц – «корольков»;

– материалы из минваты с одинаковой плотностью и равными средними диаметрами волокон в результате увеличения в структуре «корольков» имеют большее значение теплопроводности и проницаемости, а значит и снижается их теплоэффективность;

– в случае одинаковой плотности изделия из каменной ваты обладают проницаемостью в среднем в 2 раза большей, чем проницаемость материалов из стекловолокна. Таким образом, равные значения проницаемости воздуха достигаются, если применять материалы из стекловолокна с плотностью в 2 раза меньшей, чем из каменной ваты.

## **2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

---

### **2.1. АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНУЮ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНУЮ СИСТЕМУ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ ИХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

Одно из основных свойств, от которого зависят качественные характеристики материалов для теплоизоляции, это теплопроводность. В теплоизоляционных материалах проводимость тепла зависит непосредственно от характеристик и объёма структуры пор. Сквозь слой воздуха теплота перемещается с помощью конвекции, излучения и теплопроводности. Обмен тепла конвекцией усиливается в случае увеличения размера пор и прослоек воздуха, которые соединяют эти поры. На обмен тепла посредством излучения главным образом влияют эксплуатационные условия (например, температура окружающей среды). В теплоизоляционных материалах обеспечивается при изготовлении мелкий объём пор, который будет усложнять конвекционную и лучевую отдачу тепла. Немаловажно обеспечить и равное расположение пор в структуре материала. Теплоизолирующую роль воздух лучшего всего осуществляет в случае, когда поры закрыты. Указанные свойства теплоизоляционных материалов, влияющие на их теплопроводность, необходимо учитывать при оценке качества выпускаемой продукции и соответствующей модернизации технологического процесса изготовления теплоизоляционных материалов.

Все теплоизоляционные материалы можно разделить по их теплопроводности на три класса: низкой теплопроводности – до  $0,06 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , средней –  $0,061 \dots 0,115 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , высокой –  $0,116 \dots 0,200 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Для теплоизоляционных материалов важна зависимость теплопроводности от степени кристаллизации и химического состава материала. Насколько сложен химический состав и насколько близка структура материала к «рыхлой», настолько и меньше значение теплопроводности. У кварца, к примеру, теплопроводность равна  $7 \dots 8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,

в то время как у обычного стекла, кроме кремнезёма, содержащего множество иных оксидов и структура которого очень близка к «рыхлой», теплопроводность равняется  $0,75 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . В материалах с кристаллической структурой теплопроводность зависит от объёма кристаллов, их расположения и дефективности решётки. С увеличением числа кристаллов и в случае движения потока тепла вдоль оси теплопроводность возрастает, причём в данном случае она будет существенно больше, нежели при направленности теплового потока перпендикулярно оси. Также значение теплопроводности снижается с ростом массы молекул и увеличивается при возрастании температуры плавления.

В случае с кристаллическими телами теплопроводность снижается с возрастанием числа атомов в молекулярной структуре. Обратная зависимость наблюдается у жидкостей и газов. Для основного количества теплоизоляционных материалов имеет место линейная зависимость теплопроводности от температуры. Например, теплопроводность неорганических материалов под влиянием положительных температур меняется на  $0,0025 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  при каждом изменении температуры на градус, под влиянием отрицательных температур – на  $0,005 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Для органических материалов в аналогичной ситуации: при положительных температурах на  $0,0035 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , при отрицательных – на  $0,005 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Обычно в любых нормативных материалах значение теплопроводности указывается обычно при температуре  $(25 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ .

Критично допускать возможность намокания (увлажнения) материалов для теплоизоляции, так как значение теплопроводности воды почти в 25 раз выше, нежели теплопроводность воздуха. В целях уменьшения сорбционного влияния влажности теплоизоляционные материалы подвергаются гидрофобизации по всему объёму, также положительный эффект оказывает уменьшение размера пор, это объясняется тем, что именно в них конденсируется влага. Поглощение воды зависит в первую очередь от структуры теплоизоляционного материала. Например, если поры закрыты (пенопласт, пеностекло), водопоглощение относительно мало, если же пористость открыта, то оно может равняться  $400 \dots 600\%$ .

Важнейшим условием получения требуемой точности определения теплопроводности ( $\lambda$ ) является использование ИИИС для контроля измеряемых параметров и мониторинга технологического процесса производства теплоизоляционных материалов. Точный контроль и измерение  $\lambda$  теплоизоляционных материалов, а именно минераловатных плит, в узком интервале значений ( $\lambda = [0,028 \dots 0,047] \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ) значительно затруднён, потому как требуется обеспечение высокого метрологического уровня системы, точного процесса производства материа-

лов для теплоизоляции, снижение влияния дестабилизирующих факторов на работу измерительной системы и технологического процесса, так как эти факторы оказывают большое влияние на погрешность результатов измерения  $\lambda$  [25].

Для большей наглядности приведены данные различных технических характеристик некоторых теплоизоляционных материалов (минераловатных плит) (табл. 2.1).

Теплофизические и физико-механические свойства теплоизоляционных материалов находятся в зависимости от обширного комплекса условий, таких как: состав исходного сырья, способ вытягивания волокна, размеры и объёмы волокон, фазовый и химический состав волокон, структурные конфигурации материала, концентрации связующего компонента [26].

Показатели качества материалов для теплоизоляции, которые производятся многочисленными фирмами, варьируются в широком диапазоне. При всех равных условиях теплопроводность теплоизоляционных материалов находится в зависимости от структуры волокна, в частности от его диаметра и присутствия в составе неволоконистых частиц.

Показатели теплопроводности, важные для сравнения материалов с одинаковой плотностью, определяются в основном диаметром волокна, направлением волокон в микроструктуре и идентичностью волокон по диаметру.

Для материалов с малым диаметром волокон значения теплопроводности существенно ниже, как и значения проницаемости тепла, а, следовательно, они обладают более высоким уровнем теплотехнической эффективности.

Свойства минеральной ваты находятся в прямой зависимости от концентрации сырьевой смеси и концентрации добавок, например при повышении содержания кремнезёма повышается температура её размягчения и температуроустойчивость. Коэффициент теплопроводности зависит от средней толщины волокон, объёмного веса и пористости. Оптимальной является пористость 90%. Толщина волокна может колебаться от 2 до 40 мкм.

Следует учесть также, что для теплоизоляционных материалов ещё одним аспектом, влияющим на снижение качества изделия, считается содержание в составе материала неволоконистых частиц – «корольков». В случае одинаковой плотности и равном диаметре волокон увеличение числа «корольков» ведёт к увеличению проницаемости и теплопроводности, что в конечном итоге приводит к ухудшению теплотехнической эффективности.

## 2.1. Технические характеристики минераловатных плит

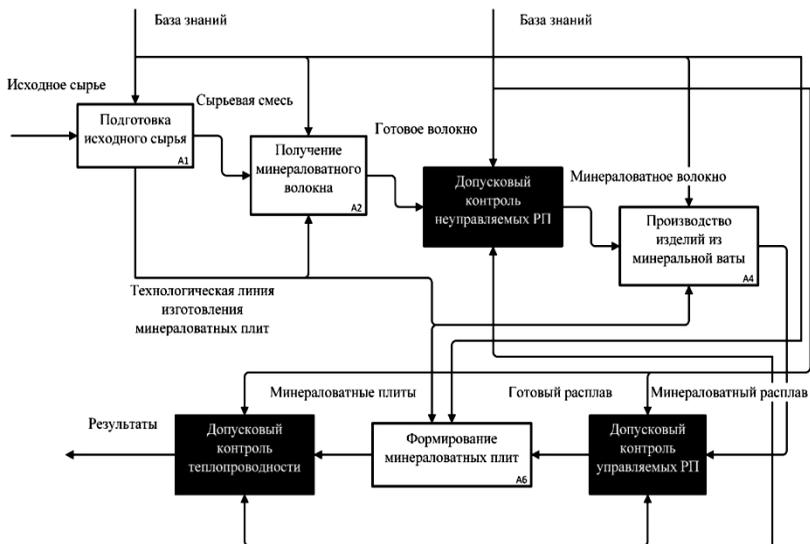
Теплоизоляционные материалы	Плиты					Маты				Цилиндры	
	ИЗО-ЛАЙТ	ИЗО-ВЕНТ	ИЗО-РУФ-В	ИЗО-ФАС-160	ИЗО-ФАС-ЛМ	ПП-75С	ПП-125С	ММ1-100	ММ2-100		ММЗ-100
Показатели (ед. изм.)	550	990	1175	1160	990	550...70	990...100	990...100	990...100	990...100	ИЗОШЕЛЛ, ИЗОШЕЛЛ-Л, ИЗОШЕЛЛ-ЛМ
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7	–	–	–	–	7	4	26,0	26,0	26,0	100
Сжимаемость, %, не более	–	–	–	–	–	–	–	86	91	91	–
Упругость, %, не менее	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Теплопроводность при (283 ± 5) К, Вт/(м·К) × 10 <sup>-2</sup>	03,2	03,2	03,5	03,4	03,9	03,3	03,3	–	–	–	3,9
Теплопроводность при (298 ± 5) К, Вт/(м·К) × 10 <sup>-2</sup>	03,5	03,5	03,8	03,8	04,3	03,6	03,7	03,9	03,9	03,9	4,5
Теплопроводность в условиях эксплуатации А, Вт/(м·К) × 10 <sup>-2</sup>	04,2	04,2	04,5	04,5	04,7	04,3	04,4	–	–	–	–
Теплопроводность в условиях эксплуатации Б, Вт/(м·К) × 10 <sup>-2</sup>	04,4	04,5	04,8	04,8	05,1	04,5	04,6	–	–	–	–
Содержание органических веществ по массе, %, не более	2,5	3,5	4,0	4,0	3,5	3,0	4,0	3,5	4,0	4,0	4,0

Технологический процесс производства минераловатных плит очень сложен, он включает в себя большое количество разнообразных операций (подготовка сырья, плавка компонентов, получение волокна, обработка, распределение, получение формы волокна, резка и т.д.).

Особенности технологии производства минераловатных плит заключаются в следующем. При подборе сырьевых компонентов задаются главные потребительские свойства минеральной ваты. Основное сырьё – горные породы габбро-базальтового типа и их аналоги. Здесь важно точное соблюдение пропорций, химического, фракционного состава и влажности сырья. Производство качественных минераловатных утеплителей невозможно без многоуровневой подготовки сырья. Исходные компоненты обрабатываются до получения нужного минерального, фракционного состава, влажности и подаются в плавильный агрегат.

Функциональная схема технологического процесса изготовления минераловатных плит представлена на рис. 2.1.

Компьютерный контроль десятков параметров формирует расплав нужного химического состава и вязкости. Плавка компонентов происходит в печах при температуре 1500 °С. Расплав осуществляется в ванной печи или коксовой вагранке. Получение волокна происходит на многовалковой центрифуге со скоростью вращения валков до 7000 об/мин.



**Рис. 2.1. Функциональная схема технологического процесса изготовления минераловатных плит**

Полученное волокно осаждается в камере барабанного типа и обрабатывается водоотталкивающими и обеспыливающими добавками. Распределение волокна в минераловатном «ковре» надлежащим образом задаёт маятниковый раскладчик, который укладывает «ковёр» в несколько слоёв с разнонаправленной ориентацией волокон.

Таким образом, к управляемым параметрам на этапе технологического производства теплоизоляционных материалов относятся: влажность, фракционный и химический состав сырья; концентрация модифицирующих добавок; компонента; концентрация исходных компонентов; концентрация связующего; скорость вращения валков центрифуги; уровень термообработки. Неуправляемыми параметрами являются температура окружающей среды и относительная влажность в помещении.

При производстве материалов необходимо обеспечить равномерность распределения добавок с использованием электромагнитного смесителя и взаимодействие компонентов на молекулярном уровне с использованием технологий изготовления под давлением.

Довольно важным аспектом в вопросе решения проблемы улучшения качества изготавливаемой теплоизоляционной продукции считается использование информационно-измерительных систем контроля и управления технологическим процессом производства. Одной из наиболее ключевых операций при производстве является весовое дозирование (ВД) материалов, особенно материалов очень мелкой структуры. Эта операция крайне важна, так как точность дозирования сказывается во многом на качестве и себестоимости итогового продукта [27].

Главными устройствами измерения для процесса ВД считаются весовые дозаторы непрерывного действия (ГОСТ 30124–94) [28]. Минимальное значение допустимого расхода материала равняется 0,4 кг/ч при допустимой погрешности не выше  $\pm 2\%$  с учётом времени отбора проб, равным 6 мин. На современном производстве, особенно с началом активного применения наноматериалов в виде добавок при изготовлении новейших композитных материалов, предполагают осуществление ВД при погрешности не больше 1% со временем пробоотбора 5...10 с.

В случае производства теплоизоляционных материалов предлагается применять существующую систему мониторинга процесса ВД, которая отличается от имеющихся специализированным измерительным каналом. Применение данной системы даёт возможность для измерения расхода сыпучих составляющих материалов в интервале с верхней границей производственной мощности примерно несколько единиц грамм в секунду.

Предложенные способы и системы улучшения ВД, значительно увеличивающие точность дозирования с помощью аналитической процедуры анализа источников погрешностей и возможностей её снижения (например, применение оптического датчика расхода материалов) и алгоритмических выкладок функционирования, защищены значительным числом патентов [29 – 34] и вполне способны к конкуренции.

Факторами, оказывающими наибольшее дестабилизирующее влияние на ИИИС ещё на этапе технологического процесса производства, являются колебания температуры и влажности окружающей среды, контактное сопротивление в месте контакта измерительного зонда и контролируемого материала, изменение ёмкости нагревателя, отдача тепла в месте измерения, изменение позиции элементов приёмника тепла в зонде, а также воздействие шероховатости поверхности материала.

Для обеспечения точности  $\lambda$  необходимо учитывать погрешности ИИИС и её составных частей, оказывающих влияние на процедуру контроля параметров технологического процесса. Основным блоком ИИИС, который вносит большую составляющую в погрешность измерения, является усилитель сигналов с измерительных датчиков, в котором присутствует нестабильность выходного напряжения при изменении температуры окружающей среды, поэтому необходима термостабилизация усилителя.

При эксплуатации ИИИС устанавливают в производственных цехах и для них рекомендуется применять термостатированные кабины, работающие в автоматическом режиме. Причём исследуемые материалы при испытаниях устанавливаются на специальные паллеты на части территории этих кабин. Также возникает необходимость в создании термоконстантных кабин с поддержанием требуемой температуры. Это достигается за счёт кондиционеров и специальной вентиляции.

ИИИС не должна подвергаться воздействию прямого солнечного света или других источников лучистой энергии. Прочие источники лучистой энергии (например, люминесцентные лампы) по возможности должны быть удалены на некоторое расстояние. Если эти требования по какой-либо причине не приемлемы с практической точки зрения, следует применять не прямые источники света, а пользоваться рассеянным, отражённым светом.

Если в помещении относительная влажность ниже 48%, а температура окружающей среды выходит за рамки диапазона 18...21 °С, то наблюдается резкое ухудшение качества производства минераловатных плит на 10...15%.

Наружный воздух при низких температурах содержит низкое количество влаги, что является главной причиной понижения относительной влажности воздуха в производственных помещениях в зимний период. Таким образом, влага начнёт интенсивно испаряться из всех компонентов технологического процесса до достижения состояния равновесной влажности, если в помещении не будет установлена специальная система увлажнения воздуха. Это приведёт к несоответствию относительной влажности допустимому значению при производстве минераловатных плит.

Такое явление, как помеха, подразумевает также и внутренние источники шумов, которые появляются из-за термоэффекта и взаимодействия гальванических элементов в местах соединения на участках цепи, из-за теплового шума от разных элементов цепи, из-за своих собственных шумов возникающих среди источников полезных сигналов. Функционирующая ИИИС подвергается воздействию вредного излучения от внешних источников помех. Все описанные выше помехи синтезируют магнитные и электрические поля, которые оказывают влияние (из-за содержания индуктивных, ёмкостных и резистивных связей) на возникновение в разных местах преобразования сигнала паразитной разности потенциалов и просачиванию токов по элементам цепей информационной системы.

Оказываемое действие помех на измерительные преобразователи и итоговые результаты контроля теплофизических свойств теплопроводности теплоизоляционных материалов можно нивелировать с помощью специализированных инструментов и алгоритмов функционирования. Инструментами являются: применение экранирования, заземления, изоляции, настройка показателей суммарного сопротивления схемы, подбор кабеля и т.д. К алгоритмическим способам снижения влияния помех относят: линейную и нелинейную фильтрацию, анализ и тщательный отбор измерений с аномальными показаниями и др.

Для снижения общей составляющей погрешности итоговых показаний измерений при действии температуры окружающей среды применяется автокоррекция результатов измерений с помощью анализа термограмм, полученных экспериментально (при низких и высоких температурах окружающей среды). Коррекция осуществляется автоматически с использованием программных и аппаратных средств ИИИС ДК ТТМ.

Проведён анализ воздействующих факторов на технологический процесс изготовления и контроль теплопроводности теплоизоляционных материалов информационно-измерительной системой допусково-

го контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов, в ходе которого были выяснены следующие особенности теплоизоляционных материалов:

1. Для теплоизоляционных материалов важна зависимость теплопроводности от степени кристаллизации и от химического состава материала.

2. Теплопроводность теплоизоляционных материалов находится в зависимости от структуры волокна, в частности от его диаметра и присутствия в составе неволокнистых частиц.

3. Для теплоизоляционных материалов ещё одним аспектом, влияющим на снижение качества изделия, считается содержание в составе материала неволокнистых частиц – «корольков».

4. К управляемым параметрам на этапе технологического производства теплоизоляционных материалов относятся: концентрация исходных компонентов ( $C$ ), влажность, фракционный и химический состав сырья ( $W_{всc}$ ), концентрация модифицирующих добавок ( $C_d$ ) (водоотталкивающие и обеспыливающие), концентрация связующего компонента ( $C_{ск}$ ) (для придания волокну требуемых плотности, прочности и толщины), параметр термообработки ( $P_T$ ), скорость вращения валков центрифуги ( $S_{ц}$ ). Неуправляемыми параметрами являются температура окружающей среды ( $T_{oc}$ ) и относительная влажность ( $V_{oc}$ ) в помещении.

5. При производстве материалов необходимо обеспечить равномерность распределения добавок с использованием электромагнитного смесителя и взаимодействие компонентов на молекулярном уровне с использованием технологий изготовления под давлением.

6. Решающее влияние на качество продукции оказывают три фактора – это температура окружающей среды ( $T_{oc}$ ), концентрация сырьевой смеси ( $C$ ) и параметр термообработки ( $P_T$ ) в помещении. Подобный вывод был сделан в результате анализа факторов, влияющих на качество производимых минераловатных плит при использовании современных производственных аппаратов и машин в технологическом процессе, качественных сырьевых материалов и наличии высококвалифицированного персонала.

### 2.1.1. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Технологический процесс изготовления можно считать точным, если критерии, оценивающие техническую и экономическую эффективность, оптимальны для данного типа производства и соответствуют

известным рекомендациям и требованиям [24, 26]: отражать общее назначение производства, обладать технологической целостностью, позволяющей определять численное значение характеристик процесса изготовления и материалов, учитывать параметры технологической линии, позволять ими варьировать.

В общем виде критерий точности можно представить в виде функционала:

$$K_T = F(X, Y, \Xi),$$

где  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор оптимальных режимных, энергетических и структурных параметров процесса, которые контролируются и корректируются в ходе процесса изготовления и которыми можно изменять численные показатели критерия  $K_T$  ( $C, W_{всс}, C_{д}, C_{ск}, P_T, S_{ц}, \alpha_1, \beta, U_{пит}$ );  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  – вектор параметров техпроцесса, которые не варьируются в процессе производства, но оказывают влияние на значение критерия точности – это неуправляемые режимные параметры ( $T_{ос}, V_{ос}$ ), а также техническая структура технологической линии производства, нечёткость и неопределённость получаемой информации, структура изготавливаемых материалов;  $\Xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$  – вектор показателей экономической эффективности, определяющий потери оперативности и экономичность технологического процесса.

Значение критерия определяется структурными, алгоритмическими, схемотехническими и конструктивными решениями при разработке технологического процесса изготовления, а также условиями работы и воздействующими дестабилизирующими факторами.

При производстве теплоизоляционных материалов критериями эффективности функционирования являются точность, оперативность и надёжность.

Для критерия точности  $K_T$  определяемыми и варьируемыми параметрами, влияющими на точность изготовления теплоизоляционных материалов, являются: ошибка первого рода  $\alpha_1$  (возможные отказы, связанные с техническим обеспечением), ошибка второго рода  $\beta$  (человеческий фактор), мощность питания  $U_{пит}$ , дестабилизирующие факторы ( $T_{ос}, V_{ос}$ ), достижения уровня параметра термообработки ( $P_T$ ), погрешность аналого-цифрового преобразования, погрешность определения влажности окружающей среды  $\Delta V_{ос}$ , погрешность определения температуры окружающей среды  $\Delta T_{ос}$ , погрешность определения температуры уровня термообработки  $\Delta P_T$ , погрешность определения влажности, фракционного и химического состава сырья  $\Delta W_{всс}$ , погрешность определения концентрации минераловатного материала  $\Delta C$ ,

погрешность определения скорости вращения валков центрифуги  $\Delta S_{ц}$ , погрешность измерения значения теплопроводности  $\Delta \lambda$ , меры доверия к результатам контроля.

Для критерия оперативности  $K_o$  определяемыми и корректируемыми параметрами являются: оптимальное время установления температуры параметра термообработки  $P_T$ , оптимальное время установления требуемого уровня расплава минераловатной смеси, время остывания расплава и время производства партии материалов, а также критерий зависит от алгоритмического обеспечения процесса изготовления.

Для критерия надёжности  $K_n$  определяемыми параметрами являются: потери точности и оперативности, меры доверия к результатам численных показателей теплофизических характеристик материалов.

В целях получения более достоверного значения  $K_T$  не контролируемые параметры и структуры предлагается разделить на три группы и занести соответствующую информацию в базу знаний:

1. Известные значения и свойства – структура изготавливаемых материалов, технологической линии производства, структура канала измерения и канала контроля.

2. Известные законы изменения и определения параметров и свойств – режимные параметры, результаты классификации и структуризации материалов.

3. Неопределённые параметры, для которых известны допусковые диапазоны и изменения, – нечёткость и неопределённость получаемой априорной и измерительной информации.

Технологический процесс производства материалов не может быть оптимальным и эффективным, если оптимальным является только один из критериев – оперативность, точность, надёжность. Поэтому общую эффективность техпроцесса оценивается по интегральному критерию ( $K_n$ ), который является функцией критериев оперативности, надёжности и точности:

$$K_n = F(K_o, K_n, K_T).$$

Предложенные критерии оценивают весь процесс изготовления материалов. Но для достоверной оценки точности техпроцесса необходимо оценить эффективность структурных составляющих: измерительного канала (ИК), канала контроля (КК), канала мониторинга (КМ), канала аналого-цифрового преобразования (КАЦП), канала питания (КП), блока принятия решений (БПР). В данном случае оценка производится по суммарному интегральному критерию в виде функционала

$$K_{и\Sigma} = F(K_{иИК}, K_{иКК}, K_{иКМ}, K_{иКАЦП}, K_{иКП}, K_{иБПР}).$$

Технологический процесс производства будет оптимальным по точности и эффективности функционирования, если значения интегральных критериев будет находиться в области допустимых значений. То есть поставленная цель повышения качества производимых материалов будет достигаться, если:

$$K_{и\Sigma} = K_{и\Sigma\text{доп}},$$

где  $K_{и\Sigma\text{доп}}$  – допустимые значения  $K_{и\Sigma}$ .

Параметры технологической линии, которые позволяют получить значения суммарного интегрального критерия, относятся к области допустимых значений, от которых зависит область допустимых значений  $K_{и\Sigma}$ .

Проведение предварительного анализа точности и стабильности предполагается для осуществления статистического регулирования технологического процесса [35].

Для оценки точности технологического процесса (при нормальном распределении показателя качества) находят вероятную долю дефектной продукции  $q_{д.п}$  и коэффициент точности  $K_T$ , а также оценивают параметры распределения – математическое ожидание  $M$  и среднеквадратичное отклонение (СКО)  $\sigma$ . Для этого берут выборку объемом обычно не менее 100. Целесообразно отбирать единицы продукции не подряд, а, например, каждую пятую, десятую и т.п., что позволит более правильно оценить состояние технологического процесса.

При правильной настройке технологического процесса математическое ожидание должно соответствовать середине поля допуска, задаваемого (обычно в нормативно-технической документации на продукцию) верхней и нижней границами  $D_v$  и  $D_n$ . В этом случае  $M = M_0$ . При отклонении  $M$  от  $M_0$  увеличивается доля дефектной продукции.

Вероятную долю дефектной продукции  $q_{д.п}$  (или вероятную долю годной продукции  $P = 1 - q_{д.п}$ ) можно рассчитать, исходя из свойств интегральной функции распределения, в соответствии с которыми  $P(x < D_n) = F(D_n)$  и  $P(D_n < x < D_v) = F(D_v) - F(D_n)$ .

Для продукции (теплоизоляционных материалов) заданы верхний и нижний допуски, соответственно дефектной будет продукция, у которой показатель качества  $x < D_n$ ,  $x > D_v$  и, следовательно  $q_{д.п} = [F(D_v) - F(D_n)] \cdot 100\%$ .

Критерий точности технологического процесса  $K_T$  позволяет количественно оценить точность техпроцесса:

$$K_T = \frac{\sum_{i=1}^8 \varphi \sigma_i}{\sum_{j=1}^8 D_j},$$

где  $D_j$  – область допустимых нормируемых значений по каждому режимному параметру,  $D = D_{\text{в}} - D_{\text{н}}$  ( $D_{\text{н}}$  и  $D_{\text{в}}$  – соответственно нижнее и верхнее значения зоны допуска);  $\sigma_i$  – среднее квадратическое отклонение режимных параметров;  $\varphi$  – коэффициент, который при нормальном законе распределения вероятности режимного параметра и доверительной вероятности 0,997 равен 3.

Техпроцесс точный, если  $0,70 \leq K_T \leq 0,98$ .

Если данное условие не выполняется, то требуется коррекция техпроцесса изготовления теплоизоляционных материалов.

Для технологического процесса производства теплоизоляционных материалов среднее квадратическое отклонение  $\sigma_i$  равно 10,2384, область допустимых значений по каждому режимному параметру  $D = 40,3680$ .

Следовательно, критерий точности технологического процесса равен

$$K_T = \frac{3 \cdot 10,2384}{40,3680} \approx 0,8.$$

Таким образом, технологический процесс изготовления минераловатных плит удовлетворяет требуемой точности.

Вероятная доля дефектной продукции равна  $q_{\text{д.п}} = [F(1,1) - F(1,17)] \cdot 100\%$ .

Для значений аргументов  $D_{\text{н}} = 1,1$  и  $D_{\text{в}} = 1,17$  из таблицы значений функций нормального распределения находим значения функций, равные соответственно 0,13 и 0,1112. Таким образом, вероятная доля дефектной продукции составляет около 1,88% ( $q_{\text{д.п}} = [0,13 - 0,1112] \cdot 100\% = 1,88\%$ ).

Хотелось бы отметить, что повышение точности и эффективности технологического процесса производства, осуществление поставленной цели – повышение качества изготавливаемых теплоизоляционных материалов, достигнуто в результате применения ИИИС допускового контроля, создания алгоритмического и программного обеспечения, что позволяет принимать оптимальные решения в ИИИС при мониторинге технологического процесса производства минераловатных материалов.

Анализ воздействующих факторов на теплопроводности теплоизоляционных материалов с использованием информационно-измерительной системы позволяет создать математическую модель исследуемого объекта.

## 2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В качестве объекта, подвергаемого допусковому контролю, рассматриваются теплоизоляционные материалы – минераловатные плиты, маты, цилиндры. Их теплопроводность составляет 0,039...0,046 Вт/(м·К). Контроль теплопроводности в указанном диапазоне является сложным и требует аналитического описания объекта исследования для обеспечения необходимой точности контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов с использованием интеллектуальной ИИИС.

Исследование свойств исследуемых материалов, обоснование необходимой точности контроля с помощью ИИИС, анализ воздействующих факторов на технологический процесс и предполагаемой архитектуры ИИИС, обоснование достоверности полученной информации положены в основу разработки математической модели допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов.

Разработана математическая модель допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов в виде совокупности аналитических зависимостей  $\lambda = f(Q_u)$ ,  $\lambda = f(Q_m)$ ,  $\lambda = f(\delta_{\text{ИИИС}})$ .

*Постановка задачи:* определить теплопроводность теплоизоляционных материалов  $\lambda_{\text{ТМ}}$  с заданной точностью  $\delta_\lambda$ , которая зависит от метрологического уровня ИИИС  $\delta_{\text{ИИИС}}$ , в результате ДК управляемых параметров техпроцесса изготовления минват  $Q_u$ , неуправляемых параметров  $Q_m$  и определения их принадлежности к области допустимых значений в течение заданного интервала времени  $\tau$ .

Математическая модель допускового контроля представлена зависимостью

$$\lambda_{\text{ДКТМ}} = f(Q_u, Q_m, \delta_\lambda, \delta_{\text{ИИИС}}, \tau).$$

Аналитические зависимости для параметров математической модели:

$$\begin{aligned} \lambda &= f(Q_u) = f(C_n, C_{\text{ГБП}}, Q_c); \\ \lambda^* &= f(C_n) = 2,21 \cdot 10^{-4} C_n + 1,41 \cdot 10^{-2}; \\ \lambda^* &= f(C_{\text{ГБП}}) = 2,52 \cdot 10^{-4} C_{\text{ГБП}} + 1,21 \cdot 10^{-2}; \\ \lambda^* &= f(Q_c) = 2,13 \cdot 10^{-4} Q_c + 2,73 \cdot 10^{-2}; \\ \lambda &= f(Q_m) = f(T_{\text{ос}}, V_{\text{ос}}); \lambda^* = f(T_{\text{ос}}) = 6,14 \cdot 10^{-4} T_{\text{ос}} + 2,71 \cdot 10^{-2}; \\ \lambda^* &= f(V_{\text{ос}}) = 2,23 \cdot 10^{-4} V_{\text{ос}} + 2,79 \cdot 10^{-2}; \\ \lambda &= f(\delta_{\text{ИИИС}}); \lambda^* = f(\delta_{\text{ИИИС}}) = 0,412 \delta_{\text{ИИИС}} + 0,572. \end{aligned}$$

Область существования математической модели определяется следующими ограничениями:

$$\begin{aligned} Q_u &\in Q_{u\text{ доп}}; \quad \delta_{\text{ИИИС}} \in \delta_{\text{ИИИС доп}}; \\ Q_m &\in Q_{m\text{ доп}}; \quad \delta_\lambda \in \delta_{\lambda\text{ доп}}, \end{aligned}$$

где  $Q_{u\text{ доп}}$ ,  $Q_{m\text{ доп}}$ ,  $\delta_{\lambda\text{ доп}}$ ,  $\delta_{\text{ИИИС доп}}$  – область допустимых значений контролируемых параметров при определении теплопроводности ТМ ИИИС ДК.

Предложенная математическая модель допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов, в которой множества параметров и переменных достаточно полно отображают физическое состояние исследуемых материалов, позволяет применить данную модель и алгоритм её реализации в базе знаний ИИИС ДК ТМ при определении коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов с допустимой погрешностью.

### **2.3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ УПРАВЛЯЕМЫХ И НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ**

Воздушными порами, заключёнными между волокнами, определяются теплоизоляционные свойства минеральной ваты. Технологический процесс состоит из подготовки исходного сырья и топлива, составления шихты, получения силикатного расплава, получения минерального волокна, производства изделий из минерального волокна. Управляемыми параметрами на стадии подготовки сырья при производстве минват являются: концентрация исходных компонентов, влажность, фракционный и химический состав сырья, неуправляемыми – температура и влажность окружающей среды. Теплопроводность является одним из основных свойств, от которого зависит качество минеральных ват. Эффективным направлением достижения заданной точности измерения коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) минват является применение интеллектуальной информационно-измерительной системы для измерения контролируемых параметров минват и режимных параметров технологического процесса при изготовлении минераловатных плит. Точность определения  $\lambda$  ( $\lambda = 0,028 \dots 0,046$  Вт/(м·К)) в узком диапазоне связана с большими трудностями, так как необходимо обеспечить высокий метрологический уровень ИИИС, точность технологического процесса изготовления минват, коррекцию воздействия дестабилизирующих факторов на ИИИС и технологический процесс, которые вносят погрешность в результат измерения  $\lambda$ .

В основу дутьевых способов положено использование кинетической энергии пара, сжатого воздуха или газа, выходящего из сопла и встречающего на своём пути струю силикатного расплава, в результате чего последний разбивается на капли, вытягивающиеся сначала в цилиндр, который затем суживается и образует два грушевидных тела, связанных нитью. Грушевидные тела уменьшаются и превращаются в волокна. Центробежный способ основан на использовании центробежной силы вращающегося диска, на который падает струя силикатного расплава. Существует также самый «навороченный» способ получения минеральной ваты – центробежно-фильтрно-дутьевой. Он обеспечивает полное отсутствие неволокнистых включений (так называемых «корольков»), а также небольшой диаметр волокон ваты. Свойства минеральной ваты: с повышением содержания кремнезёма в минеральной вате повышается температура её размягчения и термостойкость. Коэффициент теплопроводности зависит от средней толщины волокон, объёмного веса и пористости. Оптимальной является пористость 90%. Толщина волокна может колебаться от 2 до 40 мкм.

Теплофизические и физико-механические свойства теплоизоляционных материалов зависят от: вида исходного сырья, технологии получения волокна, диаметра и длины волокон, их химического и фазового состава, структуры материала, качества связующего компонента.

Следовательно, управляемыми параметрами при производстве минват являются: скорость вращения валков центрифуги, уровень термообработки, фракционный и химический состав сырья, концентрация исходных компонентов, концентрация связующего компонента, концентрация модифицирующих добавок. Неуправляемые параметры – температура ( $T_{oc}$ ) и влажность ( $V_{oc}$ ) окружающей среды.

Функциональную зависимость выходных параметров точности при контроле  $\lambda$ , определяющих качество выпускаемых теплоизоляционных материалов, предлагается представить аналитической моделью [36]

$$Y_n = f(X_i, \delta_T, Q_u, Q_m, \delta_{иис}),$$

где  $Y_n$  – выходные параметры точности при контроле  $\lambda$  минват;  $n$  – количество  $Y$ ;  $X_i$  – входные параметры (минват, исходного сырья, технологического оборудования ИИИС;  $i$  – количество  $X_i$ ;  $\delta_T = \{S_n, n = 1, \dots, k\}$  – требования к точности определения  $\lambda$ ,  $S_n$  – виды требований точности,  $k$  – число требований;  $Q_u$  – управляемые параметры технологического процесса;  $Q_m$  – неуправляемые параметры технологического процесса, имеющие случайный характер;  $m$  – количество параметров;  $\delta_{иис}$  – параметры, определяющие метрологический уровень ИИИС.

На основе справочных данных [24] и проведённых лабораторных и производственных экспериментов получены аналитические зависимости теплопроводности минват от входных, управляемых и неуправляемых параметров при реализации технологического процесса изготовления минеральных ват.

*Зависимость теплопроводности минераловатных плит от входных параметров ( $\lambda = f(C_{и})$ ).*

В ходе проведения экспериментальных исследований материалов, основные параметры которых приведены в табл. 2.2, с помощью ИИИС получены зависимости теплопроводности минераловатных плит и полиметилметакрилата (ПММ) (образцовой меры) от входных параметров материалов и сырья  $\lambda = f(C_{и})$ . На рисунке 2.2 приведено графическое представление экспериментальной зависимости  $\lambda$ , которая определяется с использованием ИИИС, минераловатной плиты (изовента) и сырьевого материала (габбро-базальтовой породы) от их плотности. ПММ ( $\lambda = 0,195$  Вт/(м·К)) и рипор ( $\lambda = 0,028$  Вт/(м·К)) используются при исследованиях как эталонные аттестованные образцы при контроле работы ИИИС. Аппроксимирующая зависимость имеет следующий вид:

$$\lambda^* = f(C_{и}) = 2,21 \cdot 10^{-4} C_{и} + 1,41 \cdot 10^{-2};$$

$$\lambda^* = f(C_{ГБП}) = 2,52 \cdot 10^{-4} C_{ГБП} + 1,21 \cdot 10^{-2}.$$

## 2.2. Параметры исследуемых материалов

Параметры (ед. изм.)	Исследуемые материалы							
	Минераловатные плиты						Эталонные образцы	
	ГЕРАКЛИТ	ИЗОЛАЙТ	ИЗОВЕНТ	ИЗОРУФ-В	ИЗОФАС-160	ИЗОФАС-ЛМ	ПММ	РИПОР
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	40	50	90	175	160	90	900	50
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,028	0,032	0,035	0,035	0,038	0,039	0,195	0,028
Диаметр волокна, мкм	5	5	5	5	5	5	1,5...3	5
Размер пор, мкм	20	20	18	13	14	18	2...5	20

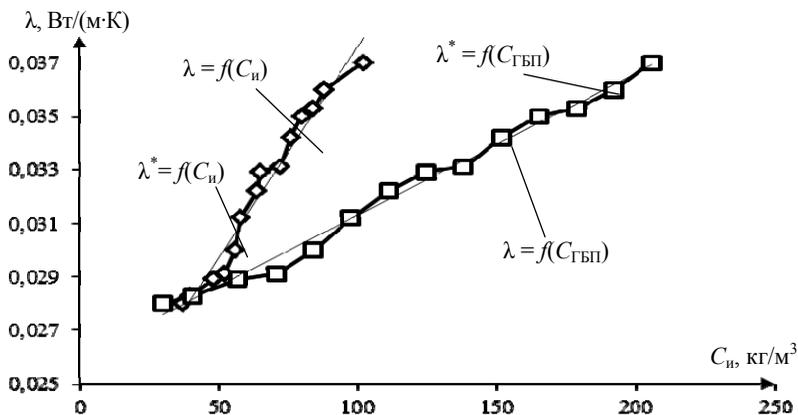


Рис. 2.2. Экспериментальные и аппроксимирующие зависимости  $\lambda$  для рипора и изоруфа от входных параметров сырья ( $\lambda = f(C_w)$ ) и аппроксимирующие зависимости  $\lambda^* = f(C_w)$ ,  $\lambda^* = f(C_{ГБП})$

### 2.3. Параметры сырьевых материалов

Параметры (ед. изм.)	Габбро-базальтовые породы (ГБП)
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	30...220
Теплопроводность	0,035...0,039
Содержание органических веществ по массе, %, не более	2,8
Диаметр волокна, мкм	80...400

В таблице 2.3 приведены параметры сырьевых материалов габбро-базальтовых пород.

*Зависимости теплопроводности минераловатных плит от управляемых параметров ( $\lambda = f(Q_w)$ ).*

Получены экспериментальным путём зависимости теплопроводности минераловатных плит от управляемых параметров: сырья ( $\lambda = f(Q_c)$ ) – химического состава габбро-базальта. В таблице 2.4 представлены сведения о химическом составе габбро-базальта.

На рисунке 2.3 представлен пример экспериментальной зависимости теплопроводности минераловатной плиты – изоруфа от управляемого параметра сырья (химического состава) и аппроксимирующая функция вида

$$\lambda^* = f(Q_c) = 2,13 \cdot 10^{-4} Q_c + 2,73 \cdot 10^{-2}.$$

## 2.4. Химический состав габбро-базальта

Оксиды	Содержание оксидов по массе, %
SiO <sub>2</sub>	50,41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,29
FeO	8,08
CaO	8,83
MgO	12,37
Na <sub>2</sub> O	1,65
K <sub>2</sub> O	0,51

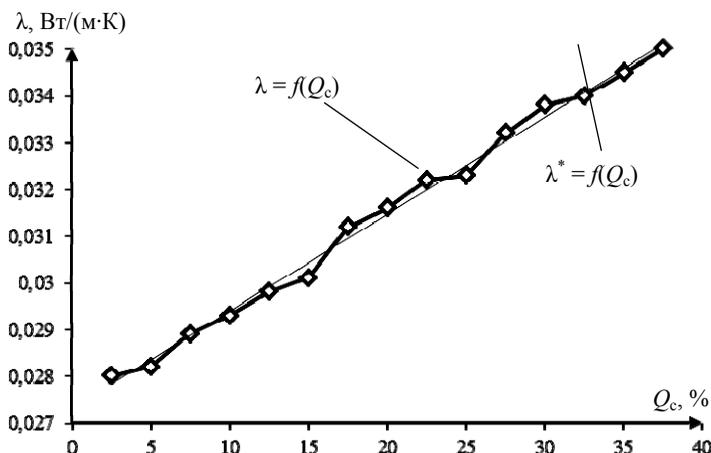


Рис. 2.3. Экспериментальные и аппроксимирующие зависимости  $\lambda$  для изорфа от управляемых параметров ( $\lambda = f(Q_m)$ ) и  $\lambda^* = f(Q_c)$

*Зависимости теплопроводности минераловатных плит от неуправляемых параметров ( $\lambda = f(Q_m)$ ).*

Исследованы влияния температуры  $T_{oc}$  и влажности  $V_{oc}$  на теплопроводность минераловатных плит.

На рисунке 2.4 приведены зависимости теплопроводности изофаса-ЛМ от  $T_{oc}$ , а на рис. 2.5 – от  $V_{oc}$ . Аппроксимирующая зависимость теплопроводности изофаса-ЛМ от  $T_{oc}$  имеет вид  $\lambda^* = f(T_{oc}) = 6,14 \cdot 10^{-4} T_{oc} + 2,71 \cdot 10^{-2}$ . Аппроксимирующая зависимость теплопроводности теплопроводности изофаса-ЛМ от  $V_{oc}$  представлена в следующем виде:

$$\lambda^* = f(V_{oc}) = 2,23 \cdot 10^{-4} V_{oc} + 2,79 \cdot 10^{-2}.$$

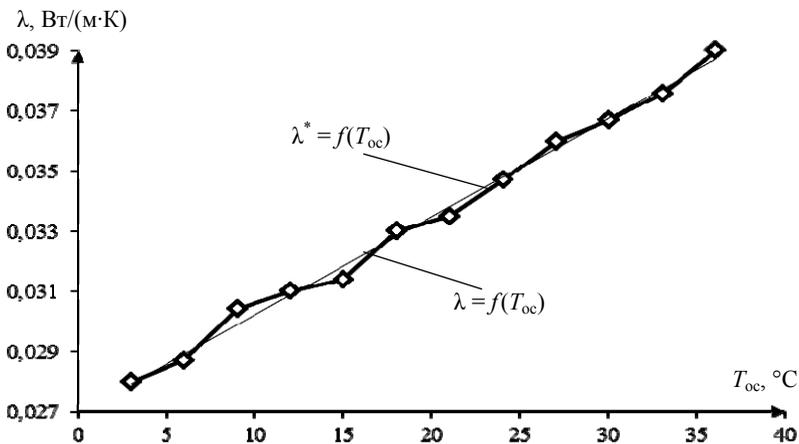


Рис. 2.4. Экспериментальные и аппроксимирующие зависимости  $\lambda$  для изофаса-ЛМ от неуправляемых параметров ( $\lambda = f(Q_m)$ ) и  $\lambda^* = f(T_{oc})$ )

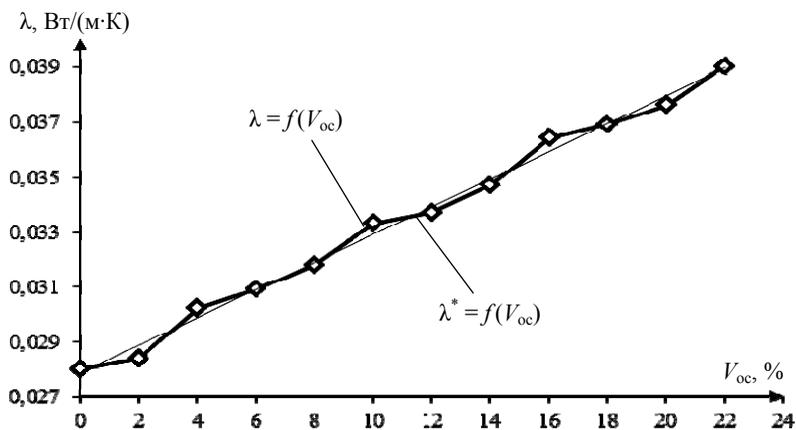


Рис. 2.5. Экспериментальные и аппроксимирующие зависимости  $\lambda$  для изофаса-ЛМ от неуправляемых параметров ( $\lambda = f(Q_m)$ ) и  $\lambda^* = f(V_{oc})$ )

*Зависимость теплопроводности минераловатных плит от параметров метрологического уровня ИИИС ( $\lambda = f(\delta_{ИИИС})$ ).*

При разработке ИИИС были учтены тип производства, особенности технологического процесса и его режимные параметры при изготовлении минераловатных плит. В целях уменьшения дополнительных погрешностей при измерении  $\lambda$  минераловатных плит должны соблюдаться предусмотренные стандартом условия: температура 20 °С, атмо-

сферное давление 101 325 Па, относительная влажность окружающего воздуха 56%. Метрологический уровень измерения и контроля теплопроводности минераловатных плит зависит от метрологических характеристик ИИИС, которые позволяют судить о пригодности системы для измерений в заданном диапазоне  $\lambda$  с погрешностью 3%.

На рисунке 2.6 приведены зависимости погрешности определения  $\lambda$  минераловатной плиты изофаса-ЛМ от метрологического уровня ИИИС.

Аппроксимирующая функция имеет вид

$$\lambda^* = f(\delta_{\text{ИИИС}}) = 0,412\delta_{\text{ИИИС}} + 0,572.$$

Для определения метрологического уровня ИИИС проведены измерения  $\lambda$  ряда теплоизоляционных материалов. Результаты измерений и метрологической обработки представлены в табл. 2.5.

Как следует из табл. 2.5, контроль  $\lambda$  минераловатных плит должен выполняться при высоком метрологическом уровне ИИИС, так как материалы имеют низкую теплопроводность и отличаются по  $\lambda$  незначительно. Для обеспечения достоверности контроля  $\lambda$  исследованы зависимости  $\lambda$  минераловатной плиты от погрешности контроля  $\lambda$  ИИИС, которая определялась при измерении на эталонном материале – ПММ.

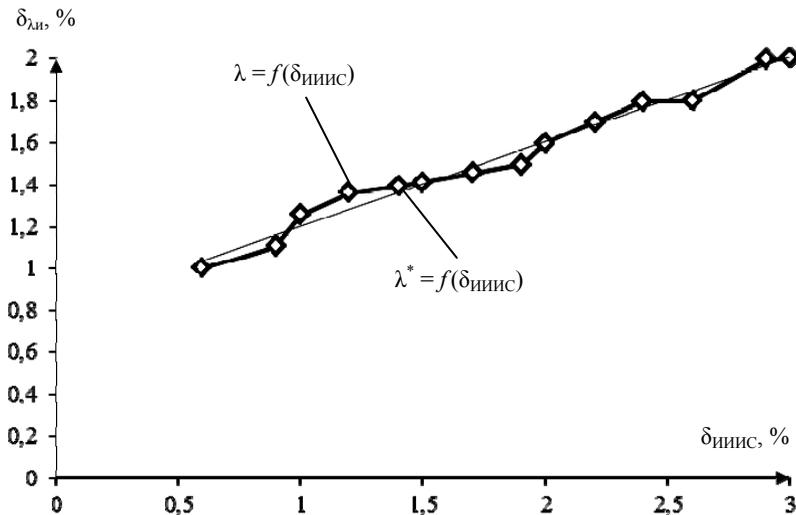


Рис. 2.6. Экспериментальные и аппроксимирующие зависимости  $\lambda$  для изофаса-ЛМ от параметров метрологического уровня ИИИС ( $\lambda = f(\delta_{\text{ИИИС}})$ ) и  $\lambda^* = f(\delta_{\text{ИИИС}})$

## 2.5. Результаты метрологической обработки измерений теплопроводности исследуемых теплоизоляционных материалов

Исследуемые теплоизоляционные материалы	Эталонные значения	Измеренные значения	Относительная погрешность измерений
	$\lambda_{\text{эт}}$ , Вт/(м·К)	$\lambda_{\text{изм}}$ , Вт/(м·К)	$\delta_{\lambda}$ , %
Рипор	0,028	0,0283	1,07
Гераклит	0,035	0,0345	1,47
Изолайт	0,032	0,0323	0,93
Изовент	0,032	0,0315	1,56
Изоруф	0,034	0,0347	2,05
Минвата 1	0,033	0,0324	1,81
Минвата 2	0,037	0,0364	1,62
Минвата 3	0,04	0,0410	2,51
Изоруф-В	0,035	0,0346	1,76
Изофас-ЛМ	0,039	0,0397	1,79
ПММ	0,195	0,1943	0,35

В базе знаний интеллектуальной информационно-измерительной системы в виде фреймов представлены аналогичные зависимости теплопроводности минераловатных плит от входных параметров сырья и исследуемых материалов, управляемых и неуправляемых параметров, воздействующих дестабилизирующих факторов окружающей среды – температуры и влажности – от параметров метрологического уровня ИИИС, примеры которых для отдельных видов минераловатных плит представлены в данной работе.

Полученные аппроксимирующие функции указанных зависимостей позволяют получать достоверную и точную информацию о  $\lambda$  исследуемых материалов в ходе технологического процесса их изготовления и контроля готовой продукции.

Таким образом, осуществляется повышение точности изготовления и контроля теплопроводности минераловатных плит в результате учёта зависимостей влияния воздействующих факторов на технологический процесс изготовления и контроля  $\lambda$  минераловатных плит с использованием базы знаний ИИИС при принятии решений в технологическом и измерительном процессах, что позволяет в итоге обеспечить требуемое качество выпускаемых минераловатных плит.

## 2.4. МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Допусковый контроль режимных параметров технологического процесса изготовления минераловатных плит применяется для повышения точности технологического процесса изготовления минераловатных плит. Для этого задают допуск на контролируемый режимный параметр, измеряют физическую величину, соответствующую данному контролируемому режимному параметру, с количественной характеристикой её значения, затем сравнивают измеренное значение физической величины с её допустимыми значениями (допусками на контролируемый параметр) и принимают решения о степени соответствия результатов измерений допускам на параметр.

Предлагается метод повышения точности допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов в результате определения порога принадлежности к зоне допуска контролируемых параметров в целях повышения точности технологического процесса изготовления минераловатных плит с заданной теплопроводностью при мониторинге и коррекции управляемых режимных параметров и учётом влияния неуправляемых параметров.

*Постановка задачи.*

*Дано:* 1. Управляемые режимные параметры ( $Q_u$ ) техпроцесса изготовления минераловатных плит (1):  $C$  – концентрация исходных компонентов;  $W_{всс}$  – влажность, фракционный и химический состав сырья;  $C_d$  – концентрация модифицирующих добавок;  $C_{св}$  – концентрация связующего компонента;  $S_{ц}$  – скорость вращения валков центрифуги;  $P_T$  – параметр термообработки.

2. Неуправляемые режимные параметры ( $Q_m$ ) (2):  $V_{oc}$  – относительная влажность окружающей среды;  $T_{oc}$  – температура окружающей среды.

3. Экспериментальным путём определены зоны допуска на управляемые и неуправляемые РП:  $C \in (C_n = 70\%, C_b = 80\%)$ ,  $W_{всс} \in (W_{всс.н} = 20\%, W_{всс.в} = 30\%)$ ,  $C_d \in (C_{д.н} = 4\%, C_{д.в} = 10\%)$ ,  $C_{св} \in (C_{св.н} = 2\%, C_{св.в} = 5\%)$ ,  $S_{ц} \in (S_{ц.н} = 6000 \text{ об/мин}, S_{ц.в} = 7000 \text{ об/мин})$ ,  $P_T \in (P_{Tн} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}, P_{Tв} = 1500 \text{ }^\circ\text{C})$ ,  $V_{oc} \in (V_{oc.н} = 48\%, V_{oc.в} = 60\%)$ ,  $T_{oc} \in (T_{oc.н} = 18 \text{ }^\circ\text{C}, T_{oc.в} = 21 \text{ }^\circ\text{C})$ .

4. Установлено, что закон распределения вероятностей РП нормальный (прил. Г).

*Найти:* 1. Порог принадлежности к зоне допуска контролируемых РП  $x_i - x_n = \Delta_n$ ,  $x_i - x_b = \Delta_b$ , позволяющий повысить вероятность получения качественной продукции  $P_{доп}$  при обеспечении относительной погрешности измерения  $\lambda \delta_\lambda = 4\%$ .

2. Определить max порог  $\Delta x_{n \max}$ ,  $\Delta x_{n \max}$  вхождения в зону допуска  $D$  ( $x_{n+\Delta x_n}$ ,  $x_{n-\Delta x_n}$ ) при обеспечении min погрешности измерения 2...4%,

$$\Delta x = \max(\Delta x_n, \Delta x_n) \text{ при } \lambda_{\text{тп. доп}}, \delta_\lambda \in \delta_{\lambda \text{ доп}}.$$

3. Вероятность  $P_{\text{доп}}$ , при которой значения  $M_x^* - \alpha$  находятся в пределах  $[-\Delta; \Delta]$ :  $P \{-\Delta < M_x^* - \alpha < \Delta\} = P_{\text{доп}}$ .

Вероятность влияния неуправляемых режимных параметров  $P_{Q_m}$  ( $T_{\text{ос}}$ ,  $V_{\text{ос}}$ ). Функция вероятности имеет вид  $P_{Q_m} \{f(X), T_{\text{ос}}, V_{\text{ос}}\}$ .

Вероятность влияния управляемых режимных параметров  $P_{Q_u}$  примет следующий вид:  $P_{Q_u} \{f(X), C, W_{\text{всс}}, C_{\text{д}}, C_{\text{ск}}, P_T, S_{\text{ц}}\}$ .

Получение минват требуемого качества зависит от величин режимных параметров  $C, W_{\text{всс}}, C_{\text{д}}, C_{\text{ск}}, P_T, S_{\text{ц}}, T_{\text{ос}}, V_{\text{ос}}$ .

В предложенном методе допускового контроля параметров по результатам измерений, заключающемся в том, что задают допуск на контролируемый параметр, измеряют физическую величину, соответствующую данному контролируемому параметру, с количественной характеристикой её значения; сравнивают измеренное значение физической величины с её допустимыми значениями (допусками на контролируемый параметр) и принимают решения о степени соответствия результатов измерений допускам на параметр. При определении допуска на контролируемый параметр задают функцию принадлежности высказывания «параметр по результатам измерений в допуске», а при принятии решения оценивают достоверность высказывания, выраженную в нечёткой мере, как значение функции принадлежности, соответствующее значению измеренного параметра.

Вариант функции принадлежности к заданной зоне допуска контролируемого режимного параметра ( $D_n, D_v$ ) [1]:

$$\mu_{(X)} = (D_{n+\Delta D_n}, D_{v-\Delta D_v}, X_{\text{изм}}).$$

Вид функции принадлежности выбирается из известного набора по результатам обработки заключений экспертов – специалистов в данной области. При этом увеличение объёма информации о решаемой задаче позволяет уменьшить степень субъективного суждения и предложить ряд рекомендаций по выбору функций принадлежности.

Пусть при проведении измерений в распоряжении исследователя имеется информация о контрольном поле допуска. В этом случае функция принадлежности может быть построена на основании известного ряда путём задания значений:  $\mu_{(D_n)}, \mu_{(D_v)}$ . Например, для сим-

метричной функции принадлежности  $\mu_{(D_n)} = \mu_{(D_b)} = A$ , где  $A$  – уровень доверия результатам измерения на границе зоны допуска. Наиболее существенное влияние на параметр  $A$  оказывают доверительная вероятность  $P_A$ , с которой определена среднестатистическая зона допуска и погрешность измерений  $\delta_\lambda$ .

Следует учесть также, что доверительная вероятность характеризует собой методические погрешности при контроле, а для оценки инструментальной погрешности следует использовать вероятность ложного отказа  $P_{л.о}$ . В этом случае вероятность ложного отказа будет иметь вид

$$P_{л.о} \{f(X), \delta, D_n, D_b, X_{изм}\}.$$

Также следует учитывать влияние на ход контроля и измерения неуправляемых режимных параметров. В ходе исследований было установлено, что решающее влияние на качество продукции оказывают два параметра – температура окружающей среды ( $T_{oc}$ ) и относительная влажность ( $V_{oc}$ ) в помещении. Следовательно, необходимо учесть вероятность влияния неуправляемых режимных параметров  $P_{н.п}$ . Функция вероятности имеет вид

$$P_{н.п} \{f(X), T_{oc}, V_{oc}\}.$$

Управляемыми режимными параметрами технологического процесса при производстве теплоизоляционных материалов являются: концентрация исходных компонентов ( $C$ ), влажность, фракционный и химический состав сырья ( $W_{всс}$ ), концентрация модифицирующих добавок ( $C_d$ ) (водоотталкивающие и обеспыливающие), концентрация связующего компонента ( $C_{с.к}$ ) (для придания волокну требуемых плотности, прочности и толщины), параметры термообработки ( $P_T$ ) (при температуре от 1200 до 1500 °C), скорость вращения валков центрифуги ( $S_{ц}$ ) (до 7000 об/мин). Таким образом, должно учитываться влияние на результат вероятности воздействия управляемых режимных параметров  $P_{уп}$ . Вероятность влияния управляемых режимных параметров примет следующий вид:

$$P_{уп} \{f(X), C, W_{всс}, C_d, C_{с.к}, T, S_{ц}\}.$$

Будем считать, что получение минват требуемого качества можно охарактеризовать величинами режимных параметров  $C, W_{всс}, C_d, C_{с.к}, T, S_{ц}, T_{oc}, V_{oc}$ . Событие, обеспечивающее требуемое качество минват по величине  $X_i$ , обозначено через  $L_i$ , тогда вероятность получения минват требуемого качества по всем параметрам (параметры  $L_i$  зависимы):

$$P = P(L_1, \dots, L_e) = P(L_1), P(L_2|L_1), \dots, P(L_e|L_1, \dots, L_e).$$

Для контроля первыми следует выбирать параметры, связанные с наименьшей вероятностью получения материалов с требуемыми показателями качества, т.е. параметры, наиболее существенно влияющие на отклонение параметров от зоны допуска (температура окружающей среды и относительная влажность в помещении).

Допустим, что задана плотность распределения вероятностей значений контролируемого режимного параметра  $f(x)$ , нижняя ( $D_{н+\Delta D_{н}}$ ) и верхняя ( $D_{в+\Delta D_{в}}$ ) границы нормы (рис. 2.7). Тогда вероят-

ность нахождения параметров в допуске:  $Q_{Д} = \int_{D_{н-\Delta D_{н}}}^{D_{в-\Delta D_{в}}} f(x) dx$ ; параметров

вне допуска:  $Q_{н} = \int_{-\infty}^{D_{н+\Delta D_{н}}} f(x) dx$ ;  $Q_{в} = \int_{D_{в-\Delta D_{в}}}^{\infty} f(x) dx$ .

Существуют ошибки первого рода (ошибки изготовителя продукции), которые определяют вероятность отнесения качественных объектов контроля (параметров) к некачественным, и ошибки второго рода (ошибки контроля), при которых некачественные изделия (параметры) классифицируются как качественные.

Выберем в качестве выходного параметра ( $y$ ), требующего постоянного и точного контроля и в полной мере характеризующего предъявляемые к минераловатным плитам требования качества, значения теплопроводности  $\lambda$ .

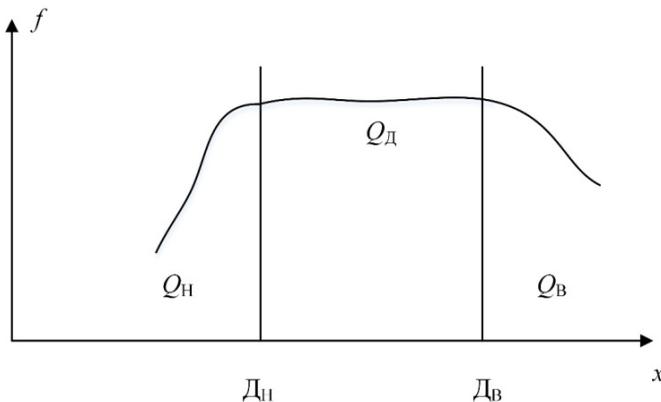


Рис. 2.7. Определение соответствия параметра допуску

В общем виде связь выходного параметра с контролируруемыми режимными (всего их восемь) параметрами можно записать в виде

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_8).$$

Включим в эксперимент  $(x_1, x_2, \dots, x_8)$  восемь параметров, для каждого из которых установим два уровня – верхний и нижний. Например, параметр  $x_1$  – концентрация исходных компонентов, равна 70...80%;  $x_2$  – влажность, фракционный и химический состав сырья, равна 20...30%;  $x_3$  – концентрация модифицирующих добавок, равна 4...10%;  $x_4$  – концентрация связующего компонента, равна 2...5%;  $x_5$  – термообработка (от 1200 до 1500 °С);  $x_6$  – скорость вращения валков центрифуги, равна 6000...7000 об/мин;  $x_7$  – температура окружающей среды (18...21 °С);  $x_8$  – относительная влажность в помещении (48...60%).

Поскольку параметры процесса неоднородны и имеют различные единицы измерения, а числа, выражающие величины параметров, имеют различные порядки, их следует привести к единой системе счисления путём перехода от действительных значений параметров (табл. 2.6.) к кодированным по формулам:

$$x_{i \text{ осн}} = (x_{i \text{ max}} + x_{i \text{ min}})/2,$$

где  $x_{i \text{ осн}}$  – основной уровень (определённый для каждого параметра);  $x_{i \text{ max}}$  – верхнее значение (определённое для каждого параметра);  $x_{i \text{ min}}$  – нижнее значение (определённое для каждого параметра); 2 – число уровней (верхний и нижний);  $i$  – номер параметра.

$$\Delta x_i = (x_{i \text{ max}} - x_{i \text{ min}})/2,$$

где  $\Delta x_i$  – интервал варьирования (определённый для каждого фактора).

$$x_{i \text{ к}} = (x_i - x_{i \text{ осн}})/\Delta x_i,$$

где  $x_{i \text{ к}}$  – кодированное значение параметра.

В данном случае при контроле выбираются восемь наиболее важных режимных параметров. Предположим, что закон распределения вероятностей этих параметров нормальный и имеет параметры  $M_X = \alpha$  и  $\sigma_X$ ;  $\alpha$  – ошибка первого рода;  $\sigma_X$  – среднеквадратичное отклонение.

Требуется определить объём выборки, необходимый для нахождения математического ожидания  $M_X^*$  с заданной абсолютной погрешностью  $\pm \Delta$  (4%):

$$M[M_X^*] = \alpha;$$

$$D[M_X^*] = \left(\frac{1}{n^2}\right) D\left[\sum_{i=1}^n x_i\right].$$

При равенстве дисперсий математических ожиданий:

$$D[M_X^*] = \frac{D_X}{n};$$

$$\sigma[M_X^*] = \frac{\sigma_X}{n}.$$

Зададимся вероятностью  $P_{\text{доп}}$ , с которой значения  $M_X^* - \alpha$  должны лежать в пределах  $[-\Delta; \Delta]$ :

$$P\{-\Delta < M_X^* - \alpha < \Delta\} = P_{\text{доп}}$$

или после нормирования:

$$P\left\{-\frac{\Delta}{\sigma_X/\sqrt{n}} \leq \left[\frac{M_X^* - \alpha}{\sigma_X/\sqrt{n}}\right] \leq \frac{\Delta}{\sigma_X/\sqrt{n}}\right\} = P_{\text{доп}}.$$

Таким образом, пользуясь таблицей функции Лапласа (приняв  $\Delta/(\sigma_X/\sqrt{n}) = h_{\text{доп}}$ ), определим необходимый объем выборки для контролируемых параметров:

$$n = h_{\text{доп}}^2 N / [(N-1)\Delta^2/\sigma_X^2 + h_{\text{доп}}^2].$$

В нашем случае  $N = 8$ ,  $P_{\text{доп}} = 0,95$ , при этом значении  $h_{\text{доп}} = 1,96$  и  $\frac{\sigma_X}{\Delta} = 1$ ,  $n \approx 4$ , примем  $n = 5$ .

## 2.6. Исследуемые параметры в действительных значениях

Уровни	Параметры процесса в единицах измерения							
	%				°C	об/мин	°C	%
Верхний	80	30	10	5	1500	7000	21	60
Нижний	70	20	4	2	1200	6000	18	48
Основной	75	25	7	3,5	1350	6500	19,5	54
Интервал варьирования	5	5	3	1,5	150	500	1,5	6
Кодовые обозначения	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$

Числа, обозначающие допуск или недопуск параметра при контроле значения его величины, могут быть подсчитаны по формулам:

$$d_i = \frac{\sigma_X^2}{D_{B-\Delta D_B} - D_{H+\Delta D_H}} \ln \frac{\beta}{1-\alpha} + \frac{D_{B-\Delta D_B} + D_{H+\Delta D_H}}{2} i;$$

$$nd_i = \frac{\sigma_X^2}{D_{B-\Delta D_B} - D_{H+\Delta D_H}} \ln \frac{1-\beta}{\alpha} + \frac{D_{B-\Delta D_B} + D_{H+\Delta D_H}}{2} i.$$

Здесь  $i = 1, 2, \dots, 8$  – количество последовательно контролируемых параметров;  $D_{B-\Delta D_B}$ ,  $D_{H+\Delta D_H}$  – верхнее и нижнее значения каждого параметра соответственно с учётом вхождения в зону допуска;  $\alpha$  – ошибка первого рода (не более 2%);  $\beta$  – ошибка второго рода (не более 3%).

После каждого измерения производится подсчёт средней суммы контролируемого режимного параметра:  $\sum_{i=1}^n X_i$ .

Затем эта сумма сравнивается со значениями  $d_i$  и  $nd_i$ . Если  $d_i \leq \sum_{i=1}^n X_i \leq nd_i$ , то контроль продолжается. Если  $\sum_{i=1}^n X_i \geq d_i$ , то значение параметра находится вне зоны допуска и параметр бракуется. Если  $\sum_{i=1}^n X_i \leq nd_i$ , параметр принимается.

Учитывая всё сказанное, можно посчитать допусковые и недопусковые значения для каждого параметра.

Для параметра  $x_1$  – концентрации исходных компонентов:

$$d_i = 0,7185; \quad nd_i = 0,7849.$$

Для параметра  $x_2$  – влажности, фракционного и химического состава сырья:

$$d_i = 0,4685; \quad nd_i = 0,5349.$$

Для параметра  $x_3$  – концентрации модифицирующих добавок:

$$d_i = 0,1575; \quad nd_i = 0,2682.$$

Для параметра  $x_4$  – концентрации связующего компонента:

$$d_i = 0,0351; \quad nd_i = 0,2564.$$

Для параметра  $x_5$  – термообработки:

$$d_i = 6749,9999; \quad nd_i = 6750,0000.$$

Для параметра  $x_6$  – скорости вращения валков центрифуги:

$$d_i = 38999,9999; \quad nd_i = 39\,000,0000.$$

Для параметра  $x_7$  – температуры окружающей среды:

$$d_i = 136,4989; \quad nd_i = 136,5011.$$

Для параметра  $x_8$  – относительной влажности в помещении:

$$d_i = 4,2937; \quad nd_i = 4,3491.$$

Следовательно, для каждого из восьми контролируемых параметров известны точные значения и условия попадания параметра в допуск.

При проведении допускового контроля каждого из режимных параметров допусковая вероятность  $P_{\text{доп}}$ , с которой значения этих параметров должны лежать в пределах относительной погрешности (не более 4%), принята равной 0,95, ранее значение вероятности было примерно равно 0,8. Были установлены точные значения зоны допуска для каждого из восьми режимных параметров и определены чёткие критерии попадания в допуск путём подсчёта средней суммы контролируемого режимного параметра и сравнения этой суммы со значениями допуска и недопуска.

Проведём расчёты, с помощью которых станет возможным установить количественный показатель допуска ( $\Delta x_n, \Delta x_v$ ). Зная зависимость теплопроводности от различных параметров, полученные ранее, будем варьировать значениями режимных параметров, увеличивая и уменьшая их, от 1 до 10%, до получения наименьшего значения погрешности  $\delta$ .

Получена зависимость  $\lambda$  от химического состава сырья для изоруфа ( $\lambda = 0,034 \text{ Вт/(м·К)}$ ) в виде  $\lambda^* = f(Q_c) = 2,13 \cdot 10^{-4} Q_c + 2,73 \cdot 10^{-2}$ . Известно, что химический состав сырья должен находиться в пределах 30...40%. Теперь, увеличивая и уменьшая значения режимного параметра на 0,1...10,0%, вычислим значения  $\lambda$ , обеспечивающие погрешность измерения теплопроводности до 4. Подобные операции варьирования значениями различных режимных параметров проведены для зависимости  $\lambda$  от неуправляемых режимных параметров (температуры  $T_{\text{oc}}$  и влажности  $V_{\text{oc}}$  окружающей среды) для изофаса-ЛМ ( $\lambda = 0,039 \text{ Вт/(м·К)}$ ); для зависимости  $\lambda$  от состава исходного сырьевого материала (состава и концентрации габбро-базальтовой породы) и от входных параметров материалов (плотности,  $\text{кг/м}^3$ ); для изовента ( $\lambda = 0,032 \text{ Вт/(м·К)}$ ); для зависимости  $\lambda$  от входных параметров материалов; для зависимости  $\lambda$  от температуры и влажности для эталонного материала рипора ( $\lambda = 0,028 \text{ Вт/(м·К)}$ ) и т.д.

Результаты варьирования значений режимных параметров и определение  $\Delta$  отражены в табл. 2.7.

## 2.7. Результаты определения порога допуска

Материал / режимный параметр	Допуск $\Delta$ , %	Значения теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)		Относительная погрешность $\delta$ , %	
		$\lambda_{\Delta_H}$	$\lambda_{\Delta_B}$	$\delta_{\Delta_H}$	$\delta_{\Delta_B}$
Изоруф/ химический состав сырья	$\Delta \pm 10\%$	0,0343	0,0373	0,8824	9,7433
	$\Delta \pm 5\%$	0,0333	0,0363	0,9011	6,7633
	$\Delta \pm 3\%$	0,0347	0,0359	2,0588	5,1112
	$\Delta \pm 2\%$	0,0349	0,0357	2,0633	5,5812
	$\Delta \pm 1,5\%$	0,0351	0,0356	2,9333	4,7213
	$\Delta \pm 1,1\%$	0,0349	0,0355	2,0633	1,4285
	$\Delta \pm 1\%$	0,0346	0,0348	1,5647	2,3529
	$\Delta \pm 0,5\%$	0,0343	0,0345	0,8824	1,4705
	$\Delta \pm 0,1\%$	0,0342	0,0343	0,5882	0,8824
Изофас-ЛМ/ неуправляемые режимные параметры ( $T_{oc}$ )	$\Delta \pm 10\%$	0,0399	0,0423	2,3333	8,4624
	$\Delta \pm 5\%$	0,0383	0,0413	1,7922	5,6443
	$\Delta \pm 3\%$	0,0397	0,0409	1,7924	4,8721
	$\Delta \pm 2\%$	0,0399	0,0407	2,3112	4,3533
	$\Delta \pm 1,5\%$	0,0411	0,0406	2,5512	4,1223
	$\Delta \pm 1,1\%$	0,0398	0,0405	2,8333	3,8522
	$\Delta \pm 1\%$	0,0399	0,0396	2,3076	1,5385
	$\Delta \pm 0,5\%$	0,0398	0,0397	2,0513	1,7949
	$\Delta \pm 0,1\%$	0,0398	0,0395	2,0513	1,9821
Изофас-ЛМ/ неуправляемые режимные параметры ( $V_{oc}$ )	$\Delta \pm 10\%$	0,0394	0,0413	4,1111	5,8913
	$\Delta \pm 5\%$	0,0373	0,0406	1,0330	3,3331
	$\Delta \pm 3\%$	0,0397	0,0399	2,7911	2,3324
	$\Delta \pm 2\%$	0,0399	0,0407	1,3232	2,3511
	$\Delta \pm 1,5\%$	0,0396	0,0397	1,7911	2,7911
	$\Delta \pm 1,1\%$	0,0395	0,0398	1,9821	2,2844
	$\Delta \pm 1\%$	0,0380	0,0394	2,5641	1,4256
	$\Delta \pm 0,5\%$	0,0391	0,0393	0,2564	0,7692

Продолжение табл. 2.7

Материал / режимный параметр	Допуск $\Delta$ , %	Значения теплопровод- ности $\lambda$ , Вт/(м·К)		Относительная погрешность $\delta$ , %	
		$\lambda_{\Delta_H}$	$\lambda_{\Delta_B}$	$\delta_{\Delta_H}$	$\delta_{\Delta_B}$
Изовент/ состав исходного сырьевого материала	$\Delta \pm 10\%$	0,0323	0,0353	0,9375	10,3330
	$\Delta \pm 5\%$	0,0313	0,0343	2,1912	7,1913
	$\Delta \pm 3\%$	0,0331	0,0339	3,4443	5,3222
	$\Delta \pm 1,5\%$	0,0333	0,0336	4,0625	5,0011
	$\Delta \pm 1,1\%$	0,0329	0,0335	2,8125	4,6912
	$\Delta \pm 1\%$	0,0324	0,0328	1,5251	2,4612
	$\Delta \pm 0,5\%$	0,0322	0,0325	0,6250	1,5625
	$\Delta \pm 0,1\%$	0,0319	0,0321	0,3125	0,3118
Изовент/исходные параметры сырья	$\Delta \pm 10\%$	0,0322	0,0358	0,6250	11,8813
	$\Delta \pm 5\%$	0,0311	0,0347	2,8232	8,4443
	$\Delta \pm 3\%$	0,0335	0,0341	4,6732	6,5621
	$\Delta \pm 2\%$	0,0328	0,0337	3,1114	5,3122
	$\Delta \pm 1,5\%$	0,0333	0,0335	2,5212	4,9234
	$\Delta \pm 1,1\%$	0,0327	0,0333	2,1911	4,0600
	$\Delta \pm 1\%$	0,0323	0,0329	0,9375	2,8125
	$\Delta \pm 0,5\%$	0,0318	0,0322	0,6250	0,7192
Рипор/ температура окружающей среды ( $T_{oc}$ )	$\Delta \pm 10\%$	0,0293	0,0313	4,6434	11,7812
	$\Delta \pm 5\%$	0,0277	0,0303	3,9333	8,2111
	$\Delta \pm 3\%$	0,0291	0,0299	2,8710	5,3212
	$\Delta \pm 2\%$	0,0289	0,0298	3,0811	6,2323
	$\Delta \pm 1,5\%$	0,0293	0,0296	4,6411	8,7234
	$\Delta \pm 1,1\%$	0,0288	0,0293	2,8622	4,6433
	$\Delta \pm 1\%$	0,0284	0,0287	1,4286	2,5
	$\Delta \pm 0,5\%$	0,0282	0,0283	0,7143	1,0714
	$\Delta \pm 0,1\%$	0,0281	0,0283	0,6412	1,0714

Материал / режимный параметр	Допуск $\Delta$ , %	Значения теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)		Относительная погрешность $\delta$ , %	
		$\lambda_{\Delta_H}$	$\lambda_{\Delta_B}$	$\delta_{\Delta_H}$	$\delta_{\Delta_B}$
Рипор/ относительная влажность окружающей среды ( $V_{oc}$ )	$\Delta \pm 10\%$	0,0294	0,0315	4,6434	12,7822
	$\Delta \pm 5\%$	0,0292	0,0301	3,9323	7,5232
	$\Delta \pm 3\%$	0,0291	0,0299	2,7323	6,7911
	$\Delta \pm 2\%$	0,0292	0,0288	3,2712	6,4334
	$\Delta \pm 1,5\%$	0,0289	0,0297	2,8644	6,0722
	$\Delta \pm 1,1\%$	0,0287	0,0296	3,2111	4,2913
	$\Delta \pm 1\%$	0,0284	0,0286	1,4286	2,1429
	$\Delta \pm 0,5\%$	0,0282	0,0285	0,7143	1,7857
	$\Delta \pm 0,1\%$	0,0281	0,0282	0,3571	0,7143

Таким образом, исходя из проведённых варьирований показателями порога допуска параметров и подсчётов значений теплопроводности и погрешности, становится очевидным, что обеспечивается требуемое значение относительной погрешности до 4% при изменении порога принадлежности к зоне допуска на 1%, следовательно, возможное отклонение от допуска на РП будет равным  $\Delta = 1\%$ .

С учётом проведённых вычислений можно конкретизировать описанное выше выражение, характеризующее допусковое значение. При сравнении заданной допусковой величины  $D(x_H, x_B)$  с известными пороговыми нормами (допусками),  $D(x_H, x_B) \leq \Delta D$ ,  $\Delta D(x_{H+\Delta_H}, x_{B+\Delta_B})$ . Значение режимного параметра, близкое к пороговому с учётом  $\Delta = 1\%$  (РП), считается находящимся в допуске и принимается допустимым при мониторинге.

С учётом приведённых расчётов все допусковые значения для каждого режимного параметра можно конкретизировать и представить в виде табл. 2.8.

Аналогично в табл. 2.9 представлены допусковые значения для итогового показателя качества теплоизоляционных материалов – теплопроводности.

Во время допускового контроля режимных параметров системой производится измерение реальных значений параметров в целях определения вхождения в допустимый предел каждого показателя.

## 2.8. Допусковые значения режимных параметров

Режимный параметр	Допусковое значение	
	Нижняя граница	Верхняя граница
	$x_{H\Delta+1\%(\text{РП})}$	$x_{B\Delta+1\%(\text{РП})}$
$C$	70,7	80,1
$W_{\text{всс}}$	20,2	29,7
$C_{\text{д}}$	4,04	9,90
$C_{\text{св}}$	2,02	4,95
$V_{\text{ос}}$	48,5	59,4
$T_{\text{ос}}$	18,2	20,8
$P_T$	1210	1490
$S_{\text{ц}}$	6060	6930

## 2.9. Допусковые значения показателей теплопроводности

Теплоизоляционный материал	Допусковое значение $\lambda$ , Вт/м·К			
	Нижняя граница (при $283 \pm 5$ К)		Верхняя граница (при $598 \pm 5$ К)	
	$x_{H\Delta-1\%(\lambda_{\text{эТ}})}$	$x_{H\Delta+1\%(\lambda_{\text{эТ}})}$	$x_{B\Delta-1\%(\lambda_{\text{эТ}})}$	$x_{B\Delta+1\%(\lambda_{\text{эТ}})}$
Изолайт	0,0317	0,0323	0,0439	0,0441
Изовент	0,0317	0,0323	0,0449	0,0451
Изоруф-В	0,0347	0,0354	0,0479	0,0481
Изофас	0,0337	0,0343	0,0479	0,0481
Изофас-ЛМ	0,0387	0,0394	0,0509	0,0511
П-75С	0,0327	0,0333	0,0439	0,0451
П-125С	0,0327	0,0333	0,0459	0,0461
М1-100	0,0387	0,0394	–	–
М2-100	0,0387	0,0394	–	–
М3-100	0,0387	0,0394	–	–
Изошелл	0,0446	0,0455	–	–
Рипор	0,0277	0,0283	–	–

При этом применяется способ для случая, когда обрабатываемая информация относится к категории нечёткой. А именно используется математический аппарат теории нечётких множеств, задаваемых с помощью функции принадлежности (ФП).

Получены функции принадлежности к порогу зоны допуска для основных видов минераловатных плит и для восьми контролируемых РП. Функции принадлежности к зоне допуска лингвистической переменной РП для материала рипор – теплопроводности ( $\lambda$ ) – представлены на рис. 2.8.

Соответствующие функции принадлежности описываются зависимостями:

$$\mu_{f_{\lambda_1}}(\lambda) = \begin{cases} 0, \lambda < 0,0277; \\ 2,77 \cdot 10^{-2} \lambda^2 - 3,68 \cdot 10^{-2} \lambda + 7,39 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,0277; 0,02794]; \\ 1, \lambda \in [0,02794; 0,02795]; \\ 7,51 \cdot 10^{-3} \lambda^2 - 50,6 \cdot 10^{-2} \lambda + 53,1 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,02795; 0,02796]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{\lambda_2}}(\lambda) = \begin{cases} -12,5 \cdot 10^{-2} \lambda^2 + 24,8 \cdot 10^{-2} \lambda + 11,2 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,02794; 0,02796]; \\ 1, \lambda \in [0,02796; 0,02806]; \\ 2,92 \cdot 10^{-3} \lambda^2 - 36,8 \cdot 10^{-2} \lambda + 69,6 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,02806; 0,0281]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{\lambda_3}}(\lambda) = \begin{cases} 1,53 \cdot 10^{-2} \lambda^2 + 28,1 \cdot 10^{-2} \lambda + 7,74 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,02806; 0,02809]; \\ 1, \lambda \in [0,02796; 0,02806]; \end{cases}$$

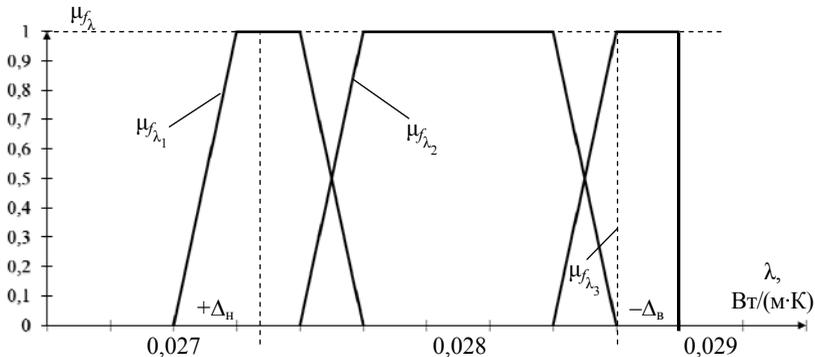
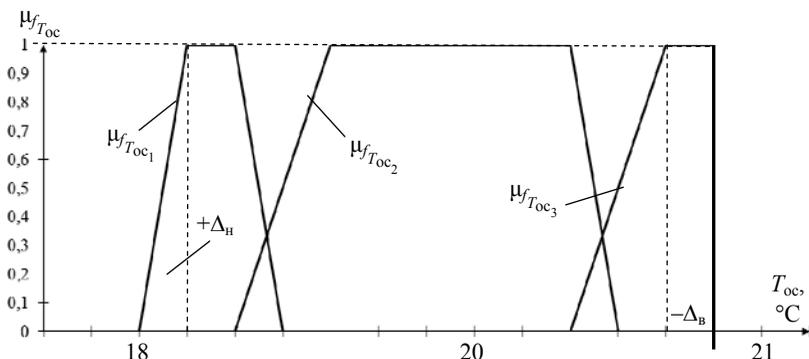


Рис. 2.8. Функция принадлежности нечётких множеств  $\mu_{f_{\lambda}}$



**Рис. 2.9.** Функция принадлежности нечётких множеств  $\mu_{f_{T_{oc}}}$

Функции принадлежности к зоне допуска лингвистических переменных РП для материала рипор – температуры окружающей среды ( $T_{oc}$ ) – представлены на рис. 2.9.

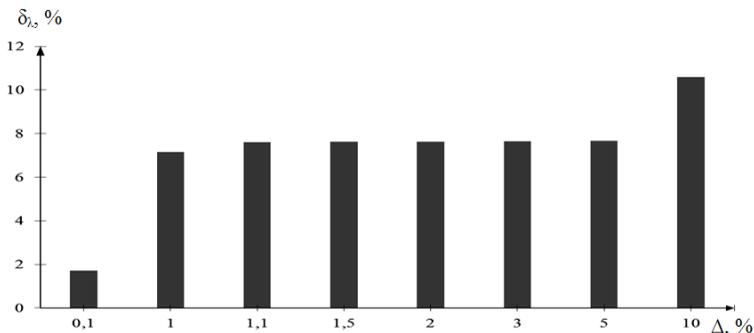
Для температуры окружающей среды  $T_{oc}$  соответствующие функции принадлежности описываются зависимостями:

$$\mu_{f_{T_{oc1}}}(T_{oc}) = \begin{cases} 0, & T_{oc} < 18; \\ 50,2 \cdot 10^{-2} T_{oc}^2 - 25,5 \cdot 10^{-2} T_{oc} + 30,3 \cdot 10^{-2}, & T_{oc} \in [18; 18,2]; \\ 1, & T_{oc} \in [18,2; 19]; \\ 52,4 \cdot 10^{-2} T_{oc}^2 + 45,6 \cdot 10^{-2} T_{oc} - 91,5 \cdot 10^{-2}, & T_{oc} \in [19; 19,1]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{T_{oc2}}}(T_{oc}) = \begin{cases} -12,5 \cdot 10^{-2} T_{oc}^2 + 19,8 \cdot 10^{-2} T_{oc} - 67,8 \cdot 10^{-2}, & T_{oc} \in [19; 19,5]; \\ 1, & \lambda \in [0,02796; 0,02806]; \\ -12,5 \cdot 10^{-2} T_{oc}^2 + 27,9 T_{oc} - 14,4 \cdot 10^{-2}, & T_{oc} \in [20,8; 20,83]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{T_{oc3}}}(T_{oc}) = \begin{cases} 54,3 \cdot 10^{-2} T_{oc}^2 + 13,5 \cdot 10^{-2} T_{oc} - 93,2 \cdot 10^{-2}, & T_{oc} \in [20,8; 21]; \\ 1, & T_{oc} \in [20,8; 21]. \end{cases}$$

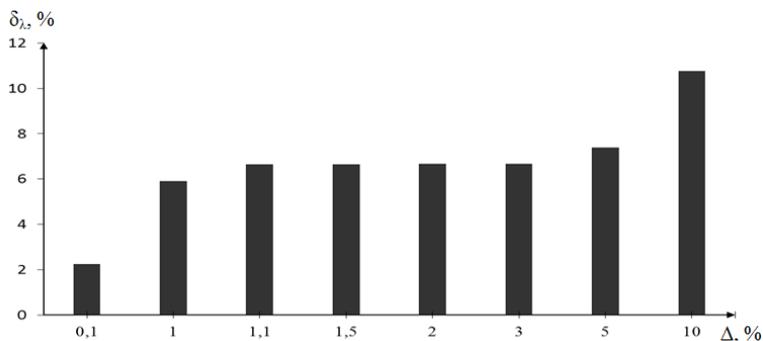
На рисунке 2.10 представлена зависимость относительной погрешности определения теплопроводности  $\delta_\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска  $\Delta$  химического состава сырья материала изоруфа. Проанализировав зависимость, можно понять, что погрешность изменяется на 8,88% в пределах варьирования порогом вхождения в зону допуска  $\Delta$  от 0,1 до 10%.



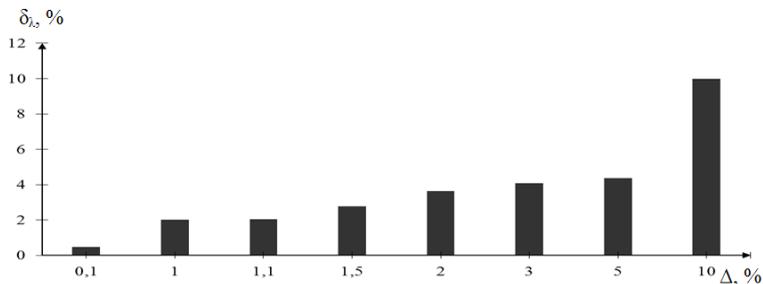
**Рис. 2.10.** Зависимость относительной погрешности определения  $\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска химического состава сыря

Получена зависимость относительной погрешности определения теплопроводности  $\delta_\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска  $\Delta$  для неуправляемых режимных параметров (температуры окружающей среды) на примере материала изофас-ЛМ (рис. 2.11). Анализ зависимости показывает, что погрешность определения  $\lambda$  изменяется на 8,51% при варьировании порогом вхождения в зону допуска  $\Delta$  от 0,1 до 10%.

На рисунке 2.12 представлена зависимость относительной погрешности определения теплопроводности  $\delta_\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска  $\Delta$  неуправляемых режимных параметров (влажности окружающей среды) на примере материала изофас-ЛМ. Проанализировав зависимость, можно понять, что погрешность изменяется на 9,5% в пределах варьирования порогом вхождения в зону допуска  $\Delta$  от 0,1 до 10%.



**Рис. 2.11.** Зависимость относительной погрешности определения  $\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска неуправляемых режимных параметров ( $T_{oc}$ )

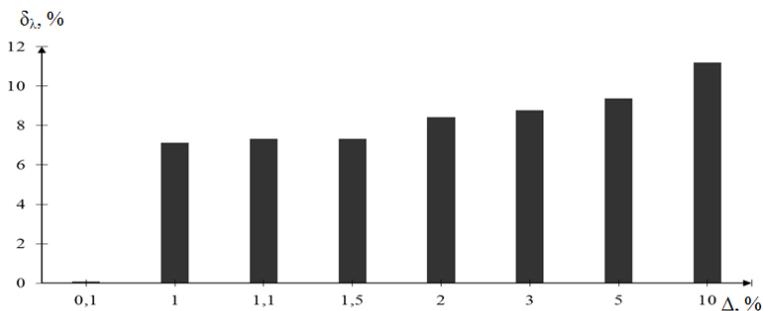


**Рис. 2.12. Зависимость относительной погрешности определения  $\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска неуправляемых режимных параметров ( $V_{oc}$ )**

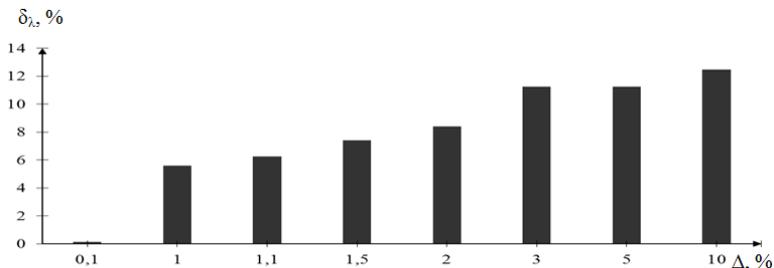
Получена зависимость относительной погрешности определения теплопроводности  $\delta_\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска  $\Delta$  состава исходного сырья минераловатной плиты изовент (рис. 2.13).

Анализ зависимости показывает, что погрешность определения  $\lambda$  изменяется на 11,112% при варьировании порогом вхождения в зону допуска  $\Delta$  от 0,1 до 10%.

На рисунке 2.14 представлена зависимость относительной погрешности определения теплопроводности  $\delta_\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска  $\Delta$  для входных параметров (исходного сырьевого материала) материала изовент. Проанализировав зависимость, можно понять, что погрешность изменяется на 12,36% в пределах варьирования порогом вхождения в зону допуска  $\Delta$  от 0,1 до 10%.



**Рис. 2.13. Зависимость относительной погрешности определения  $\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска состава исходного сырья**



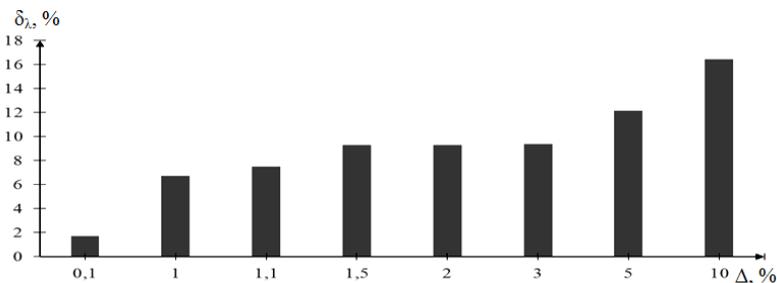
**Рис. 2.14. Зависимость относительной погрешности определения  $\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска для входных параметров материалов**

Получена зависимость относительной погрешности определения теплопроводности  $\delta_\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска  $\Delta$  температуры окружающей среды эталонного материала рипор (рис. 2.15).

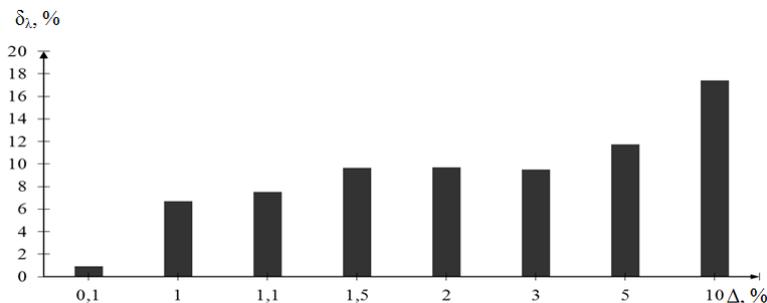
Анализ зависимости показывает, что погрешность определения  $\lambda$  изменяется на 14,71% при варьировании порогом вхождения в зону допуска  $\Delta$  от 0,1 до 10%.

На рисунке 2.16 представлена зависимость относительной погрешности определения теплопроводности  $\delta_\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска  $\Delta$  относительной влажности окружающей среды материала рипор.

Проанализировав зависимость, можно понять, что погрешность изменяется на 16,51% в пределах варьирования порогом вхождения в зону допуска  $\Delta$  от 0,1 до 10%.



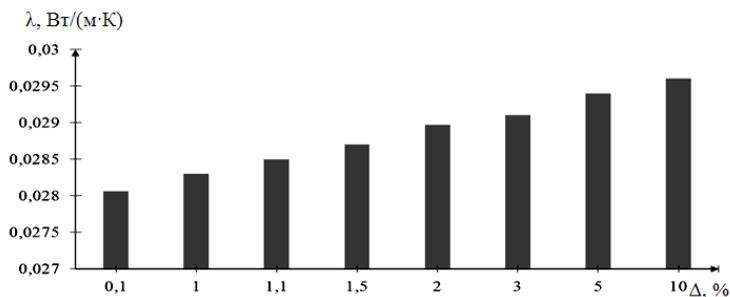
**Рис. 2.15. Зависимость относительной погрешности определения  $\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска  $T_{oc}$**



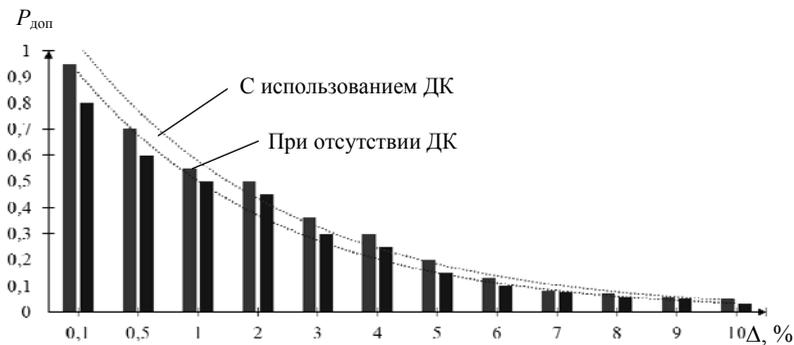
**Рис. 2.16. Зависимость относительной погрешности определения  $\lambda$  от изменения порога вхождения в зону допуска относительной влажности окружающей среды ( $V_{0c}$ )**

Также получена зависимость изменения теплопроводности от интегрального показателя изменения вхождения в зону допуска  $\Delta$  на примере материала рипор (рис. 2.17). Анализ данной зависимости показывает, что погрешность определения  $\lambda$  изменяется на 6,4% при варьировании порогом вхождения в зону допуска  $\Delta$  от 0,1 до 10%.

Вероятность получения качественной теплоизоляционной продукции  $P_{доп}$  зависит от вероятности вхождения каждого контролируемого режимного параметра в допуск. Только точный и своевременный допусковый контроль ещё на этапе технологического процесса изготовления минераловатных плит позволяет достигнуть требуемых показателей теплопроводности для всего разнообразия материалов и получить качественную, отвечающую всем нормативно-техническим требованиям продукцию (рис. 2.18).



**Рис. 2.17. Зависимость изменения  $\lambda$  от интегрального показателя изменения порога вхождения в зону допуска режимных параметров**



**Рис. 2.18. Экспериментальная зависимость выпуска качественных материалов  $P_{\text{доп}}$  от порога вхождения в зону допуска режимных параметров**

Лишь при условии, что каждый из восьми режимных параметров входит в предел допустимых значений с вероятностью  $P_{\text{доп}} = 0,95$ , произойдёт повышение вероятности получения требуемого значения теплопроводности  $\lambda$  и, как следствие, изготовления качественных теплоизоляционных материалов.

Таким образом, найден порог принадлежности к зоне допуска для контролируемых параметров  $\Delta$ , равный 1% (РП). Учёт данного порога принадлежности позволяет повысить вероятность получения качественной теплоизоляционной продукции  $P_{\text{доп}}$  с 0,80 до 0,95.

Рекомендуются конкретные числовые значения параметров, входящих в допуск, согласно которым можно точно определить вхождение параметра в зону допуска и, как следствие, обеспечить относительную погрешность измерения теплопроводности  $\delta_\lambda$ , равную 4%.

#### 2.4.1. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ

Цель оценки достоверности допускового контроля заключается в анализе и оценке технических решений по выбору методик измерений, решающих правил, границ допусков и решений по метрологическому обеспечению канала контроля. Проведение оценки достоверности допускового контроля призвано выявить ошибочные или недостаточно обоснованные решения и по возможности дать рекомендации по их устранению.

При обосновании контролируемых величин и границ допуска следует учитывать особенности объекта контроля, содержание задач

управления объектом, решаемых на основе результатов его контроля, погрешность, вносимую методиками и техническими средствами контроля, а также принятыми решающими правилами, характер распределения контролируемых величин, возможность его изменения.

Требования к достоверности контроля устанавливаются в виде пределов допустимых значений таких показателей, как [37]:

- $P_{г.б}$  – вероятность признания объекта контроля не удовлетворяющим установленным требованиям (бракованным) при условии, что в действительности он этим требованиям удовлетворяет, т.е. является годным;

- $P_{б.г}$  – вероятность признания объекта контроля удовлетворяющим требованиям (годным) при условии, что в действительности он этим требованиям не удовлетворяет, т.е. является бракованным;

- $P_{г.г}$  – вероятность признания объекта контроля удовлетворяющим требованиям (годным) при условии, что в действительности он соответствует этим требованиям;

- $P_{б.б}$  – вероятность признания объекта контроля не удовлетворяющим требованиям (бракованным) при условии, что в действительности он этим требованиям не удовлетворяет, т.е. представляет собой брак.

Полная группа событий:

$$P_{г.г} + P_{г.б} + P_{б.б} + P_{б.г} = 1.$$

В нашем случае с заданными верхней и нижней границами допуска  $C_H \leq x \leq C_B$ :

- вероятность отнесения действительно годного объекта к бракованным  $P_{г.б}$  задают выражением

$$P_{г.б} = \int_{-\infty}^{C_H+x} f(x) \int_{C_B+x}^{\infty} \varphi(\xi) d\xi dx,$$

где  $f(x)$  – плотность вероятности распределения контролируемой величины;  $\varphi(\xi)$  – плотность вероятности распределения погрешности оценки значения контролируемой величины  $x$ ;

- вероятность отнесения действительно бракованного объекта к годным  $P_{б.г}$  описывается как:

$$P_{б.г} = \int_{x+C_B}^{\infty} f(x) \int_{-\infty}^{x-C_H} \varphi(\xi) d\xi dx.$$

В качестве модели погрешности измерений режимных параметров и параметров теплоизоляционных материалов используется случайная величина с равномерным распределением. При моделировании процедуры допускового контроля в качестве стохастической модели каждого режимного параметра изделия использовалась нормально распределённая случайная величина с математическим ожиданием, равным номинальному значению параметра, при значении среднеквадратичного отклонения параметров  $\sigma = 0,8$ . Также было принято, что максимально допустимое отклонение каждого параметра изделия от его номинального значения  $\Delta = 4\%$  ( $\Delta/\sigma = 3,75$  при  $\sigma = 0,8$ ). При  $\sigma = 0,8$  средняя доля негодных изделий среди всех выпущенных составляет  $\sim 1,8\%$ . Вероятность отнесения действительно годного объекта к бракованным  $P_{г.б} = 0,48\%$ . Вероятность признания бракованного объекта контроля удовлетворяющим требованиям  $P_{б.г} = 0,47\%$ . Вероятность признания объекта контроля удовлетворяющим требованиям  $P_{г.г} = 92,7\%$ . Вероятность признания объекта контроля не удовлетворяющим требованиям  $P_{б.б} = 6,3\%$ .

Таким образом, допусковой контроль режимных параметров технологического процесса изготовления теплоизоляционных материалов является достоверным, т.е. обеспечивает получение результатов контроля с необходимой достоверностью (с требуемыми значениями установленных показателей достоверности), что в конечном счёте приводит к повышению точности технологического процесса и получению минераловатных плит с требуемыми показателями теплопроводности, а, следовательно, надлежащего качества.

### 3. АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

---

#### 3.1. АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ

Режимные параметры, требующие постоянного контроля на этапе технологического процесса производства минват, следующие: температура окружающей среды и относительная влажность в помещении; концентрация исходных компонентов, влажность, фракционный и химический состав сырья; концентрация модифицирующих добавок; концентрация связующего компонента; термообработка; скорость вращения валков центрифуги. Таким образом, определены восемь контролируемых режимных параметров.

Канал контроля представляет собой функциональное устройство системы допускового контроля ИИИС, в котором фиксируются контролируемые величины, формируются нормы допусковых зон, сравниваются текущие значения с нормами и делается вывод о состоянии контролируемого режимного параметра. Сравнение контролируемой величины с нормами, так как их число больше 2, выполняется в каналах контроля ИИИС параллельно.

Мониторинг технологического процесса производства минват с помощью ИИИС представлен в виде кортежа

$$M = \langle M_c, M_{p.п.}, M_T \rangle,$$

где  $M_c$  – мониторинг параметров и состава исходного сырья;  $M_{p.п.}$  – мониторинг значений режимных параметров;  $M_T$  – мониторинг теплопроводности теплоизоляционных материалов.

Блок-схема алгоритма мониторинга и допускового контроля ИИИС ДК ТТМ представлена на рис. 3.1.

Проведение указанных видов мониторинга и допускового контроля позволит получить теплоизоляционные материалы требуемого качества.

Рассмотрим более подробно каждый из трёх процессов мониторинга.

Блок-схема алгоритма мониторинга и допускового контроля параметров исходного сырья представлена на рис. 3.2.

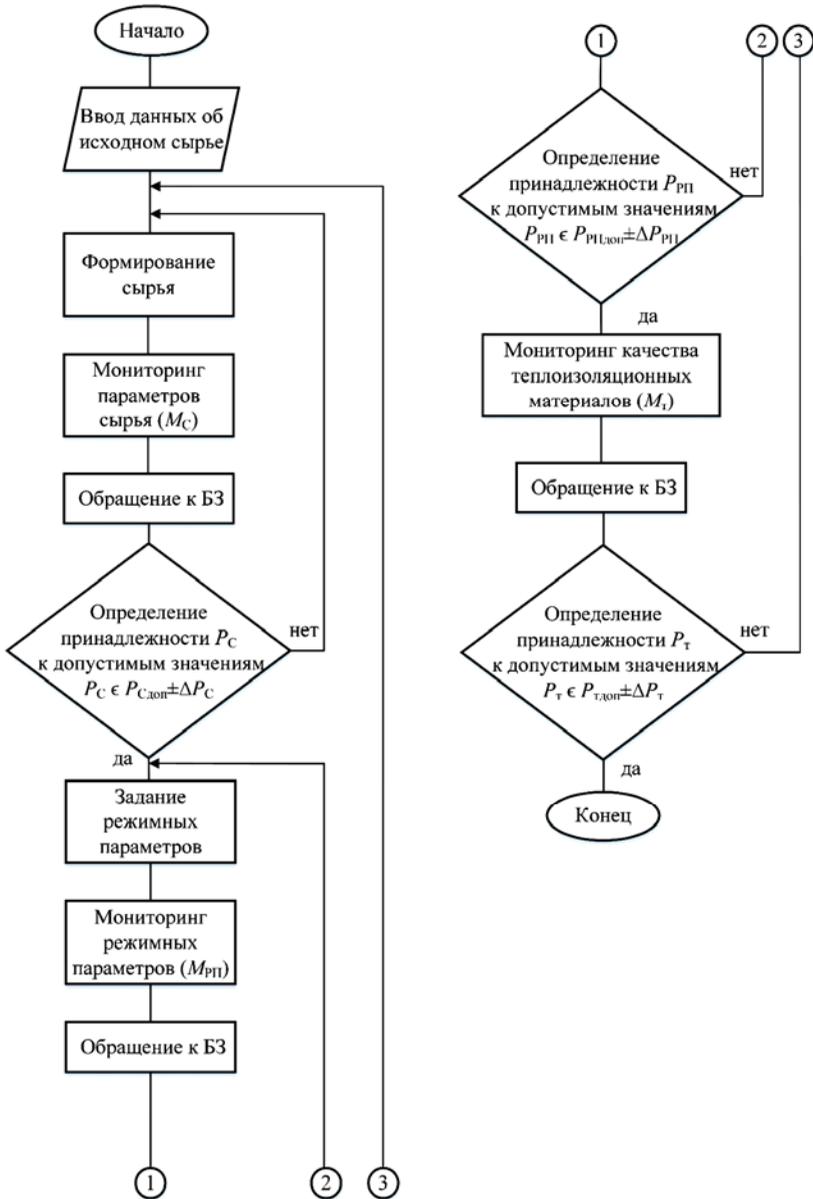
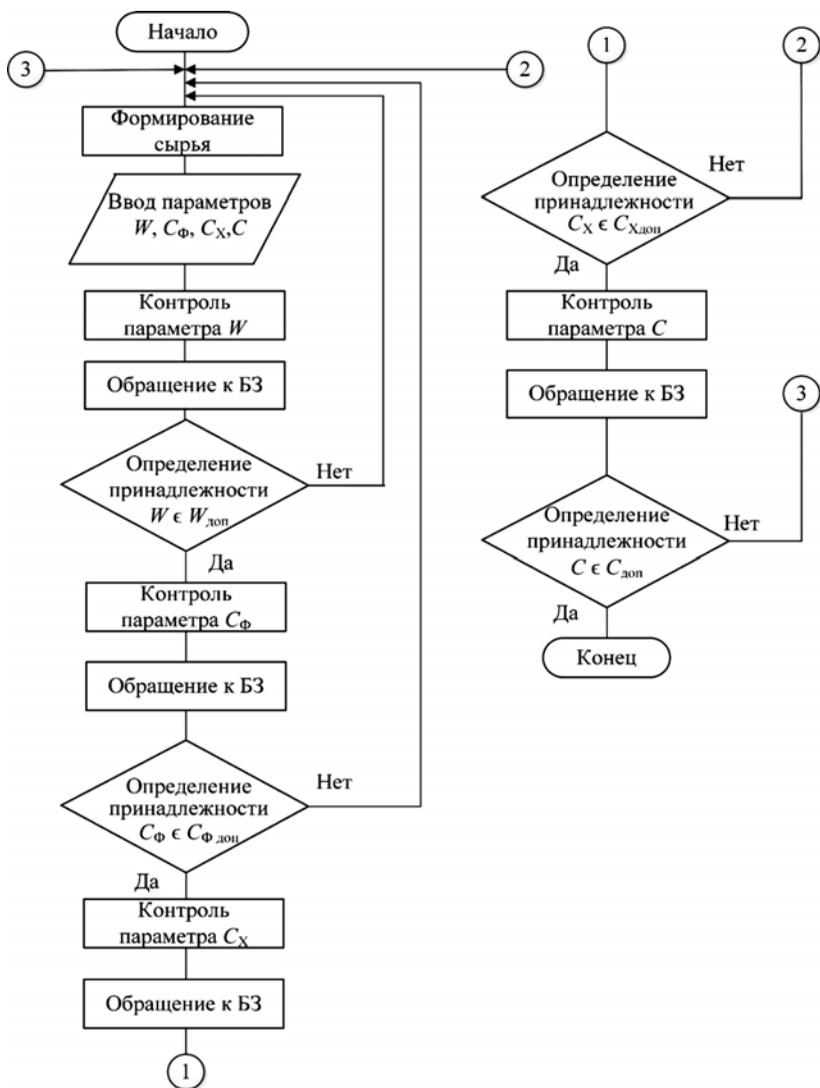


Рис. 3.1. Блок-схема алгоритма мониторинга и допускового контроля ИИС ДК ТТМ



**Рис. 3.2.** Блок-схема алгоритма мониторинга и допускового контроля параметров исходного сырья

Допусковый контроль параметров исходного сырья  $M_c$  включает контроль влажности, фракционного и химического состава, концентрации исходного сырья

$$M_c = \{W, C_{\phi}, C_x, C\},$$

где  $W$  – влажность сырья;  $C_{\phi}$  – фрикционный состав;  $C_x$  – химический состав;  $C$  – концентрация сырья.

При допусковом контроле параметров сырья определяется их принадлежность к заданному диапазону допустимых значений с указанием нижней (н) и верхней (в) границ допуска:

$$W \in (W_n, W_v), C_{\phi} \in (C_{\phi.n}, C_{\phi.v}), \\ C_x \in (C_{x.n}, C_{x.v}), C \in (C_n, C_v).$$

Мониторинг режимных параметров включает в себя контроль основных шести управляемых режимных параметров, таких как: концентрация исходных компонентов, влажность, фракционный и химический состав сырья, концентрация модифицирующих добавок, концентрация связующего компонента, термообработка, скорость вращения валков центрифуги, а также двух неуправляемых режимных параметров (температура окружающей среды и относительная влажность в помещении):

$$M_{\text{РП}} = \{C, W_{\text{всс}}, C_{\text{д}}, C_{\text{св}}, V_{\text{ос}}, T_{\text{ос}}, S_{\text{ц}}, P_T\},$$

где  $C$  – концентрация исходных компонентов;  $W_{\text{всс}}$  – влажность, фракционный и химический состав сырья;  $C_{\text{д}}$  – концентрация модифицирующих добавок;  $C_{\text{св}}$  – концентрация связующего компонента;  $V_{\text{ос}}$  – влажность окружающей среды;  $T_{\text{ос}}$  – температура окружающей среды;  $S_{\text{ц}}$  – скорость вращения валков центрифуги;  $P_T$  – параметр термообработки.

Для повышения точности технологического процесса изготовления минераловатных плит режимные параметры должны соответствовать допустимым значениям, которые задаются с указанием нижней и верхней границ:

$$C \in (C_n, C_v), W_{\text{всс}} \in (W_{\text{всс.н}}, W_{\text{всс.в}}), C_{\text{д}} \in (C_{\text{д.н}}, C_{\text{д.в}}), C_{\text{св}} \in (C_{\text{св.н}}, C_{\text{св.в}}), \\ V_{\text{ос}} \in (V_{\text{ос.н}}, V_{\text{ос.в}}), T_{\text{ос}} \in (T_{\text{ос.н}}, T_{\text{ос.в}}), S_{\text{ц}} \in (S_{\text{ц.н}}, S_{\text{ц.в}}), P_T \in (P_{Tн}, P_{Tв}).$$

Блок-схема алгоритма мониторинга и допускового контроля режимных параметров представлена на рис. 3.3.

Мониторинг параметров качества теплоизоляционных материалов заключается в точном и оперативном контроле параметров, характеризующих теплофизические свойства материалов: теплопроводности и температуропроводности:

$$M_T = \{\lambda, \alpha\},$$

где  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $\alpha$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с.

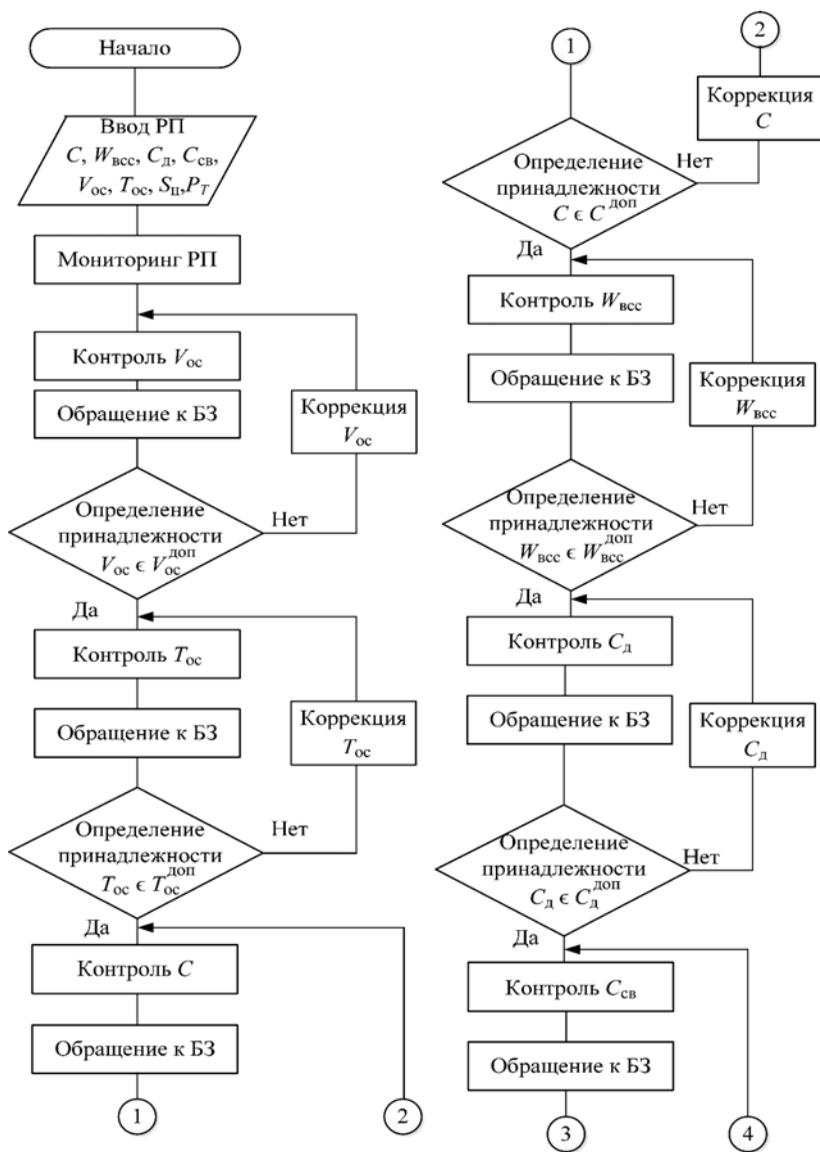


Рис. 3.3. Блок-схема алгоритма мониторинга и допускового контроля режимных параметров

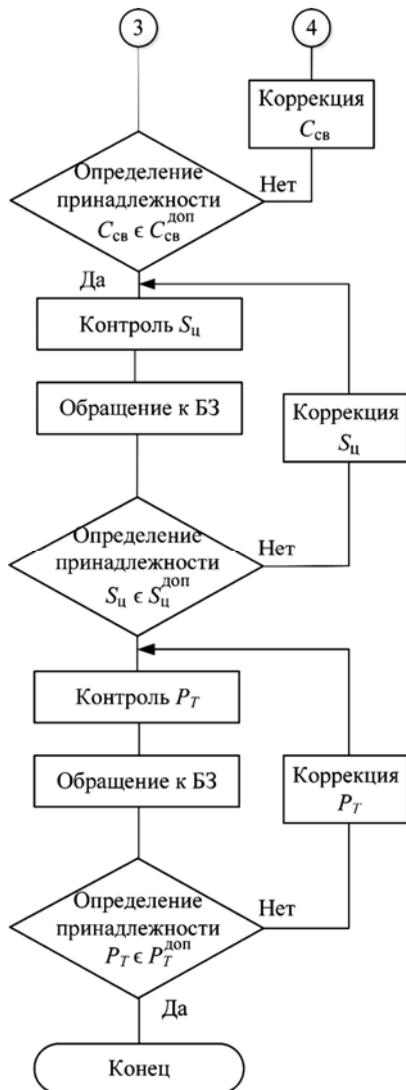


Рис. 3.3 (продолжение)

В качественных материалах  $\lambda$  и  $\alpha$  принадлежат зоне допуска:  $\lambda \in (\lambda_n, \lambda_b)$ ,  $\alpha \in (\alpha_n, \alpha_b)$ .

Блок-схема алгоритма мониторинга параметров качества теплоизоляционных материалов представлена на рис. 3.4.

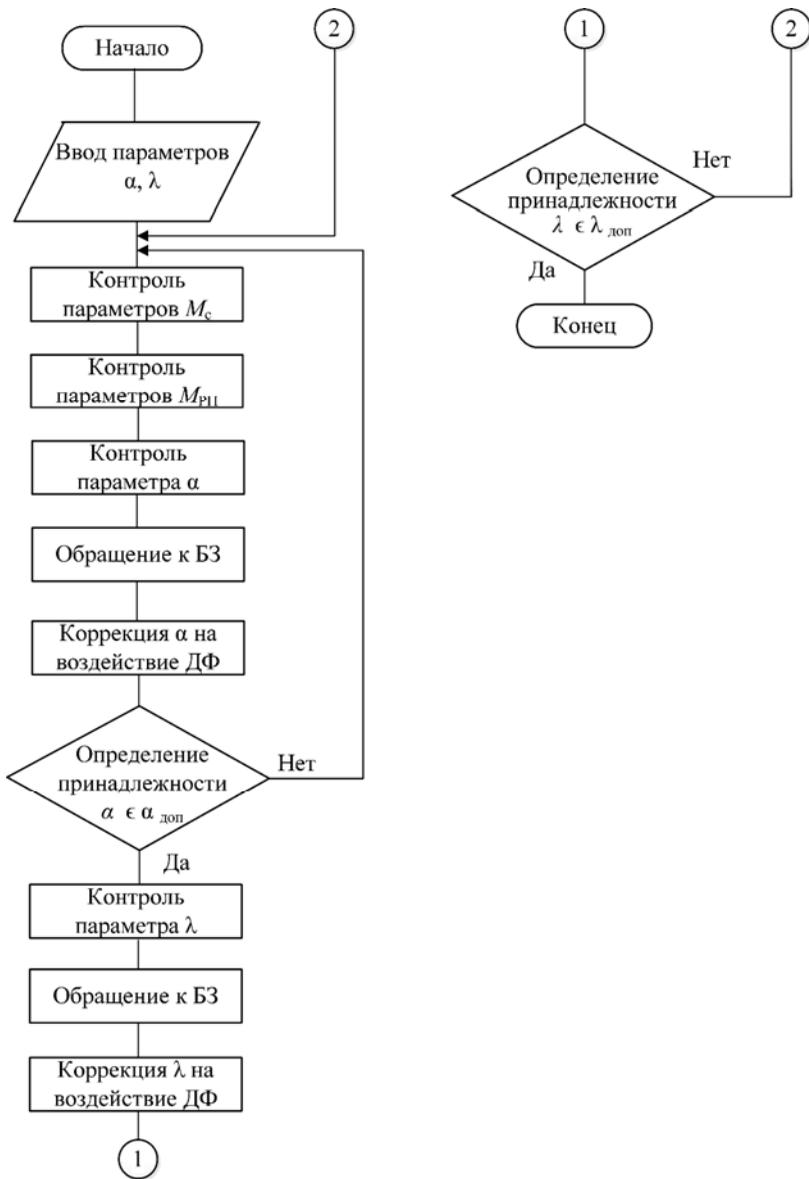
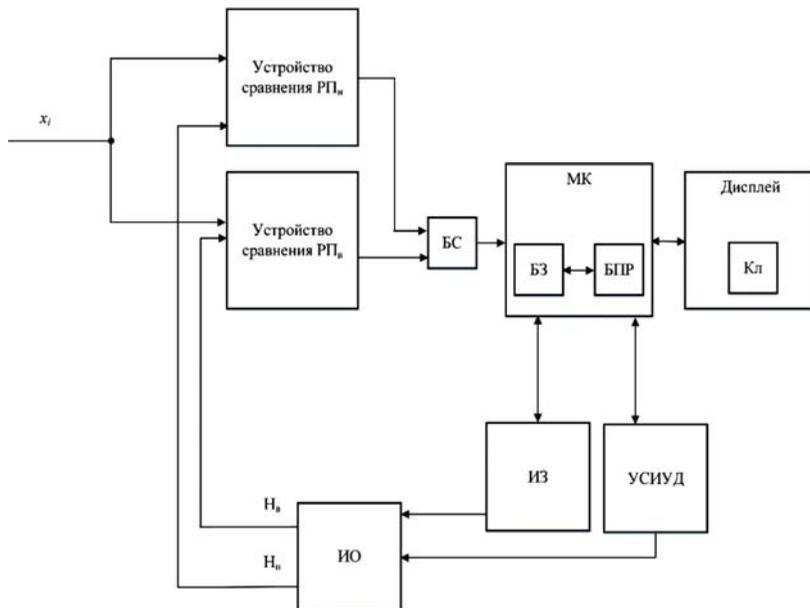


Рис. 3.4. Блок-схема алгоритма мониторинга параметров качества теплоизоляционных материалов

Так как количество норм небольшое, то сравнение с ними контролируемого режимного параметра делается параллельно. В аналоговом канале контроля ИИИС с двумя нормами ( $D_n$  и  $D_v$ ) и устройствами сравнения режимных параметров сигнал  $x_i$  от измерительной цепи с датчиками поступает на вход аналоговых устройств сравнения ИИИС (рис. 3.5). В состав ИИИС входит УСИУД – устройство согласования и управления данными.

В ходе процесса мониторинга происходит определение принадлежности входного сигнала  $x_i$  заданным допустимым значениям (нормам). Сначала рассматривается принадлежность  $x_i$  нижнему значению нормы  $D_n$ , определяется большее или меньшее значение, затем рассматривается принадлежность  $x_i$  верхнему значению нормы  $D_v$ . Далее принимается решение, если  $D_n \leq x_i \leq D_v$ , то значение контролируемого параметра в зоне допуска, если же значение  $x_i < D_n$  или  $x_i > D_v$ , то значение вышло за зону допуска.

После выполнения контроля может быть выдано суждение о том, что  $x_i$  находится в зоне допуска, в норме (область  $N$ ), или о том, что  $x_i$  вышло за пределы допуска.



**Рис. 3.5. Структурная схема ИИИС ДК ТТМ с каналом допускового контроля с параллельным выполнением операций сравнения**

Также результаты допускового контроля могут быть получены после анализа знака разности между контролируемым режимным параметром и нормами. В данном случае происходит сравнение разницы значений измеряемого параметра  $x_i$  и норм (верхней  $D_v$  и нижней  $D_n$ ), если выполняется условие  $x_i - D_n > 0$ ,  $x_i - D_v < 0$ , то принимается решение о вхождении параметра в зону допуска.

Непрерывный контроль, при котором канал контроля непрерывно фиксирует состояние контролируемого режимного параметра и изменение этого состояния, могут обеспечить только аналоговые каналы контроля с параллельным сравнением контролируемой величины со всеми нормами. В таких каналах контроля могут проявляться динамические погрешности, но при равных условиях в смысле быстроты действия используемых преобразователей погрешности минимальны по сравнению с другими типами канала контроля (аналоговых с последовательным сравнением и всех цифровых).

Контролируемый режимный параметр преобразован в напряжение, следовательно, нормы задаются с помощью делителей напряжения. В качестве устройств сравнения используются компараторы на основе операционных усилителей.

Описания норм в ИИИС представлены в цифровом виде, значения норм вводятся в память микроконтроллера. Сравнение норм с контролируемыми величинами в этом случае может быть выполнено в цифровом виде.

Сравнение кодов может осуществляться аппаратно, с помощью логических элементов, схем суммирования по модулю, цифровых компараторов.

Описание норм представлено в ИИИС в цифровом виде, так как имеется большое количество контролируемых величин, то значения норм вводятся либо в автономные устройства памяти, либо в память компьютера. Сопоставление норм может быть выполнено в цифровом либо в аналоговом варианте. В первом случае значение контролируемого режимного параметра может быть выражено цифровым кодом, во втором – значение нормы преобразуется в аналоговую величину, схожую с контролируемым параметром.

Система допускового контроля предназначена для определения состояния величин  $X = x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ . Конечная цель контроля – дать вывод о том, находится ли каждый контролируемый параметр в норме или нет (т.е.  $X(x_i \in N)$  или  $X(x_i \in N^*)$ ), где  $N$  – область допустимых значений,  $N^*$  – область недопустимых значений).

Система допускового контроля параллельного действия (многоканальная) состоит из параллельно (одновременно) работающих каналов контроля (рис. 3.6).

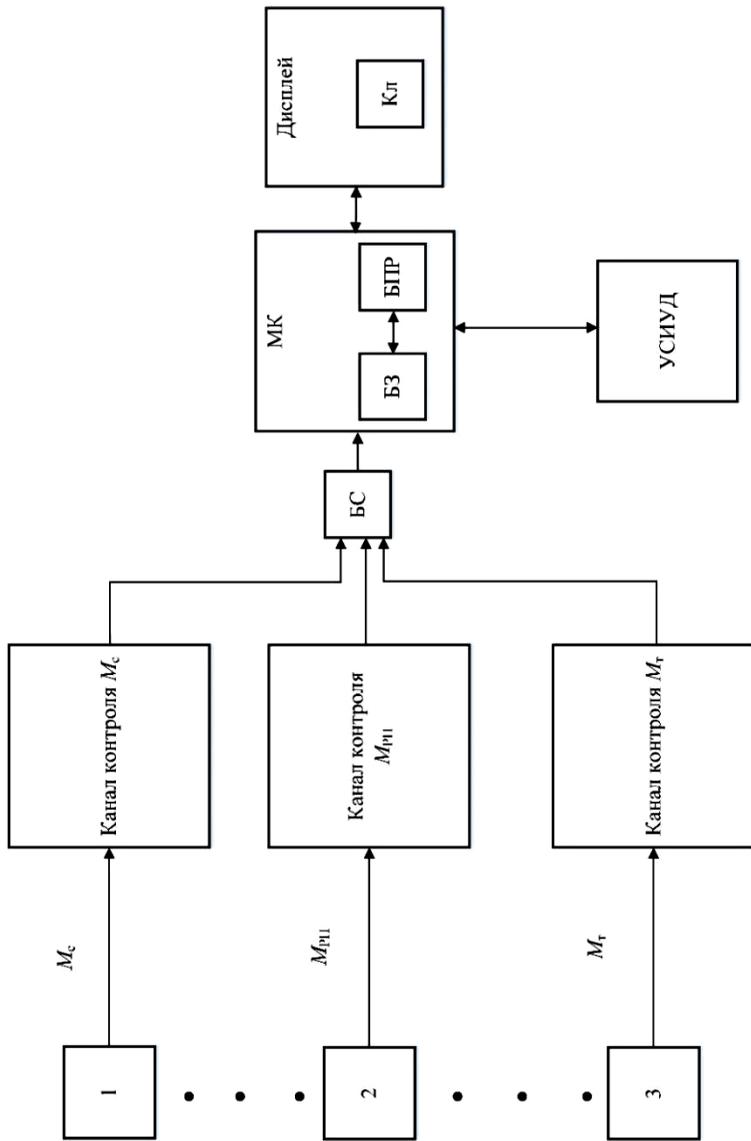


Рис. 3.6. Структурная схема многоканальной системы допускового контроля

Каждый канал контроля такой системы работает независимо от других каналов и выполняет функции допускового контроля одного контролируемого параметра.

Используемой системе допускового контроля присущи достоинства и недостатки ИИС параллельного действия: работа с разнообразными контролируемыми параметрами, повышенное быстродействие, простота структурного исполнения и повышенная надёжность, допустимая благодаря независимой работе всех каналов, использование относительно простых выпускаемых промышленностью каналов контроля. Однако использование многоканальных систем контроля означает большое число элементов, входящих в систему.

Многоканальная система контроля экономически более выгодна при относительно небольшом количестве контролируемых параметров, особенно если величины этих параметров разнородны по физической природе.

Контролируемые режимные параметры имеют относительно небольшую дисперсию, целесообразно измерять и проводить контроль, оперируя разностью между полученными и допустимыми значениями контролируемых параметров ИИИС.

Формируется или одновременно, или поочерёдно нужное количество норм, которые подключаются на устройства сравнения всех каналов контроля.

Систему допускового контроля можно существенно упростить, если оставить по одному устройству сравнения в каждом канале и использовать режим последовательного сравнения контролируемых параметров с нормами контроля.

В таких системах можно одновременно выполнять операции контроля и измерения, изменяя допусковые значения в пределах зоны допуска и регистрируя величины, входящие в эту зону. В таком режиме работы каждый канал контроля существенно упрощается, так как можно нивелировать наличие решающего устройства, устройства формирования норм, может быть использовано только одно устройство сравнения.

В нашем случае раздельная работа коммутаторов каналов контроля и измерения позволяет существенно увеличить скорость проведения контроля и измерения. Здесь коммутатор канала контроля работает значительно быстрее коммутатора канала измерения. После выполнения контроля всех величин запоминаются и отображаются величины, отклонившиеся от нормы (рис. 3.7).

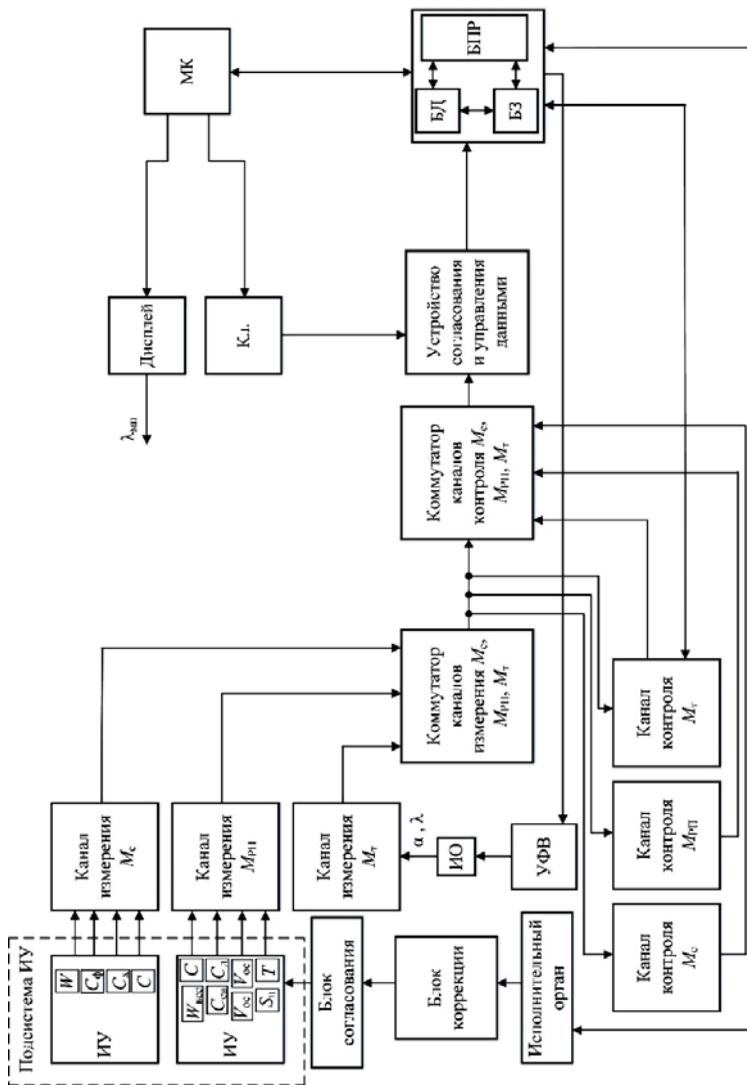


Рис. 3.7. Структурная схема ИИИС при реализации допускового контроля

ИИИС допускового контроля включает: два коммутатора, блок измерительных устройств (БИУ), блок мониторинга и допускового контроля (БМИДК), блок согласования сигналов, микроконтроллер (включающий базу знаний (БЗ) и блок принятия решений (БПР)), устройство согласования и управления данными, исполнительный орган, блок коррекции, блок согласования, устройство формирования тепловых воздействий (УФТВ), дисплей и клавиатуру (Кл).

Первые входы коммутатора канала измерения подключены к выходам блока исполнительного органа, выходы – к входам коммутатора канала контроля, вторые входы подключены к выходам канала измерения, а вторые выходы коммутатора канала контроля – к входам устройства согласования и управления данными, информационный выход которого подсоединён к блоку принятия решений, выход которого подключён к входу микроконтроллера, первые выходы которого подключены к дисплею и клавиатуре, подключённого к управляющим входам устройства согласования и управления данными.

По результатам преобразования в микроконтроллере (в частности, в блоке принятия решений) производится оценка результатов проверки и формируются сигналы о нахождении параметра в зоне допуска или за пределами зоны допуска, в зависимости от которых проводится дальнейшая проверка режимных параметров.

Если параметр регулируемый, то передаётся сигнал с выхода блока согласования сигналов на блок принятия решений, входящий в состав микроконтроллера. Микроконтроллер производит логическую оценку результата проверки в пределах допусков на регулировку и формирует сигнал на выходе, если параметр находится в пределах зоны допуска на регулировку, или если параметр находится за пределами допуска на регулировку. Сигналы с выходов поступают через устройство согласования и управления данными на входы устройства управления и индикации. Устройство управления принимает решение: о регулировке режимного параметра или же в ином случае о неисправности объекта контроля.

Управление режимами работы системы, индикация прохождения процесса контроля осуществляются с помощью клавиатуры и дисплея соответственно.

В целях уменьшения потоков информации, повышения надёжности работы системы, обслуживающей несколько объектов контроля, создана распределённая система контроля. В ней каждый объект контроля обслуживается своей подсистемой, содержащей измерительные цепи с датчиками, АЦП, устройства с микропроцессорами и устройства сопряжения с центром управления.

Цель допускового контроля – определение соответствия текущих состояний режимных параметров объекта контроля заданным нормам. Методическая основа процесса контроля – произведение сравнения параметров, характеризующих объект контроля, с допусковыми значениями и анализ результатов сравнения.

Создан алгоритм мониторинга и допускового контроля на основе использования математической модели и метода допускового контроля с использованием разработанной базы знаний ИИИС ДК ТТМ.

### **3.2. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Информационное обеспечение ИИИС осуществляется с использованием созданной базы знаний в специализированном программно-аппаратном блоке. Измерительная система, обладающая интеллектуальными свойствами, применяет эту систему знаний и выполняет с ней разные операции, например обнаружение требуемых сведений, модернизация этих сведений, обработка и формализация знаний, формирование новых знаний, на основе имеющихся и т.д. Последовательность осуществления подобных операций зависит от специфики языка представления знаний, а также от образа представления знаний в ИИИС. Так как система знаний важна не персонально, а конкретно перспективами её использования и потому как структура выполнения операции с системой знаний обуславливается языком представления знаний, то любой существующий сейчас метод представления знаний является совокупностью и взаимосвязанными средствами фигурального определения знаний и управления данными знаниями [20].

#### **3.2.1. МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ**

База знаний – важная составляющая разрабатываемой ИИИС неразрушающего контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов. Она содержит большой объём априорно и апостериорной информации, требуемой для проведения процедуры контроля свойств материалов в рассматриваемой предметной области, нахождения значений параметров материалов, метрологического анализа итогов измерений, структурированного принятия решений, начиная от момента определения вида исследуемого материала до момента нахождения итогового результата.

База знаний накапливает и содержит в себе информацию о классах материалов (интервал теплопроводности и температуропроводно-

сти, плотности, теплоёмкости, структуре материала); информацию о контролируемых режимных параметрах; допусковые значения режимных параметров, влияющих на конечное качество материалов; возможной ситуации измерений; методы настройки и поверки ИИИС; информацию о математических зависимостях (для определения характеристик качества материалов); аппроксимирующих зависимостях (для идентификации дестабилизирующих факторов, действующих на систему); о требуемых значениях параметров, характеризующих теплофизические свойства материалов и т.д.

В настоящее время наиболее активно используемой и развивающейся формой представления знаний считаются фреймы, это объясняется их универсальностью и гибкостью [39]. Фрейм в любом представлении – это минимально необходимый набор информации, которой точно и наверняка позволяет определить нужный класс контролируемого материала. Если для описания материала имеется в наличии фрейм, то материал можно отнести к тому классу, которым он характеризуется. Возможно представление фрейма в виде сети, которая состоит из узлов и связей между узлами.

База знаний ИИИС ДК ТТМ включает:

- информацию о математической модели, позволяющей определить параметры теплофизических свойств материалов, таких как теплопроводность ( $\lambda$ ), температуропроводность ( $\alpha$ ) и теплоёмкость ( $C$ );
- сведения об исследуемых материалах, а именно теплоизоляционных (в форме плит, матов, цилиндров);
- сведения о режимных параметрах, таких как температура окружающей среды ( $T_{oc}$ ) и относительная влажность ( $V_{oc}$ ) в помещении, концентрация исходных компонентов ( $C$ ), влажность, фракционный и химический состав сырья ( $W_{вcc}$ ), концентрация модифицирующих добавок ( $C_d$ ) (водоотгаливающие и обеспыливающие), концентрация связующего компонента ( $C_{c.k}$ ) (для придания волокну требуемых плотности, прочности и толщины), параметр термообработки ( $P_T$ ), скорость вращения валков центрифуги ( $S_{ц}$ );
- сведения о структуре, которая в соответствии с классификацией разделяет материалы на пористые, волокнистые, ячеистые и по величине плотности;
- данные о методе контроля: импульсном методе;
- информацию о методах метрологического обеспечения, к которым относятся аналитический метод, метод метрологического эксперимента и метод имитационного моделирования;
- программное обеспечение, которое реализует функционирование блока логического вывода и производственные правила.

Задача создания информационного обеспечения интеллектуальной системы контроля теплопроводности материалов стратегическая. Поэтому необходим постоянный анализ информационного обеспечения, приводящий к следующим выводам: как обрабатывать и анализировать полученную информацию, какая есть важнейшая информация во внешней и внутренней среде рассматриваемой предметной области, какой информации недостаточно, какую информацию необходимо постоянно пополнять или периодически.

Предлагается структура фреймовой модели базы знаний системы мониторинга техпроцесса производства материалов, показанная на рис. 3.8 [40].

В базе знаний представлены структуры фреймов «Исследуемые материалы», «Структура материалов», «Режимные параметры», «Метод контроля», «Метрологическое обеспечение», «Программное обеспечение».

Фрейм-экземпляр «Исследуемые материалы» включает слоты, характеризующие форму исследуемых теплоизоляционных материалов: плиты, маты, цилиндры.

Фрейм-экземпляр «Структура материалов» включает в себя слоты со значениями пористости, волокнистости, ячеистости и величины плотности для каждого материала.

Фрейм-экземпляр «Исследуемые материалы» (рис. 3.9) состоит из слотов «Плиты», «Маты» и «Цилиндры». Слот «Плиты» включает в себя теплоизоляционные материалы, изготавливаемые в форме плит, такие как: изолант, изовент, изофлор, изорурф, изофас со значениями  $\lambda$ , колеблющимися в диапазоне 0,032...0,039, Вт/(м·К). Слот «Маты» содержит информацию о материалах, производимых в форме матов (п-75с, п-125с, м1-100, м2-100, м3-100), значения  $\lambda$  от 0,036 до 0,039 Вт/(м·К). Слот «Цилиндры» включает материалы в форме цилиндров (изошелл, изошелл-Л, изошелл-ЛМ) со значениями  $\lambda$  в диапазоне 0,039...0,045 Вт/(м·К).

Фрейм-экземпляр «Структура материалов» (рис. 3.10) состоит из слотов «Пористость» (включает значения пористости материалов 80...90%), «Волокнистость» (значения параметра волокнистости 5...20 мкм), «Ячеистость» (включает значения ячеистости материалов 0,068...0,170 мг/(м·ч·Па)) и «Плотность». Слот «Плотность» включает в себя значения качественного параметра теплоизоляционных материалов – плотности. Значения плотности находятся в пределах 50...175 кг/м<sup>3</sup>.

Фрейм-экземпляр «Режимные параметры» (рис. 3.11) состоит из слотов «Неуправляемые» и «Управляемые».

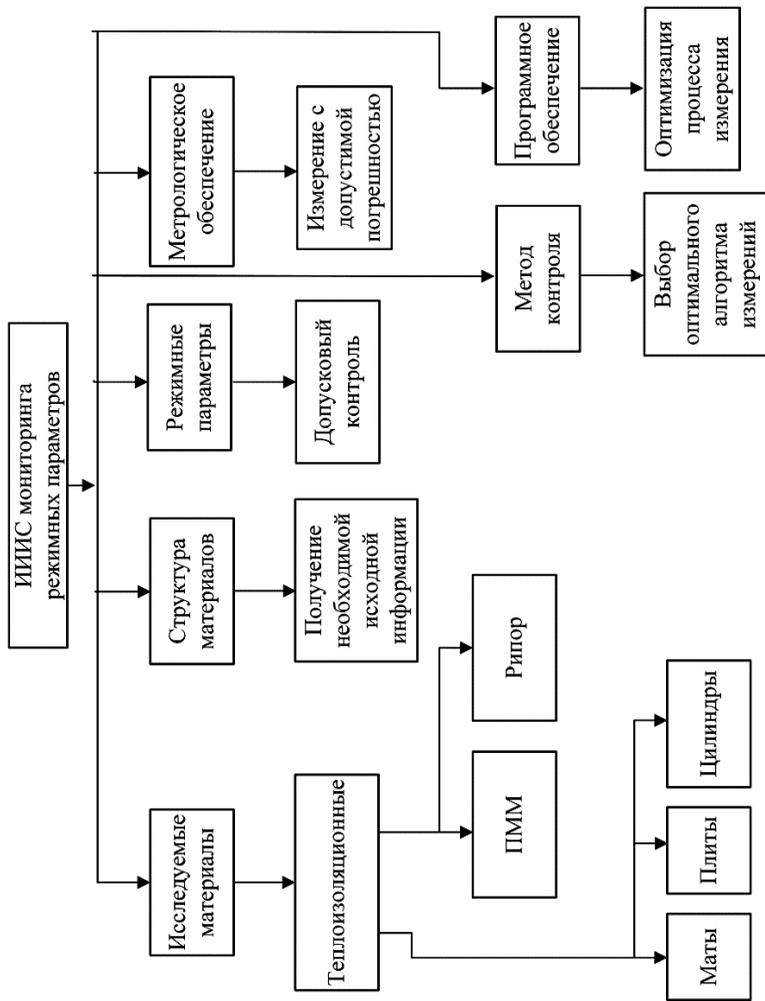


Рис. 3.8. Структурная схема фреймовой модели представления базы знаний ИИС мониторинга режимных параметров

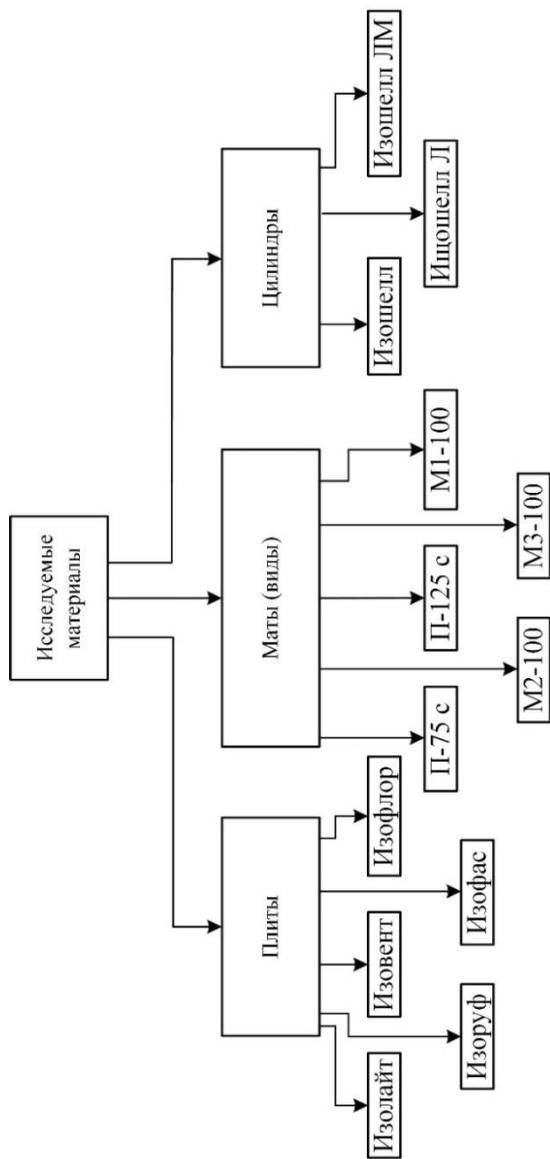


Рис. 3.9. Структура фрейма «Исследуемые материалы»



Рис. 3.10. Структура фрейма «Структура материалов»

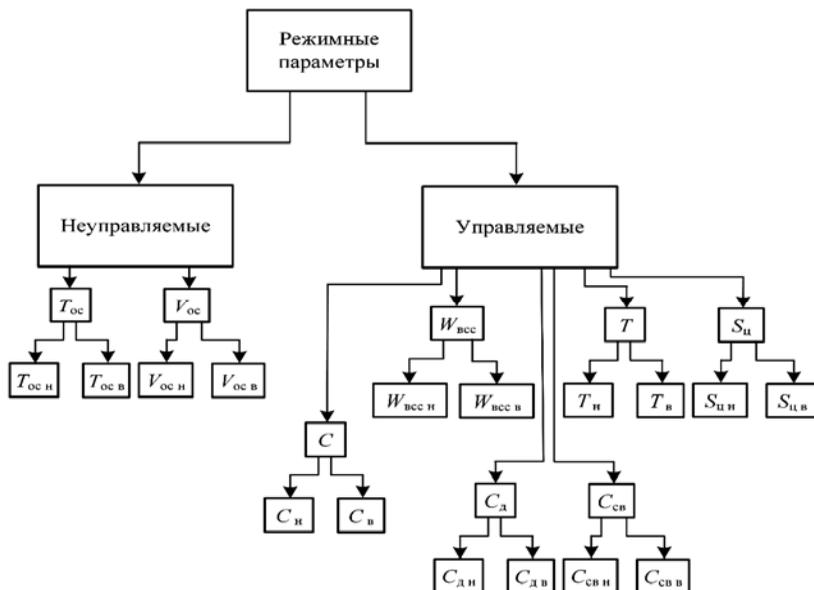
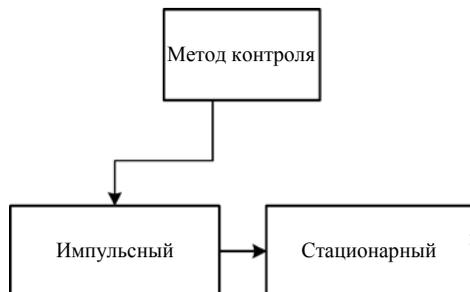


Рис. 3.11. Структура фрейма «Режимные параметры»

Слот «Неуправляемые» включает в себя значения так называемых неуправляемых режимных параметров, а именно температуру окружающей среды ( $T_{oc}$ ) и относительную влажность ( $V_{oc}$ ). Слот «Управляемые» состоит из значений остальных режимных параметров, значениями которых можно управлять. Каждый из слотов всех параметров, как управляемых, так и неуправляемых, включает в себя значения нижнего допустимого значения и верхнего допустимого значения параметра (например, для температуры окружающей среды:  $T_{oc,н}$  и  $T_{oc,в}$ ).

Фрейм-экземпляр «Метод контроля» (рис. 3.12) состоит из слотов «Импульсный» и «Стационарный».

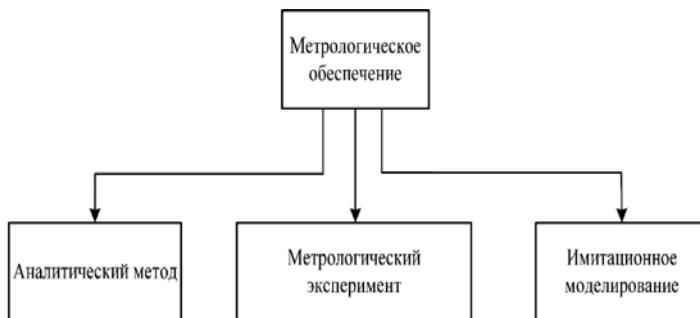


**Рис. 3.12. Структура фрейма «Метод контроля»**

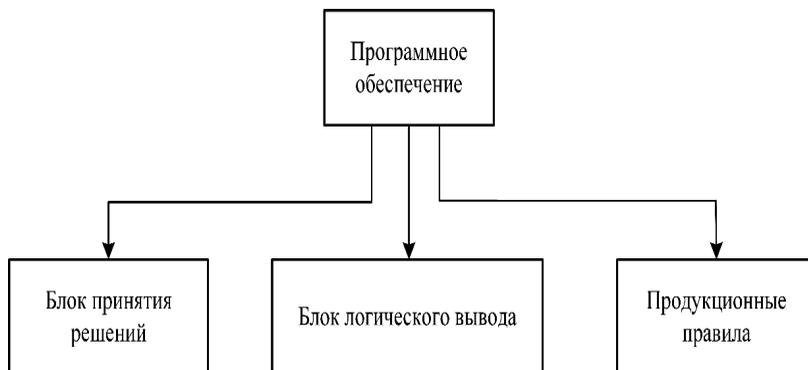
Слот «Импульсный» включает в себя нестационарный импульсный метод контроля значений теплопроводности, заключающийся в тепловом воздействии на поверхность материала в виде импульсов с заданной частотой, длительностью и скважностью.

Фрейм-экземпляр «Метрологическое обеспечение» (рис. 3.13) состоит из слотов «Аналитический метод», «Метрологический эксперимент» и «Имитационное моделирование». Слот «Аналитический метод» включает в себя аналитический метод обеспечения метрологического уровня, заключающийся в создании математических моделей для ИИИС и последующем анализе этих моделей в целях определения оптимальных вариантов повышения метрологического уровня системы. Слот «Метрологический эксперимент», подразумевает проведение метрологического эксперимента для выполнения предварительных экспериментальных исследований, на основе которых строятся математические модели, в целях установления отличия реальных характеристик ИИИС от требуемых и допустимых.

На рисунке 3.14 представлена структура фрейма «Метрологическое обеспечение».



**Рис. 3.13. Структура фрейма «Метрологическое обеспечение»**



**Рис. 3.14. Структура фрейма «Программное обеспечение»**

Слот «Имитационное моделирование» подразумевает проведение имитационного моделирования модели системы или измерительной ситуации в целях получения достаточно устойчивой статистики работы системы или процесса технологического производства материалов, заключается в замене реальной системы моделью, с необходимой точностью описывающей реальную систему.

Разработанная структура фреймовой модели базы знаний включает фреймы исследуемых теплоизоляционных материалов, пример фреймов приведён в табл. 3.1 – 3.3, и фреймы других компонентов информационного обеспечения интеллектуальной системы контроля теплопроводности материалов.

### 3.1. Фрейм-образец для изоруба

Имя слота	Значение	Размерность	Подкласс	Класс
Температура	283 ± 5	К	Минераловатные	Теплоизоляционные
Теплопроводность	0,039	Вт/(м·К)		
Теплоёмкость	1,42	кДж/(кг·К)		
Плотность	150	кг/м <sup>3</sup>		
Влажность	0,5			
Пористость	90	%		
Волокнистость	5	мкм		

### 3.2. Фрейм-образец для МЗ-100

Имя слота	Значение	Размерность	Подкласс	Класс
Температура	$283 \pm 5$	К	Минераловатные	Теплоизоляционные
Теплопроводность	0,039	Вт/(м·К)		
Теплоёмкость	1,38	кДж/(кг·К)		
Плотность	90...100	кг/м <sup>3</sup>		
Влажность	0,5	%		
Пористость	90	%		
Волокнистость	15	мкм		

### 3.3. Фрейм-образец для изошелла

Имя слота	Значение	Размерность	Подкласс	Класс
Температура	$283 \pm 5$	К	Минераловатные	Теплоизоляционные
Влажность	1	%		
Пористость	90	%		
Волокнистость	20	мкм		
Теплопроводность	0,039	Вт/(м·К)		
Теплоёмкость	0,84	кДж/(кг·К)		
Плотность	100	кг/м <sup>3</sup>		

Значения слотов фреймов «Предметная область», «Исследуемые материалы», «Структура материалов», «Режимные параметры» приведены в табл. 3.4.

### 3.4. Фреймы «Предметная область», «Исследуемые материалы», «Структура материалов», «Режимные параметры»

Имя фрейма	Имя слота	Значение слота
Предметная область	Теплопроводность	(0,0317...0,0461) Вт/(м·К)
	Температуро-проводность	(3,93...4,61) м <sup>2</sup> /с
	Теплоёмкость	(0,84...1,42) кДж/(кг·К)
Исследуемые материалы	Плиты (изолайт, изовент, изофлор, изоруф, изофас)	$\lambda = (0,0317...0,0387)$ Вт/(м·К)
	Маты (п-75с, п-125с, м1-100, м2-100, м3-100)	$\lambda = (0,0347...0,0387)$ Вт/(м·К)
	Цилиндры (изошелл, изошелл Л, изошелл ЛМ)	$\lambda = (0,0387...0,0461)$ Вт/(м·К)
Структура материалов	Пористость	(80...90)%
	Волокнистость	(5...20) мкм
	Ячеистость	(0,068...0,17) мг/(м·ч·Па)
	Плотность	(50...175) кг/м <sup>3</sup>
Режимные параметры	$T_{ос.н} - T_{ос.в}$	(18,1800...20,7900) °С
	$V_{ос.н} - V_{ос.в}$	(48,4800...59,4000)%
	$C_n - C_v$	(70,7000...79,2000)%
	$W_{всс.н} - W_{всс.в}$	(20,2000...29,7000)%
	$C_{д.н} - C_{д.в}$	(4,0400...9,9000)%
	$C_{св.н} - C_{св.в}$	(2,0200...4,9500)%
	$P_{T_n} - P_{T_v}$	(1212...485) °С
$S_{ц.н} - S_{ц.в}$	(6060...6930) об/мин	

Фреймы включают в себя слоты, которые обозначаются именем и соответствующим значением. Числовые показатели значений фреймов-экземпляров берутся непосредственно от фреймов-образцов прямо из базы знаний посредством сообщения с оператором или специалистом, или же из передачи свойств от предыдущего фрейма-экземпляра. Информация о структуре системы хранится в БЗ в виде фрейма-образца (табл. 3.1 – 3.3). На их основании формируются фреймы-экземпляры, предназначенные для отражения фактических знаний, опираясь на поступающие знания. Представление информации осуществляется путём простого обозначения слотам фрейма возможных обычных ситуаций. В ходе процесса решения проблемы данные показатели значений подвергаются замене на более достоверные. Для некоторых значений (переменных) выделена функциональная возможность опроса пользователя. Некоторое количество переменных находится с помощью встроенных внутрь процедур.

### 3.2.2. ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БАЗЫ ЗНАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

В общем виде информационное обеспечение ИИИС можно представить в виде структурной схемы компонентов информационного обеспечения, представленной на рис. 3.15 [40].

Структурная схема отражает всю полноту и обширность информации, заложенной в базу знаний системы. Информационное обеспечение ИИИС ДК ТТМ содержит различные виды внутренней информации о функционировании системы, такой как информация о видах контроля и уровне пользователя системой; информацию о периодичности получения информации о ИО; о структуре обработки получаемой информации об объекте, сроках и видах представления результатов; информация о принимаемых решениях (для варианта допускового контроля и для реализации алгоритма функционирования); многочисленную информацию для пользователя: о программном и алгоритмическом обеспечении; также информация о видах и структурах контроля теплопроводности, о предметной области, методах контроля и информацию о метрологическом обеспечении.

На основе структурной схемы компонентов информационного обеспечения создаётся база знаний ИИИС ДК ТТМ.

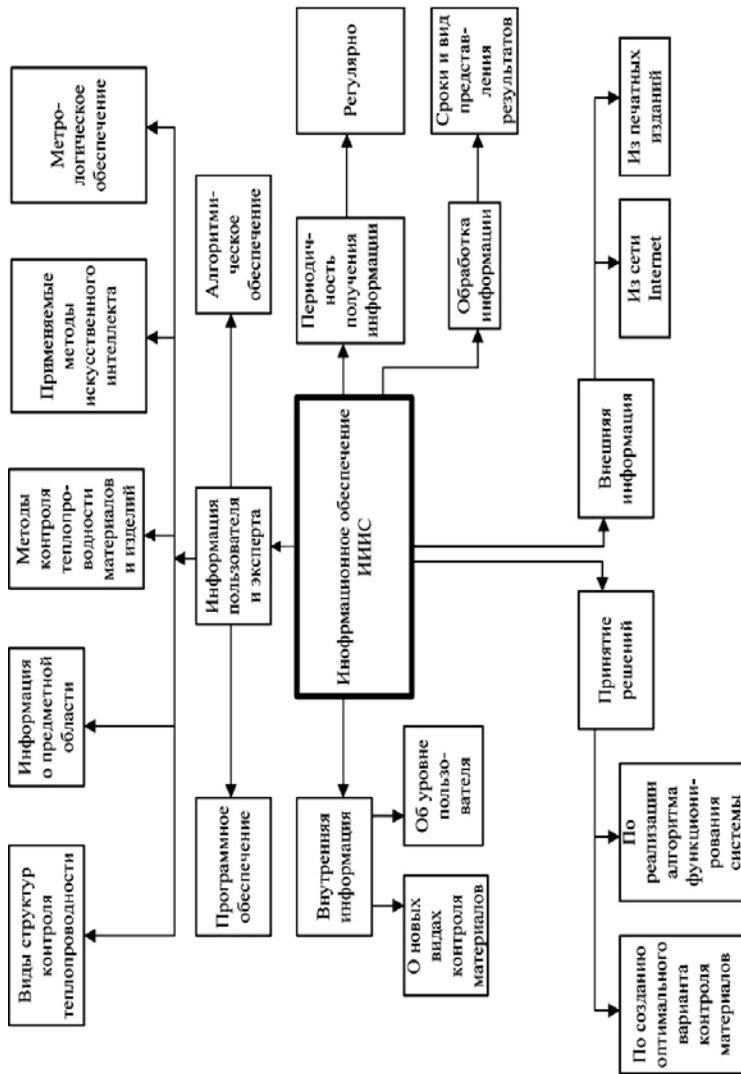


Рис. 3.15. Структурная схема компонентов информационного обеспечения ИИИС ДК ТТМ

### 3.2.3. БАЗА ЗНАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Важной составляющей информационной части ИИИС является база знаний, которая имеет организованное иерархическое структурирование и состоит из единой системы связанных между собой фреймов. Фреймы могут содержать как описательную информацию о том, что следует получить в качестве результата, так и процедурную, пошаговую информацию. Фреймы базы знаний содержат слоты, включающие не только конкретные значения, но и названия процедур, по которым возможно получить данное значение, следуя заданному алгоритму.

Информационное обеспечение ИИИС ДК ТТМ осуществляется с использованием созданной базы знаний и базы данных. В базе знаний хранятся процедурные правила в виде фреймов, используемые при реализации алгоритмического обеспечения ИИИС. Модель базы знаний в нотации *UML* выполнена с использованием платформы для моделирования *StarUML* (рис. 3.16). Программно база знаний представляет собой набор классов, созданных в среде визуального программирования *PIC C Compiler* на языке *C*.

Фреймы классов применяются при функционировании программных модулей системы. Модуль фиксации производственных параметров использует фрейм *fImProizvP*, содержащий фрейм, анализирующий параметры *fImAnalysisP*, который использует фреймы программного обеспечения *fImPO* и метрологического обеспечения *fImMO*, позволяющие точно и оперативно определить и проконтролировать измеренные параметры на производстве. Модуль режимных параметров *fImRP* используется для решения задач допускового контроля режимных параметров и содержит фреймы: температура ОС (*fImTemp*), влажность ОС (*fImWlag*), концентрация исходных компонентов (*fImConc*), концентрация связующего вещества (*fImConcSv*), концентрация модифицирующих добавок (*fImConcD*), степень термообработки (*fImTerm*), состав сырья (*fImSost*) и скорость центрифуги (*fImScorC*). Все эти фреймы позволяют своевременно и максимально точно охарактеризовать и сформировать подробную информацию о контролируемых режимных параметрах. Модуль форма материалов (*fImForm*) в зависимости от вида материала (плиты (*fImPL*), маты (*fImMat*), цилиндры (*fImCil*)) использует фрейм «Предметная область» (*fImPredmO*), включающий фрейм «Оптимального метода контроля (*fImMetod*)».

База данных необходима для хранения исходной информации и использования требующейся информацией о режимных параметрах при реализации адгоритма функционирования ИИИС. Информационная модель базы данных (БД) ИИИС в стандарте *IDEF1x* представлена на рис. 3.17. В процессе проектирования базы данных применялись модели, которые были созданы с использованием *CASE*-средства *Erwin 4.0* (*Computer Associates*).

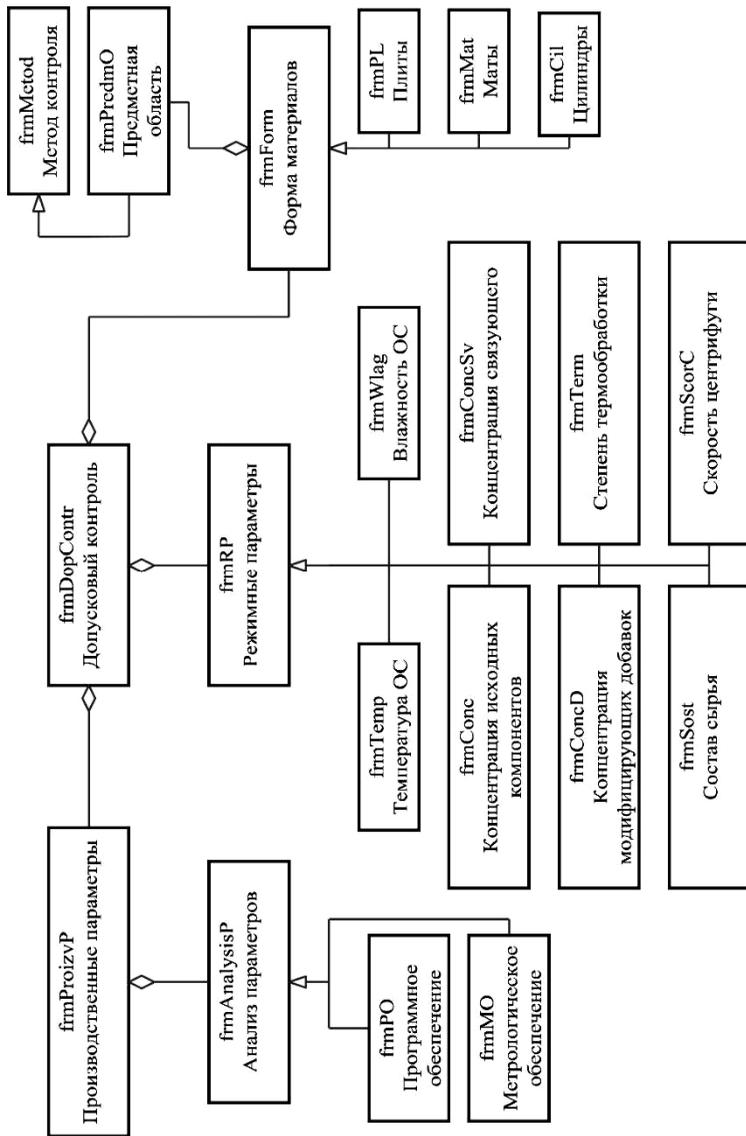


Рис. 3.16. Фреймовая модель представления знаний ИИИС ДК ТТМ

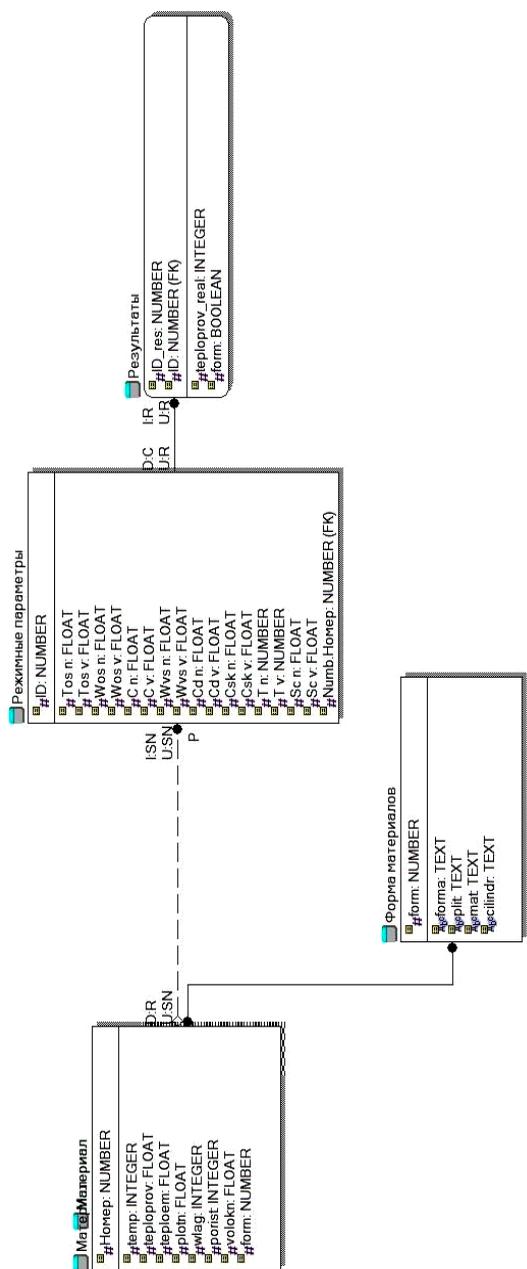


Рис. 3.17. Информационная модель базы данных ИИИС ДК ТТМ

Процесс накопления информации при формировании информационного обеспечения интеллектуальной системы контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов длительный, основывается на опыте и знаниях экспертов, квалифицированных пользователей, соответствующих технических средствах, участвующих в создании информационного обеспечения. Разработанное информационное обеспечение интеллектуальной системы контроля теплопроводности материалов на основе сбора, хранения, обработки и анализа информации позволяет принимать эффективные решения по извлечению требуемой информации при проектировании и эксплуатации интеллектуальной системы контроля теплопроводности материалов и изделий из них.

### **3.3. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Разработанный метод повышения точности допускового контроля теплопроводности и изготовления минераловатных плит в результате мониторинга параметров сырья, режимных параметров процесса технологического производства и технологического оснащения, коррекции управляемых и учёта неуправляемых параметров техпроцесса их изготовления реализован в созданной ИИИС ДК ТТМ, обеспечивающей относительную погрешность измерения теплопроводности минеральных ват не более 4%, что соответствует допустимым значениям точности информационно-измерительных систем для контроля качественных свойств исследуемых материалов.

Метрологический уровень ИИИС ДК ТТМ, точность и оперативность контроля обеспечивают необходимый уровень качества производимых теплоизоляционных материалов.

Теплопроводность теплоизоляционных материалов, в частности минераловатных плит, определяет их качество. В соответствии с ГОСТ 2.114–95 качество материалов находится в непосредственной зависимости от  $\lambda$ , считающейся одним из самых главных параметров, влияющих на теплофизические свойства. Применение ИИИС ДК ТТМ является эффективным направлением достижения их требуемого качества.

Основная задача мониторинга – обеспечение контроля РП техпроцесса производства минераловатных плит. На этапе производства происходит сбор информации, полученной при контроле сырьевой смеси, необходимой и достаточной для принятия мер к повышению качества минваты, а именно, получению минераловатных плит с заданной теплопроводностью  $\lambda$ . Из-за того что требуется обеспечить высокий уровень метрологического обеспечения ИИИС, осуществляющей

контроль режимных параметров, коррекцию оказываемого действия дестабилизирующих факторов на систему и технологический процесс, мониторинг РП производства минват для обеспечения точности технологического процесса их изготовления связан с большими трудностями. В результате измерения параметров, характеризующих качество производимых минераловатных плит, и на режимные параметры всех стадий технологического процесса, вносят погрешность дестабилизирующие факторы.

Режимными параметрами технологического процесса при производстве минват являются: концентрация модифицирующих добавок (водоотталкивающие и обеспыливающие), концентрация связующего компонента (для придания волокну требуемых плотности, прочности и толщины), концентрация исходных компонентов, влажность, фракционный и химический состав сырья, скорость вращения валков центрифуги (до 7000 об/мин), термообработка (при температуре от 1200 до 1500 °С).

Допусковый контроль режимных параметров технологического процесса изготовления минват с помощью ИИИС ДК ТТМ осуществляется на стадиях [41]: подачи исходных сырьевых компонентов горных пород габбро-базальтового типа (стадия А); подготовки исходного сырья; составления сырьевой смеси нужного минерального, фракционного состава, влажности (стадия В); получения расплава смеси (стадия С); получения минераловатного волокна (стадия Д); контроля режимных параметров  $РП_{T_{oc}}$ ,  $РП_{V_{oc}}$  (стадия Е); производства изделий из минераловатного волокна (стадия Ж); формирования минераловатных плит с заданной теплопроводностью  $P_{м.п}$  (стадия З).

Значительное улучшение характеристик производимых минераловатных плит можно достичь путём своевременного и точного допускового контроля режимных параметров на разных этапах технологического процесса производства. В результате допускового контроля режимных параметров на выходе технологического процесса изготавливаются минераловатные плиты с заданной теплопроводностью и требуемого качества.

На рисунке 3.18 показаны стадии технологического процесса изготовления минераловатных плит, на которых осуществляется допусковый контроль режимных параметров.

Разработана структурная схема ИИИС ДК ТТМ и алгоритм функционирования ИИИС, реализующий созданный метод повышения точности допускового контроля. Отличительными компонентами структурной схемы ИИИС являются: алгоритмическое обеспечение, блок мониторинга и допускового контроля, блок коррекции, база знаний и данных.

Структурная схема ИИИС допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов приведена на рис. 3.19.

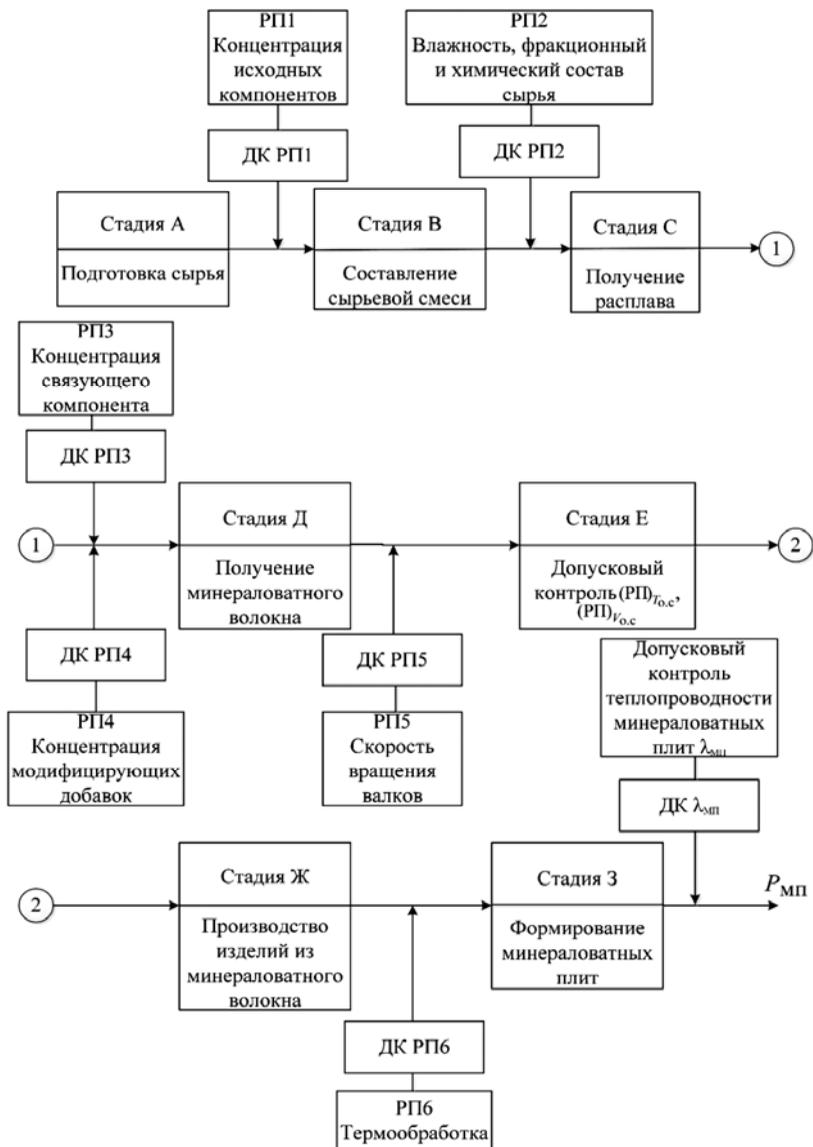


Рис. 3.18. Структурная схема мониторинга и допускового контроля режимных параметров технологического процесса производства минват

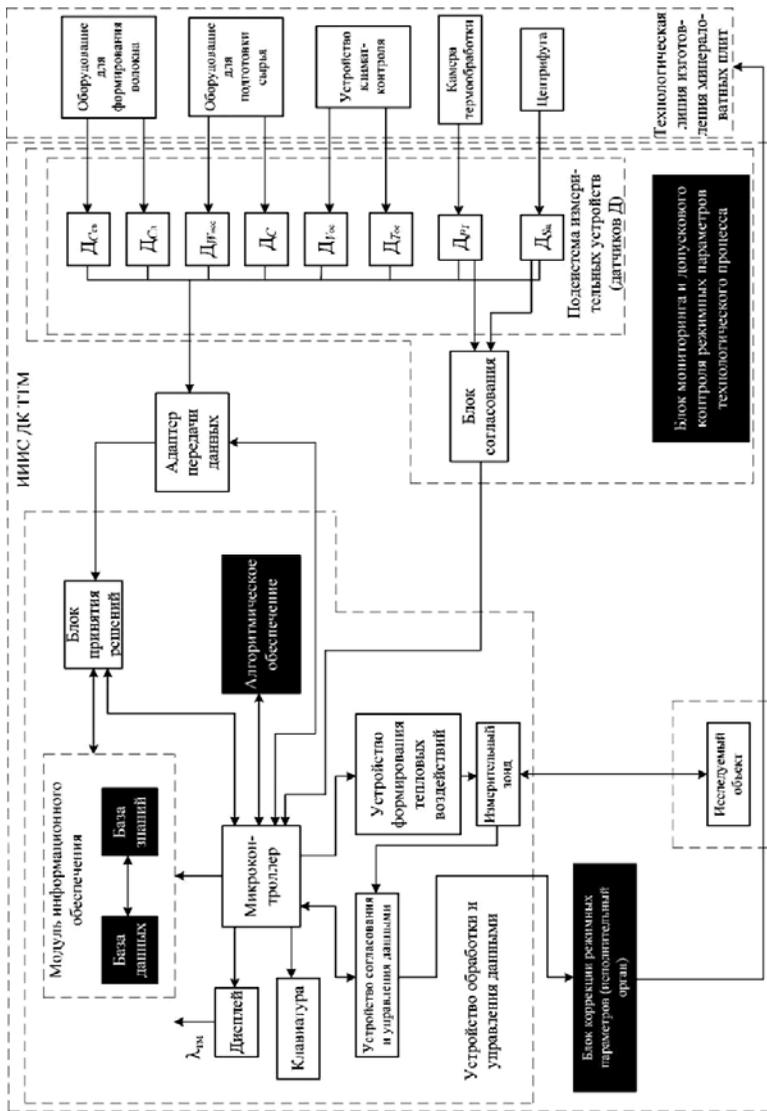


Рис. 3.19. Структурная схема ИИИС ДК ТТМ

Система ДК ТТМ содержит блок мониторинга и допускового контроля режимных параметров (БМДКРП), устройство обработки и управления данными (УОУД), адаптер передачи данных. Мониторинг режимных параметров осуществляется на стадиях технологического процесса, реализуемого в технологической линии изготовления минераловатных плит (ТЛИМП), в состав которой входят оборудование для подготовки сырья (ОПС), оборудование для формирования волокна (ОФВ), центрифуга, камера термообработки, устройство климат-контроля (УКК), а также получаемая на выходе продукция ( $P_{м.п}$ ) – минераловатные плиты (МП).

Блок мониторинга и допускового контроля режимных параметров содержит: измерительные устройства (ИУ), включающие датчики (Д), измеряющие температуру ( $T_{oc}$ ) и влажность ( $V_{oc}$ ) окружающей среды; концентрацию исходных компонентов (С); влажность, фрикционный и химический состав сырья ( $W_{всс}$ ); концентрацию связующего компонента ( $C_{св}$ ); концентрацию модифицирующих добавок ( $C_{д}$ ); скорость вращения валков центрифуги ( $S_{п}$ ) и значение температуры при термообработке ( $P_T$ ). Блок согласования (БС) предназначен для согласования уровня сигналов  $S_{п}$  и  $P_T$ , поступающих в микроконтроллер (МК). Устройство обработки и управления данными включает: микроконтроллер, модуль информационного обеспечения, содержащий базу данных и базу знаний, алгоритмическое обеспечение, блок принятия решений, измерительный зонд (ИЗ), устройство согласования и управления данными (УСИУД), устройство формирования тепловых воздействий (УФТВ), дисплей (D) и клавиатуру (Кл).

Обработка и передача данных от блока мониторинга и допускового контроля режимных параметров к устройству согласования и управления данными происходит в микроконтроллере, затем УСИУД воздействует на исполнительный орган, устанавливает режимные параметры технологического процесса, устройств и оборудования технологической линии производства минераловатных плит в соответствии с заданной областью их допустимых значений, определяемой экспертом-технологом.

Сигналы между блоком мониторинга и допускового контроля режимных параметров и входом микроконтроллера согласовывает адаптер передачи данных. На основе процедурных правил, хранящихся в базе знаний, блок принятия решений передаёт информацию в УСИУД, формирующее управляющие сигналы исполнительному органу. Исполнительный орган управляет режимными параметрами технологической линии, например, вносит изменения в процесс вытягивания

волокна и термообработку для получения минераловатных плит с требуемыми показателями качества.

Предложенная информационно-измерительная система является интеллектуальной, так как принимает решение в условиях неопределённости (неопределённость величин режимных параметров технологического процесса изготовления минераловатных плит и состава исходного сырья) для достижения поставленной цели – повышения качества выпускаемой продукции, т.е. обеспечения допустимой теплопроводности для каждого вида минераловатных плит.

Решение в ИИИС ДК ТТМ принимается БПР на основе созданной базы знаний и содержащихся в ней процедурных правил и функций принадлежности к зоне допуска режимных параметров сырья и аппроксимирующих зависимостей теплопроводности минераловатных плит от порога вхождения в зону их допуска.

В результате повышается точность технологического процесса и, следовательно, качество изготавливаемых минераловатных плит.

В ИИИС ДК ТТМ теплофизическое измерение осуществляется с использованием метода неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов, основанного на тепловом воздействии на поверхность объекта линейным нагревателем импульсами заданной частоты и мощности.

При проведении измерения измерительный зонд помещают на исследуемый материал. При этом температура  $T(x, z, \tau)$  в подложке термозонда при двумерном потоке тепла, вызванного действием мгновенного линейного источника тепла, определяется по соотношению [42]

$$T(x, z, \tau) = \frac{Q}{2\pi\lambda\tau} \exp\left[-\frac{x^2 + z^2}{4\alpha\tau}\right],$$

где  $\tau$  – время;  $x, z$  – координаты точки контроля температуры;  $Q$  – мощность теплового воздействия.

Температуру  $T(x, z, \tau)$  в точках контроля  $x, z$  при подаче  $n$ -го импульса при частотно-импульсном воздействии на исследуемый материал рассчитывают по формуле

$$T(x, z, \tau) = \frac{QF}{4\pi\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left[-\frac{x^2 + z^2}{4\alpha\Delta t i}\right],$$

где  $F$  – частота тепловых импульсов;  $\Delta t$  – интервал времени между тепловыми импульсами.

При этом определяется момент времени, когда величина контролируемых перепадов температур  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  внутри подложки станет меньше наперед заданного значения  $\varepsilon$ , т.е.

$$\max \{ \Delta T_1, \Delta T_2 \} < \varepsilon.$$

Значение  $\varepsilon$  задаётся обычно не выше 0,2...0,3 °С, что позволяет считать наступление момента уравнивания (усреднения) температуры по всему объёму подложки. Измерительный зонд приводят в контакт со следующим исследуемым материалом для проведения очередного измерения.

При этом в системе «Термозонд – исследуемый материал» происходит два тепловых процесса. Первый процесс – соответствие граничным условиям четвёртого рода, т.е. теплообмену при контакте двух тел, температура одного из которых (подложки термозонда) выше другого. Так как относительная температура одинакова, то при этом на границе контакта этих двух тел температура устанавливается после контакта тел и остаётся постоянной на протяжении всего процесса теплообмена [34]:

$$\Theta(0, \tau) = \Theta(x, \infty) = \frac{K_3}{1 + K_3} = \text{const},$$

где  $K_3$  – критерий, характеризующий тепловую активность первого

тела по отношению ко второму,  $K_3 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}$ , здесь  $\lambda$ ,  $a$  – коэффициенты тепло- и температуропроводности подложки;  $\tau$  – время;  $x$  – координата точки контроля температуры.

Второй тепловой процесс вызван действием импульсного источника тепла, помещённого в плоскости контакта двух тел.

Температурное поле в каждой точке контактной поверхности будет определяться действием двух тепловых процессов в соответствии с принципом суперпозиции:

$$T(x, \tau) = T_n(x, \tau) + T_H(x, \tau),$$

где  $T_n$  – температура, обусловленная действием остаточного тепла, аккумулированного в подложке термозонда от предыдущего измерения;  $T_H$  – температура, обусловленная действием импульсного источника тепла.

В применяемом методе необходимым условием начала следующего измерения является температурное уравнивание (усреднение) в объёме подложки, которое наступает для большинства применяемых

для подложки теплоизоляционных материалов за 2–3 мин. Таким образом, применяемый метод характеризуется высокой оперативностью измерений.

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\lambda$  рассчитываются по следующим соотношениям:

$$\alpha = K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_p}{T_m}\right);$$

$$\lambda = \frac{1}{T_m} K_3 \ln(K_4 \alpha);$$

$$T_p = T(x, p);$$

$$T_m = T(x, m),$$

где  $K_1, K_2, K_3, K_4$  – константы, определяемые при градуировке ИИИС ДК ТТМ;  $p, m$  – точки контроля температуры.

Проведены экспериментальные исследования теплопроводности минераловатных плит при мониторинге и допусковом контроле режимных параметров технологического процесса изготовления минераловатных плит с использованием ИИИС. Результаты исследований представлены в табл. 3.5, где введены следующие обозначения:  $\lambda_{эт}$  – эталонные значения теплопроводности;  $\lambda_{мп.д}$  – коэффициент теплопроводности, определяемый при допусковом контроле;  $\delta_{д.к}$  – относительная погрешность при допусковом контроле режимных параметров;  $\lambda_{мп}$  – коэффициент теплопроводности, определяемый без допускового контроля;  $\delta$  – относительная погрешность, определяемая без допускового контроля режимных параметров.

### 3.5. Результаты экспериментальных исследований теплоизоляционных материалов

Исследуемые материалы	$\lambda_{эт}$ , Вт/(М·К)	$\lambda_{мп.д.к}$ , Вт/(М·К)	$\delta_{д.к}$ , %	$\lambda_{мп}$ , Вт/(М·К)	$\delta$ , %
Рипор	0,028	0,0282	0,7143	0,0251	10,3571
Гераклит	0,035	0,0348	0,5714	0,0317	9,4286
Изолайт	0,032	0,0323	0,9375	0,0286	10,6251
Изорурф	0,034	0,0338	0,5882	0,0308	9,4118
Изорурф-В	0,035	0,0352	0,5714	0,0311	11,1428
Изофас-ЛМ	0,039	0,0394	1,0256	0,0353	9,487210
Полиметилметакрилат	0,195	0,1941	0,4615	0,1750	0,2564

Как показывают результаты экспериментальных исследований, позволяет осуществлять выпуск продукции с теплопроводностью, соответствующей нормативным технологическим требованиям, а также снижать относительную погрешность определения теплопроводности минераловатных плит до 15%, по сравнению с выпуском продукции без мониторинга и допускового контроля режимных параметров, именно мониторинг режимных параметров технологического процесса изготовления минераловатных плит.

### **3.4. СИСТЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

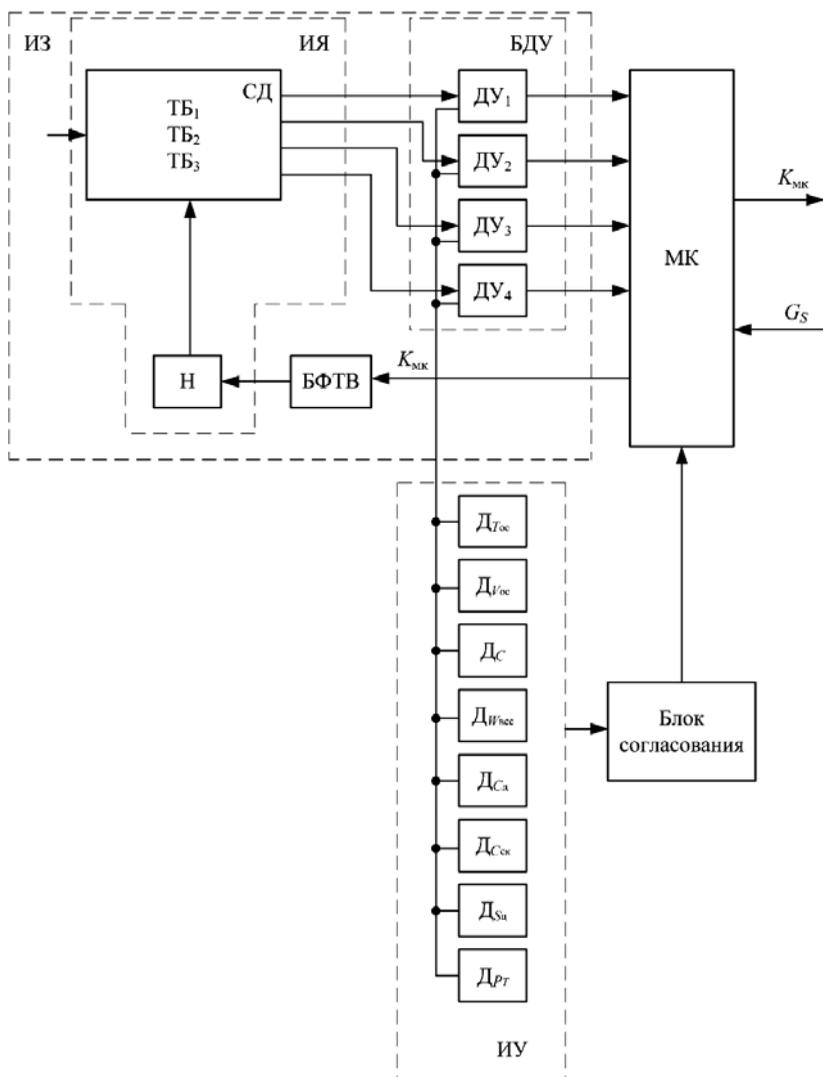
В состав ИИИС ДК ТТМ входит подсистема измерительных устройств, в которую входят измерительный зонд и измерительные устройства.

Разработан измерительный зонд (ИЗ), позволяющий повысить точность и оперативность контроля режимных параметров и качественных свойств теплоизоляционных материалов. Зонд выполняет следующие процедуры и функции: формирование теплового воздействия на исследуемый материал, коэффициента усиления усилителя и мощности теплового действия, определение среднеинтегрального значения температуры, коррекцию воздействия температуры окружающей среды на результаты измерения.

Структурная схема ИЗ представлена на рис. 3.20.

В состав зонда входят: измерительная ячейка (ИЯ), включающая систему датчиков температуры (СД) и нагреватель (Н), блок дифференциальных усилителей (БДУ), состоящий из усилителей ( $ДУ_1 - ДУ_4$ ). Система датчиков содержит три термобатареи (ТБ<sub>1</sub>, ТБ<sub>2</sub>, ТБ<sub>3</sub>), включающие термодатчики. Измерительные устройства (ИУ) содержат датчики температуры окружающей среды ( $Д_{T_{oc}}$ ), влажности окружающей среды ( $Д_{V_{oc}}$ ), концентрации исходного сырья ( $Д_C$ ), влажности, фракционного и химического состава сырья ( $Д_{W_{вс}}$ ), концентрации модифицирующих добавок ( $Д_{C_d}$ ), концентрации связующего компонента ( $Д_{C_{с.к}}$ ), скорости вращения валков центрифуги ( $Д_{S_{ц}}$ ), уровня термообработки ( $Д_{P_T}$ ).

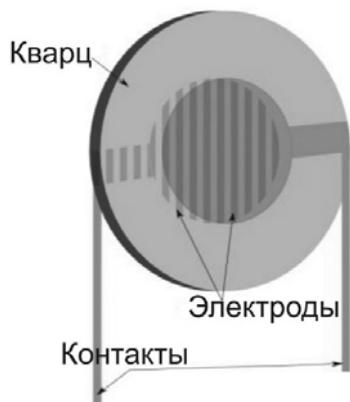
Датчики, используемые для измерения температуры и влажности окружающей среды, – датчики типа *SHT21*. Это цифровые датчики влажности со встроенными датчиками температуры. Точность измерения влажности  $\pm 2\%$ , точность измерения температуры  $\pm 0,3$  К, диапазон рабочих температур  $-40...+125$  °С, корпус DFN.



**Рис. 3.20. Структурная схема подсистемы измерительных устройств**

Датчики измерения температуры уровня термообработки используются платина-родиевые типа *ТЕ-ВК-15* с возможностью работы при температуре до +1800 °С, длиной 500 мм, *S*-типа с классом точности 1 в защитном чехле.

Для измерения концентрации исходного сырья, концентрации модифицирующих добавок и концентрации связующего компонента применяются пьезосорбционные (рис. 3.21) и полупроводниковые датчики (рис. 3.22) АнаСОНТ, которые фиксируют или вещества соответствующего химического состава, или же химические реакции. Цель этих датчиков – это фиксация и вычисление количества химических реагентов в жидкой и газовой фазах.



**Рис. 3.21. Пьезосорбционные химические датчики (жидкая фаза)**



**Рис. 3.22. Полупроводниковые химические датчики (газовая фаза)**

Технические характеристики датчиков: диапазон измерения 1...2000  $\mu\text{S}/\text{см}$ ; диапазон измерения температуры:  $-50...+130\text{ }^\circ\text{C}$ ; точность прибора зависит от типа применяемого пробника: 0,1% от измеряемого диапазона +1 единица младшего разряда, либо 3% (max 5%) от измеряемого диапазона +1 единица младшего разряда, температура  $-\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$  +1 единица младшего разряда; питание прибора: 12...36 В постоянное, гальванически изолированное; материал прибора: РР, с покрытием PVDF, нержавеющая сталь +РР; механическая защита: корпус – IP67; электрическая защищённость: класс 3.

При измерении скорости вращения валков центрифуги используются компактные датчики типа *DI504A*,  $M30\times 1,5$ , *DC PNP*, сертификат *ATEX*, группа II, категория 3D, расстояние срабатывания 10 мм с защитным кожухом 7 мм. Простая система обработка угловых и линейных перемещений для мониторинга пороговых значений с возможностью блокировки.

### **3.5. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

ИИИС ДК ТТМ осуществляет обработку температурно-временных функций и вычисление параметров качественных свойств исследуемых теплоизоляционных материалов, регистрацию результатов и условий выполнения измерений, мониторинг и допусковый контроль режимных параметров производства материалов, с адаптацией системы под различные виды материалов.

Система оснащена специальным контроллером, обеспечивающим автоматическое управление процессом измерения и вычислительной обработки полученной измерительной информации.

Разработанная ИИИС ДК ТТМ обладает высокими технологическими, эксплуатационными и эргономическими характеристиками (оперативность и точность измерений, устойчивость к воздействию дестабилизирующим факторам, неразрушающий контроль, низкая погрешность измерений (2...3%), широкий комплекс контролируемых параметров). Решает следующие задачи: преобразование электрических параметров в электрические сигналы с помощью датчиков и аналого-цифрового преобразования, предварительную обработку результатов в реальном времени, формирование массивов данных, последующую обработку полученных массивов данных, формирование сигналов управления и контроля по результатам первичной и вторичной обработки информации, допусковый контроль контролируемых режимных параметров и коррекцию технологического процесса в целях получения материалов требуемого качества, отображение результатов обработки на экране дисплея ИИИС.

Основным показателем эффективности информационно-измерительных систем для определения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов являются показатели точности и оперативности измерения свойств. В разработанной ИИИС ДК ТТМ повышение эффективности достигается за счёт точного допускового контроля режимных параметров ещё на этапе производства теплоизоляционных материалов, также за счёт учёта влияния воздействующих дестабилизирующих факторов как контролируемых, так и неконтролируемых и прогнозирования погрешностей измерений и производства материалов.

Функциональна схема предлагаемой ИИИС ДК ТТМ представлена на рис. 3.23.

На рисунке 3.23 введены следующие обозначения:

–  $G_{УКК}$ ,  $G_{ОПС}$ ,  $G_{ОФВ}$ ,  $G_{Ц}$ ,  $G_{КТ}$  – сигналы с устройства климат-контроля, оборудования для подготовки сырья, оборудования для формирования волокна, центрифуги и камеры термообработки соответственно, обозначающие реальные значения контролируемых режимных параметров ТЛИМП;

–  $G_{Д_{T_{oc}}}$ ,  $G_{Д_{V_{oc}}}$ ,  $G_{Д_C}$ ,  $G_{Д_{W_{всс}}}$ ,  $G_{Д_{C_{св}}}$ ,  $G_{Д_{C_{д}}}$ ,  $G_{Д_{S_{ц}}}$ ,  $G_{Д_{P_T}}$  – информационные сигналы с датчиков контроля температуры и влажности окружающей среды, концентрации исходных компонентов, влажности, фрикционного и химического состава сырья, концентрации связующего компонента, концентрации модифицирующих добавок, скорости вращения валков центрифуги и значения температуры при термообработке соответственно;

–  $K_{МК}$  – сигнал контроля с микроконтроллера;  $G_P$  – информационный сигнал о состоянии режимных параметров;  $G_S$  – согласующий сигнал;  $G_R$  – регулирующий сигнал;  $G_K$  – контролирующий сигнал;  $U_S$  – управляющий сигнал;  $I_{БЗ}$  – информационный сигнал с базы знаний;  $I_{БД}$  – информационный сигнал с базы данных.

Алгоритм функционирования интеллектуальной информационно-измерительной системы осуществляется следующими блоками и устройствами: устройством обработки и управления информацией, в состав которого входят устройство согласования и управления данными, микроконтроллер, база данных, база знаний, блок принятия решений, измерительный зонд, дисплей и клавиатура; блоком мониторинга и допускового контроля режимных параметров, содержащим датчики, измеряющие управляемые и неуправляемые режимные параметры, блок согласования, предназначенный для согласования уровня сигналов, поступающих в микроконтроллер; адаптером передачи данных.

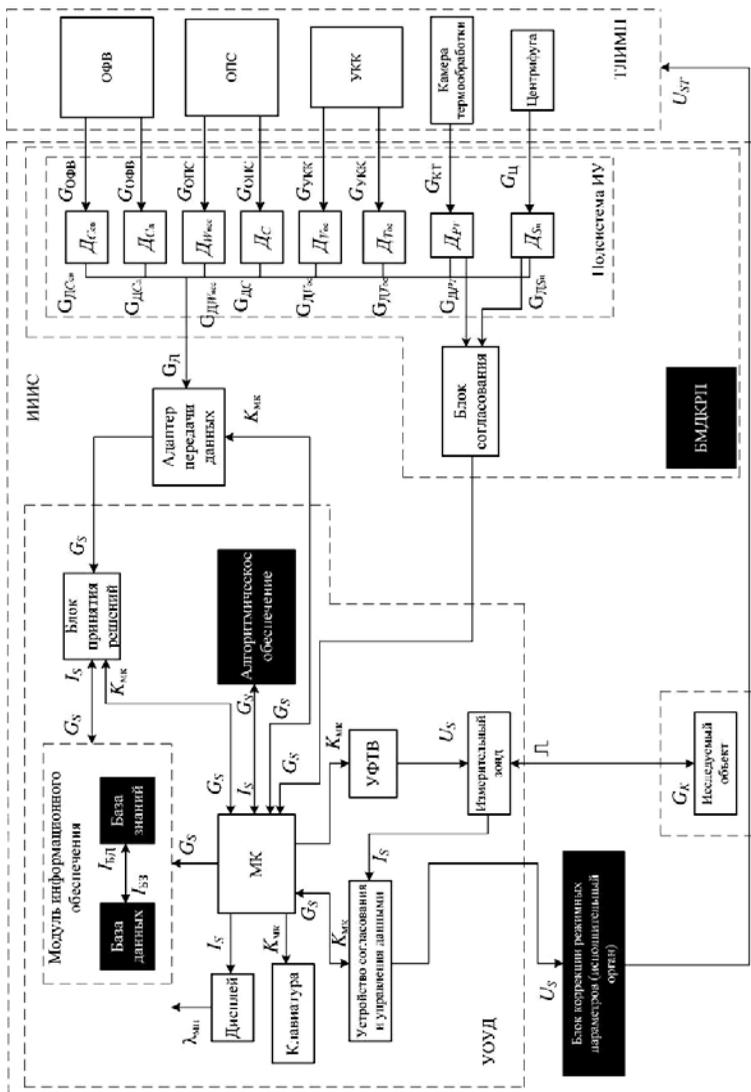


Рис. 3.23. Функциональная схема ИИИС ДК ТТМ

Непосредственно теплофизическое измерение осуществляет измерительный зонд, основная функция которого определение среднеинтегрального значения температуры с помощью термодатчиков на основе дифференциальных термопар, распределённых по всему объёму подложки зонда, в плоскости контакта зонда и исследуемого материала. Одной из основных функций зонда является устранение влияния температуры окружающей среды на результаты измерения.

При выполнении измерений используется метод неразрушающего контроля, принцип которого заключается в тепловом воздействии линейного нагревателя в плоскости контакта на поверхность исследуемого материала импульсами заданной частоты и мощности.

По измерительной термограмме при известной заданной средней мощности теплового воздействия вычисляется теплопроводность материала. При этом учитывается влияние воздействующих дестабилизирующих факторов, оказывающих влияние на результат измерения.

База знаний включает в себя информацию об исследуемых теплоизоляционных материалах, допустимых значениях контролируемых режимных параметров, разработанных процедурных правилах для принятия решений при определении допустимых режимных параметров, методах и алгоритмах измерений, аппроксимирующих функциях зависимости теплопроводности материалов от различных факторов. Основные информационные сведения в базе знаний представлены в виде фреймов.

Блок принятия решений осуществляет процедуру оценки измерительной ситуации и на основе информации с блока мониторинга и допускового контроля принимает решение о необходимости коррекции режимных параметров технологического процесса при воздействующих факторах на основе процедурных правил и передаёт информацию в устройство согласования и управления данными, которое формирует управляющие сигналы исполнительному органу. Исполнительный орган осуществляет коррекцию режимных параметров технологической линии изготовления минераловатных плит.

Тепловые импульсы заданной частоты, мощности и интервала следования поступают на измерительный зонд, осуществляющий непосредственно контроль качественных показателей теплоизоляционных материалов. Информация с термодатчиков о температурном поле в плоскости контакта измерительного зонда и исследуемого материала поступает на устройство согласования и управления данными и затем – в микроконтроллер.

В микроконтроллере в соответствии с заданной математической моделью теплофизического измерения, расчётными зависимостями

определения параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов происходит их расчёт. Затем проводится анализ полученных значений режимных параметров и параметров теплофизических свойств материалов, сравнение их с допустимыми показателями погрешности для конкретного теплоизоляционного материала, коррекция на воздействие ДФ.

### 3.6. АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Предлагается блок-схема алгоритма реализации допускового контроля режимных параметров, приведённая на рис. 3.24, при использовании разработанного метода повышения точности допускового контроля [43].

Теплофизическое измерение по определению параметров ИМ  $P_\lambda$  с помощью ИИИС ДК ТТМ начинается с идентификации состояния ИМ  $U_{\text{ИЮ}}$ . В БЗ ИИИС пользователем заносится априорная информация о ИМ: сведения о допустимой мощности теплового воздействия  $q$ , ДФ  $D$ , и определяется соответствие  $S \in S_m$  (множество структур ТМ).

Проводится измерительная процедура (ИП) 1, заключающаяся в тепловом воздействии на ИМ и снятии тестовой термограммы. По тестовой термограмме определяется первичная измерительная информация о ИМ, воздействующих ДФ и формируется измерительная ситуация.

Для выполнения ИП1 следует обращение 1 к БЗ за информацией о режимных параметрах теплофизического измерения для предполагаемого класса ИМ:  $q$  и  $K$  ( $K$  – коэффициенты усиления усилителя ИИИС), и определяется их отношение к области допустимых значений.

При коррекции ТП на воздействие ДФ выполняется обращение 2 к БЗ, где в памяти МК2 записаны зависимости  $\lambda = f(T_{\text{ос}})$  и  $\lambda = f(W)$ .

В результате идентификации состояния ИМ осуществляется определение параметров ИМ интеллектуальной информационно-измерительной системой.

Проверка адекватности разработанной математической модели допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов ( $\lambda_{\text{ТМ}} = f(x_{\text{и}}, x_{\text{ГБП}}, Q_{\text{и}}, D_m, V_{\text{ИИИС}})$ ) выполнена с использованием имитационного моделирования в среде MATLAB. Результаты моделирования подтверждают соответствие математической модели допускового контроля ТМ реальным исследуемым теплоизоляционным материалам.

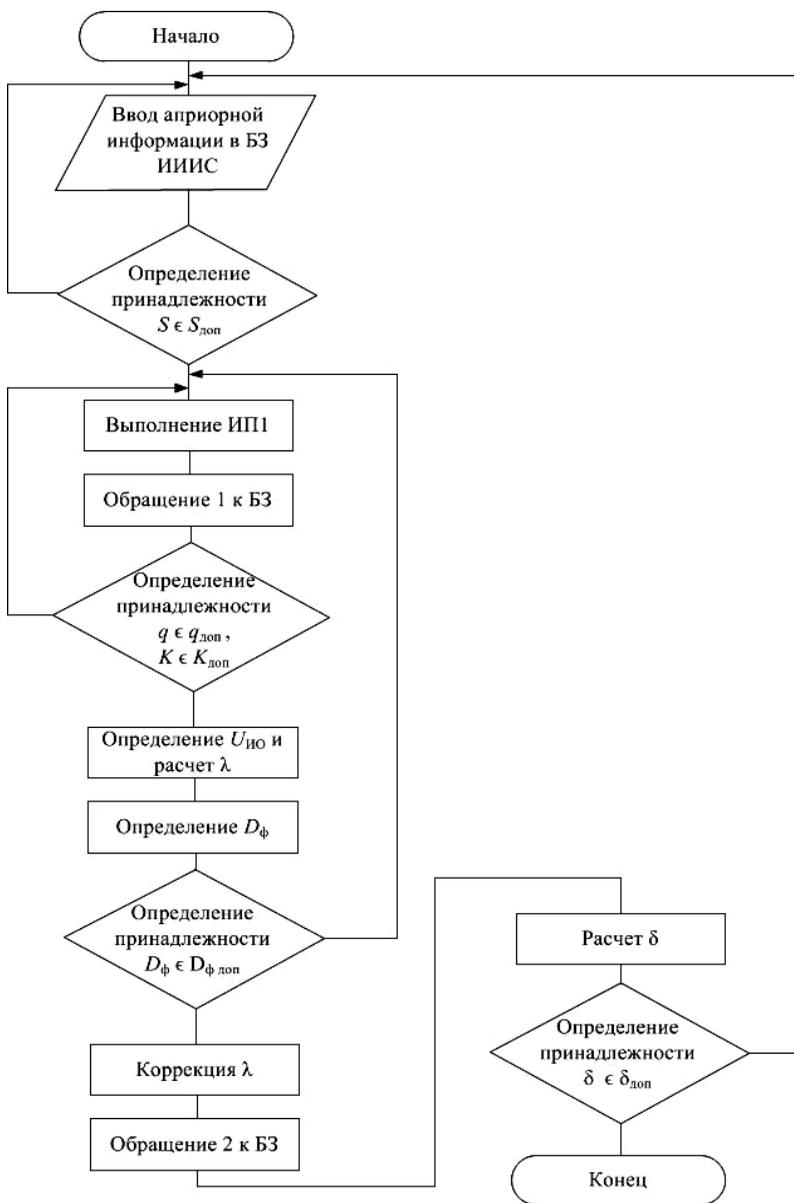


Рис. 3.24. Блок-схема алгоритма реализации допускового контроля режимных параметров и сырья при определении теплопроводности материалов

ИИИС ДК ТТМ реализует интеллектуальные функции по выбору режимных параметров техпроцесса изготовления минераловатных плит с заданной теплопроводностью, обладает возможностью осуществить взаимодействия ИМ с системой, а именно, способностью коррекции показателей контролируемых параметров при воздействии дестабилизирующих факторов, что позволяет повысить качество производимых минват на 10...15%, как показывают результаты экспериментальных исследований.

ИИИС обладает способностью решать плохо формализуемые задачи, в частности задачи, требующие наличия в течение технологического процесса изготовления минераловатных плит реализации алгоритма принятия решения в зависимости от конкретной ситуации, для которой характерны динамичность и неопределённость.

Для принятия решений при определении допустимых режимных параметров в целях повышения точности технологического процесса на основе разработанных процедурных правил для базы знаний ИИИС используются результаты мониторинга режимных параметров технологического процесса производства минераловатных плит:

ЕСЛИ  $T_{oc} \in T_{oc} (181800 \dots 20,7900) \text{ } ^\circ\text{C}$ , ТО (РП) $_{T_{oc}} \in (\text{РП})_{T_{oc,доп}}$  ;  
 ЕСЛИ  $V_{oc} \in V_{oc} (48,4800 \dots 59,4000)\%$ , ТО (РП) $_{V_{oc}} \in (\text{РП})_{V_{oc,доп}}$  ;  
 ЕСЛИ  $C \in C (70,7000 \dots 80,0800)\%$ , ТО (РП) $_C \in (\text{РП})_{C,доп}$  ;  
 ЕСЛИ  $W_{всс} \in W_{всс} (20,2000 \dots 29,7000)\%$ , ТО (РП) $_{W_{всс}} \in (\text{РП})_{W_{всс,доп}}$  ;  
 ЕСЛИ  $C_{св} \in C_{св} (2,0200 \dots 4,9500)\%$ , ТО (РП) $_{C_{св}} \in (\text{РП})_{C_{св,доп}}$  ;  
 ЕСЛИ  $C_{д} \in C_{д} (4,0400 \dots 9,9000)\%$ , ТО (РП) $_{C_{д}} \in (\text{РП})_{C_{д,доп}}$  ;  
 ЕСЛИ  $S_{ц} \in S_{ц} (6060 \dots 6930) \text{ об/мин}$ , ТО (РП) $_{S_{ц}} \in (\text{РП})_{S_{ц,доп}}$  ;  
 ЕСЛИ  $P_T \in P_T (1212 \dots 1485) \text{ } ^\circ\text{C}$ , ТО (РП) $_{P_T} \in (\text{РП})_{P_{T,доп}}$  .

На рисунке 3.25 представлен алгоритм функционирования разработанной ИИИС ДК ТТМ [44].

Сначала происходит сравнение чисел с реальными допустимыми значениями для каждого контролируемого режимного параметра (всё это отображается на дисплее ИИИС). Далее реализуется алгоритм мониторинга и допускового контроля режимных параметров. Конечным режимным параметром является уровень термообработки  $P_T$ .

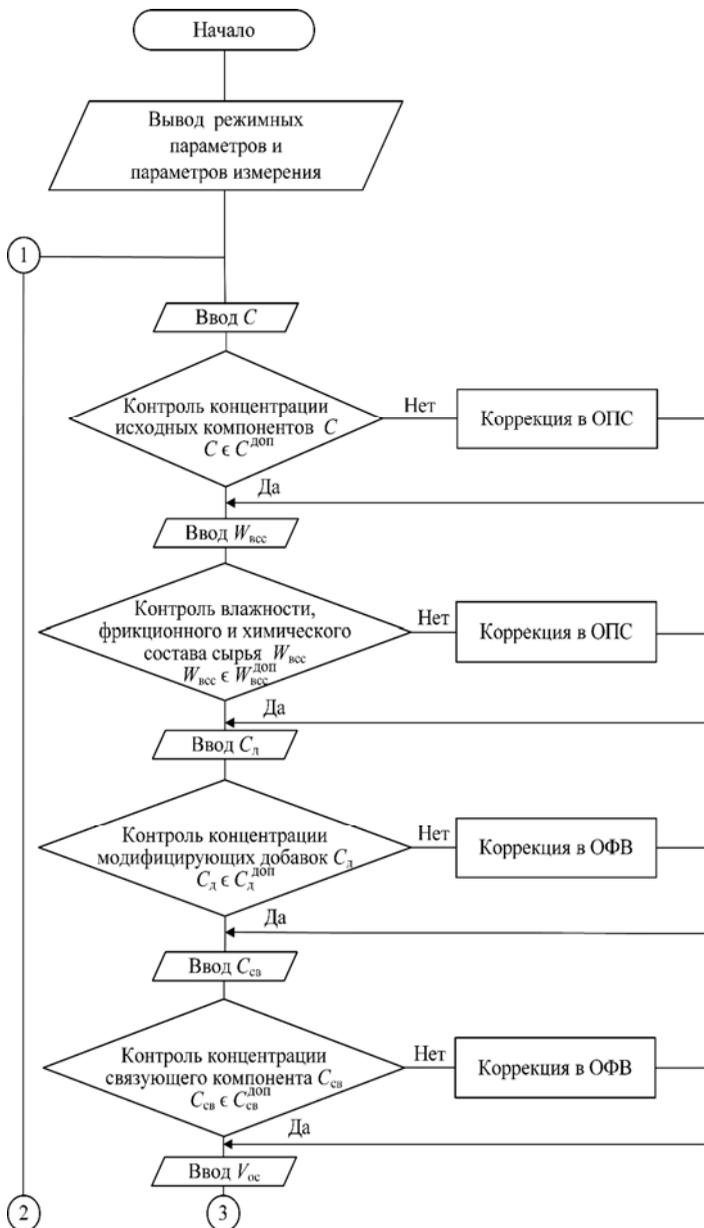


Рис. 3.25. Блок-схема алгоритма функционирования ИИИС ДК ТТМ

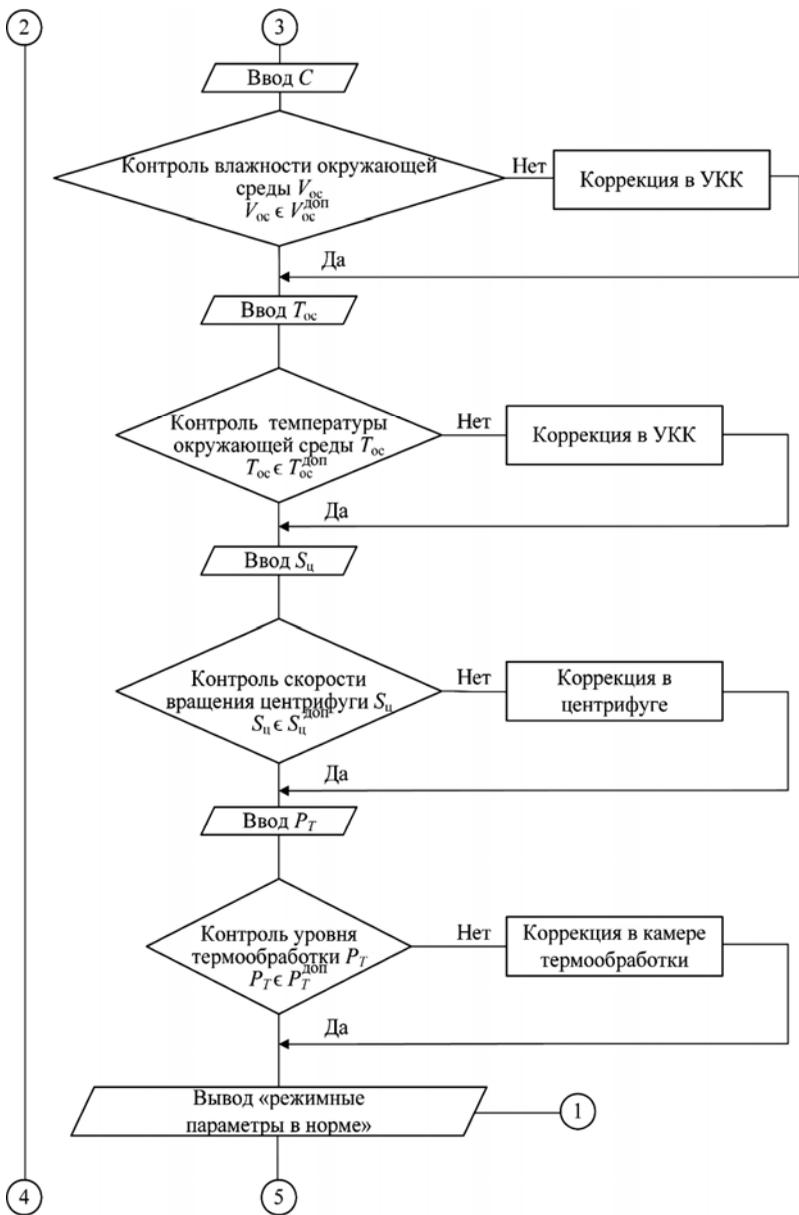


Рис. 3.25 (продолжение)

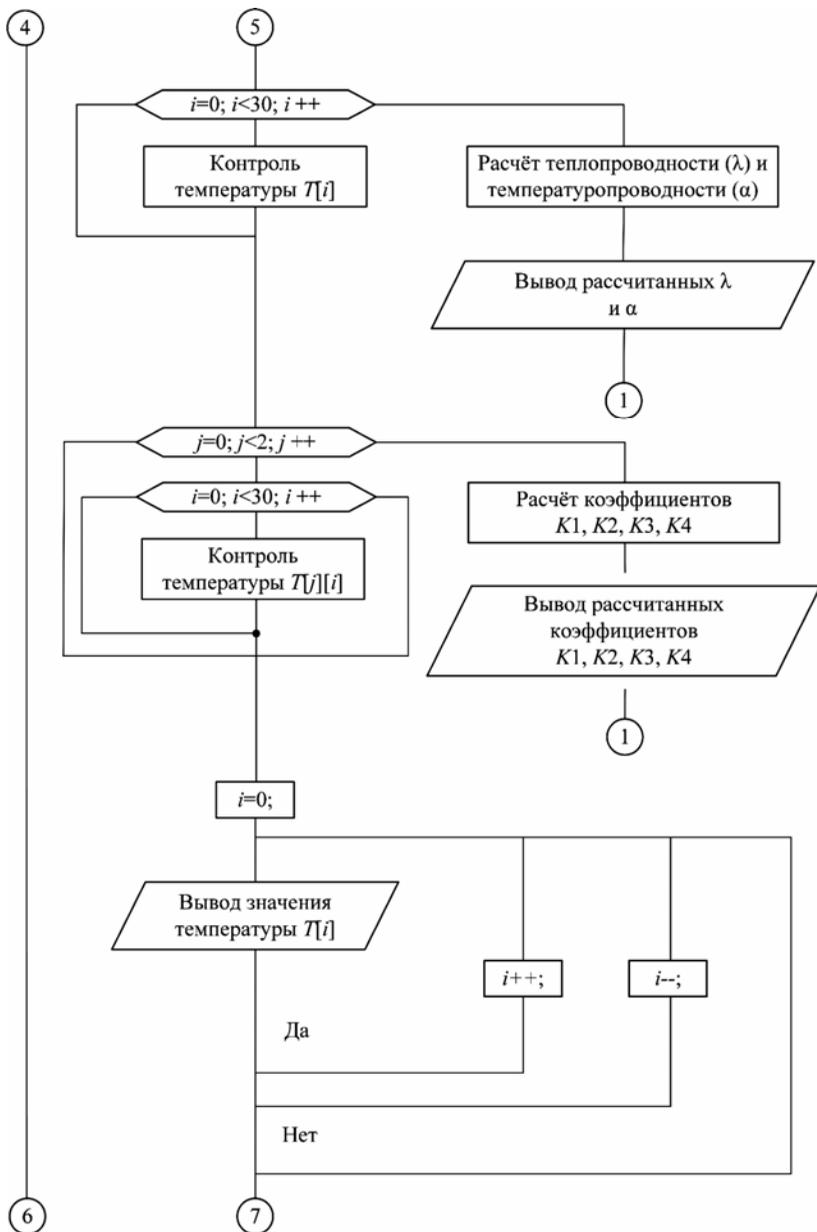


Рис. 3.25 (продолжение)

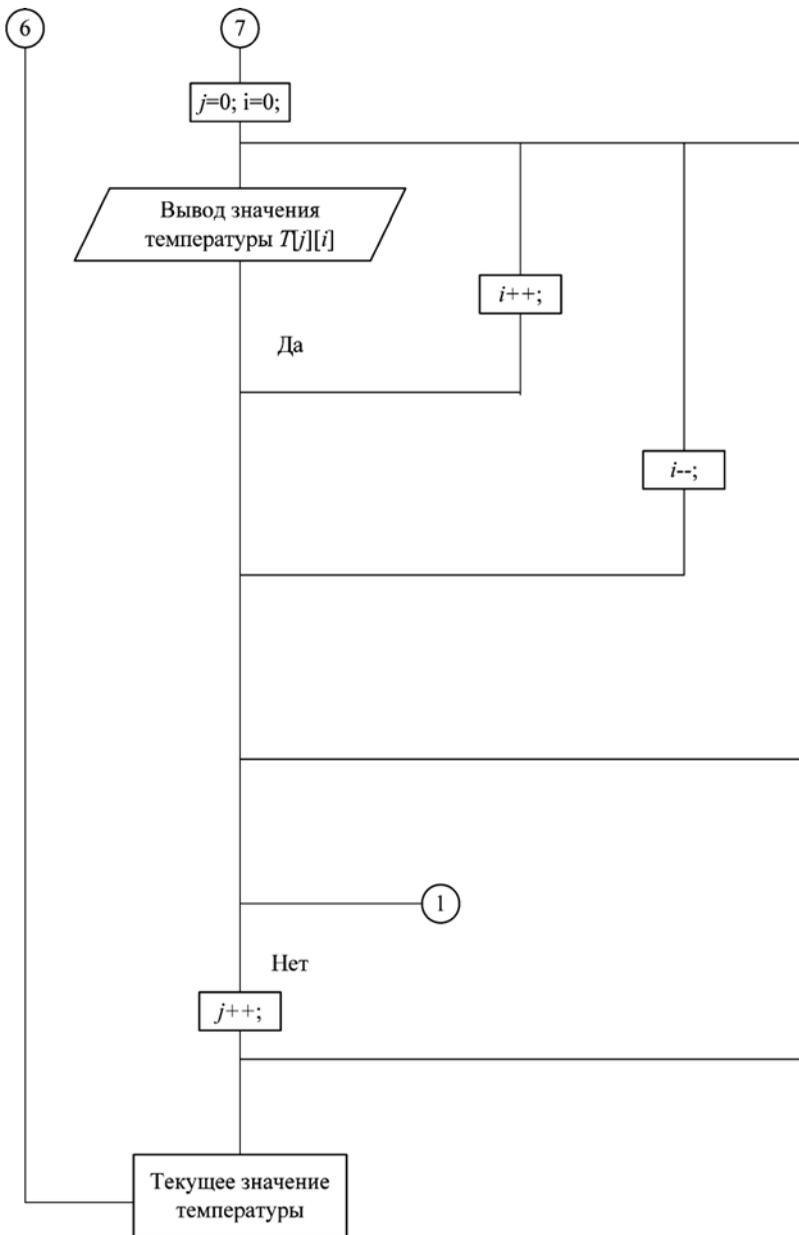


Рис. 3.25 (окончание)

Если  $P_T \in P_{T_{\text{доп}}}$ , то контроль режимных параметров закончен (индикация на дисплее «режимные параметры в норме»). Если нет, то происходит коррекция параметра в камере термообработки и весь материал отправляется заново на переработку. Затем осуществляется контроль температуры ( $T$ ) в области контакта измерительного зонда и исследуемого материала (индикация на дисплее ИИИС).

В дальнейшем сравнивается  $T(x_n, \tau_i)$  с  $\epsilon_{\text{зад}}$ , где  $x_n$  – расстояние от датчика температуры до нагревателя,  $\tau_i$  – текущее время,  $\epsilon_{\text{зад}}$  – заданное пороговое значение температуры. Если  $T > \epsilon_{\text{зад}}$ , то продолжается контроль  $T$ . Если  $T \leq \epsilon_{\text{зад}}$ , то измерительный зонд помещают на исследуемый материал. Потом осуществляется тепловое воздействие на исследуемый материал с помощью линейного нагревателя при подаче на него импульсов нагрева заданной мощности (процесс нагрева индицируется на дисплее ИИИС). Одновременно происходит регистрация и запись в память микроконтроллера термограммы по данным датчиков температуры в области измерения (в области контакта измерительного зонда и исследуемого материала). Затем отключаются подаваемые импульсы нагрева на исследуемый материал. Записываются в память контролируемые информационные параметры температур  $T_n(x_i, \tau_i)$  и  $T_m(x_i, \tau_i)$ .

Осуществляется расчёт по температурно-временным характеристикам  $T_n(x_i, \tau_i)$ ,  $T_m(x_i, \tau_i)$  параметров теплофизических свойств материалов – коэффициентов теплопроводности ( $\lambda$ ) и температуропроводности ( $\alpha$ ) (индикация  $\lambda$  и  $\alpha$  на дисплее ИИИС). Рассчитывается относительная погрешность ( $\delta$ ) определения  $\lambda$  и  $\alpha$  (индикация значений  $\delta_\lambda$ ,  $\delta_\alpha$  осуществляется на дисплее ИИИС). После чего пользователем ИИИС вводится значение плотности ( $\rho$ ) для исследуемого материала. Рассчитывается теплоёмкость ( $C$ ) (индикация на дисплее ИИИС).

Рассчитывается математическое ожидание ( $M$ ) (индикация на дисплее ИИИС). Происходит расчёт среднеквадратической погрешности ( $\sigma$ ) (индикация на дисплее ИИИС). И в финальной стадии осуществляется расчёт предельных абсолютной и относительной погрешностей  $\lambda$  и  $\alpha$  ( $\Delta_{\text{пред}} \lambda_j$ ,  $\Delta_{\text{пред}} \alpha_j$ ) (индикация на дисплее ИИИС).

Вся информация о значениях допуска для каждого параметра и расчётные формулы для нахождения различных показателей хранятся в базе знаний ИИИС. Таким образом, в результате использования ИИИС осуществляется мониторинг и контроль основных режимных параметров, оказывающих влияние на итоговые значения теплопроводности и качества производимых материалов, происходит измерение основных теплофизических показателей и осуществляется расчёт абсолютных и относительных погрешностей измерения.

К выходным параметрам, обуславливающим точность определения  $\lambda$ , относятся: потери точности и оперативности, погрешность измерения при контроле теплопроводности.

Следовательно, обеспечение повышения качества и изготовления минераловатных плит с теплопроводностью, соответствующей нормативным требованиям на основе повышения точности технологического процесса, позволяет осуществить мониторинг режимных параметров на стадиях технологической линии изготовления минераловатных плит с помощью разработанных интеллектуальной информационно-измерительной системы и алгоритма её функционирования.

Осуществлены экспериментальные исследования теплоизоляционных материалов с применением ИИИС ДК ТТМ. На рисунке 3.26 представлены термограммы теплоизоляционных материалов с различными значениями  $\lambda$ , которые определяются с использованием ИИИС. Время  $\tau_{уст}$  достижения установившегося теплового режима в области контакта измерительного зонда ИИИС и исследуемого материала существенно зависит от  $\lambda$  и тем больше, чем меньше  $\lambda$  материала. Следовательно, при работе с исследуемыми материалами данного класса нецелесообразно в ИИИС задавать одно фиксированное время, например для рипора  $\tau_{уст,р} = 140$  с (это соответствует подаче  $n_p$  тепловых импульсов).

В качестве показателя точности  $\Pi_T$  будем использовать погрешность измерений, а показателем оперативности  $\Pi_{оп}$  будет служить время измерения  $\lambda$ . Функциональные зависимости этих потерь от  $\tau_{уст}$  должны учитывать применяемый метод контроля  $\lambda$  материалов и влияние дестабилизирующих факторов, т.е.

$$\begin{aligned}\Pi_T &= f_T(\tau_{уст}, M, O, D_f); \\ \Pi_{оп} &= f_{оп}(\tau_{уст}, M),\end{aligned}$$

где  $M$  – множество используемых в ИИИС методов контроля  $\lambda$ , которые введены в базу знаний ИИИС ДК ТТМ;  $O$  – множество исследуемых материалов;  $D_f$  – множество дестабилизирующих факторов.

Для каждого метода и исследуемого материала существует некоторое значение  $\tau_{уст}$ , при котором критерий, комплексно учитывающий потери точности и оперативности, минимален. Для определения оптимального значения  $\tau_{уст}^*$  введём критерий оптимальности, комплексно учитывающий потери точности и оперативности, т.е.

$$J(\tau_{уст}, M, O) = [C_1 \Pi_T(\tau_{уст}, M, O, D_f) + C_2 \Pi_{оп}(\tau_{уст}, M)] \rightarrow \min_{\tau_{уст} M},$$

где  $C_1, C_2$  – весовые коэффициенты.

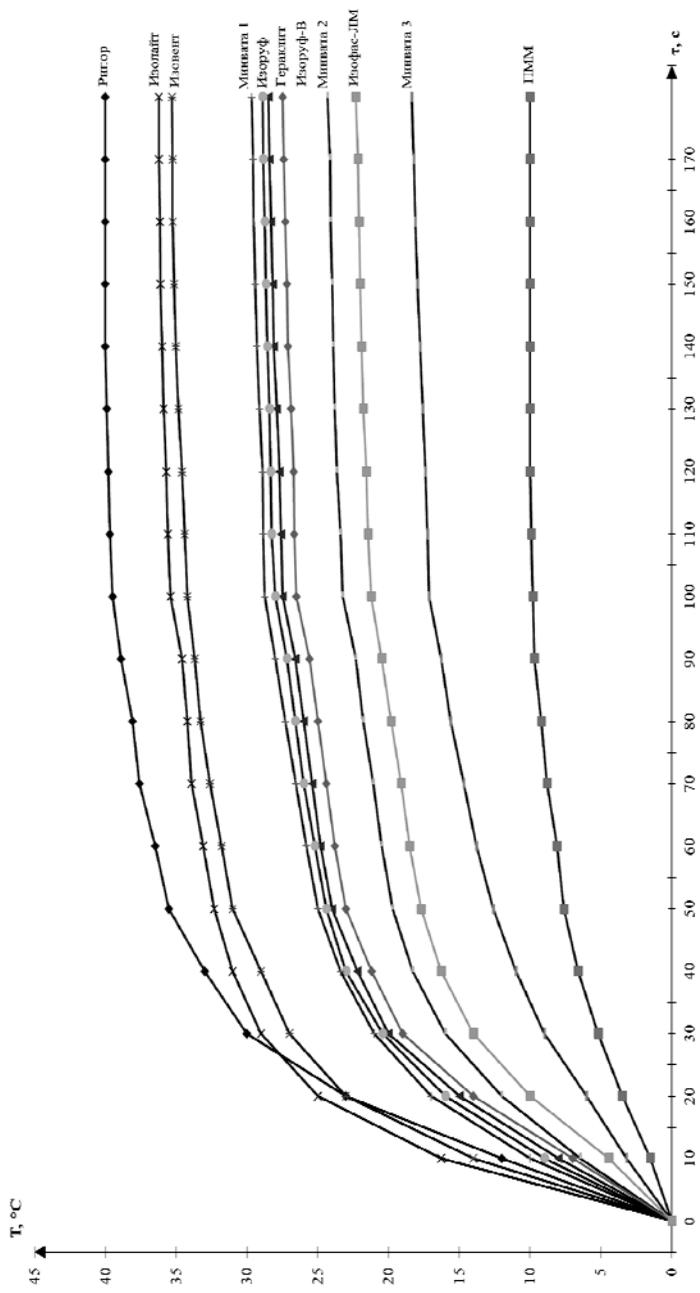


Рис. 3.26. Термограммы исследуемых материалов

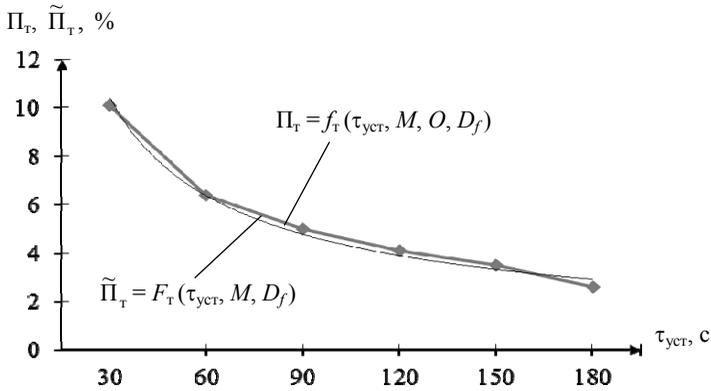


Рис. 3.27. Графики зависимостей  $\Pi_T = f_T(\tau_{уст}, M, O, D_f)$  и аппроксимирующей функции  $\tilde{\Pi}_T = F_T(\tau_{уст}, M, D_f) = 10,459 \tau_{уст}^{-0,713}$

Изменение критерия  $J(\tau_{уст}, O)$  при  $C_1 = C_2 = 1$  для зависимостей потерь,  $\Pi_T$  и  $\Pi_{оп}$ , показано на рис. 3.27, 3.28 оптимальное время достижения установившегося теплового режима в данном случае равно 105 с.

В таблице 3.6. приведены результаты экспериментальных исследований минеральных ват и других теплоизоляционных материалов, а также потерь точности и оперативности при оценке качества продукции при производстве минераловатных плит с использованием разработанной аналитической модели [45].

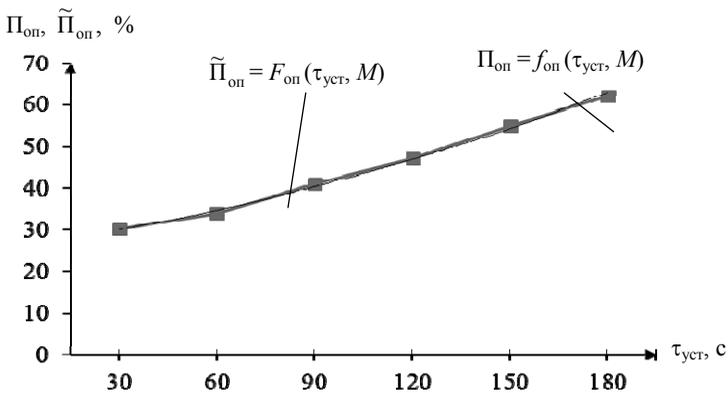


Рис. 3.28. Графики зависимостей  $\Pi_{оп} = f_{оп}(\tau_{уст}, M)$  и аппроксимирующей функции  $\tilde{\Pi}_{оп} = F_{оп}(\tau_{уст}, M) = 25,791 e^{0,1488 \cdot \tau_{уст}}$

### 3.6. Результаты экспериментальных исследований минеральных ват

Исследуемые минваты	$\lambda_{\text{эт}}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\lambda_{\text{изм}}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\delta, \%$	$\Pi_{\text{T}}, \%$	$\Pi_{\text{оп}}, \%$
Рипор	0,028	0,0282	0,714	7,012	18,23
Гераклит	0,035	0,0348	0,571	6,010	16,21
Изолайт	0,032	0,0323	0,937	2,311	11,11
Изоруф	0,034	0,0337	0,882	2,242	11,22
Изоруф-В	0,035	0,0347	0,857	2,713	12,11
Изофас-ЛМ	0,039	0,0394	1,025	5,422	15,23

Графическое представление вышеуказанных функций для рассмотренного метода и исследуемого материала – ПММ приведено на рис. 3.29 для усреднённых значений  $\lambda$  и при дестабилизирующих факторах, характерных для условий лабораторных испытаний. Аналогичные зависимости имеют место для других материалов и методов при установлении их теплопроводности в лабораториях.

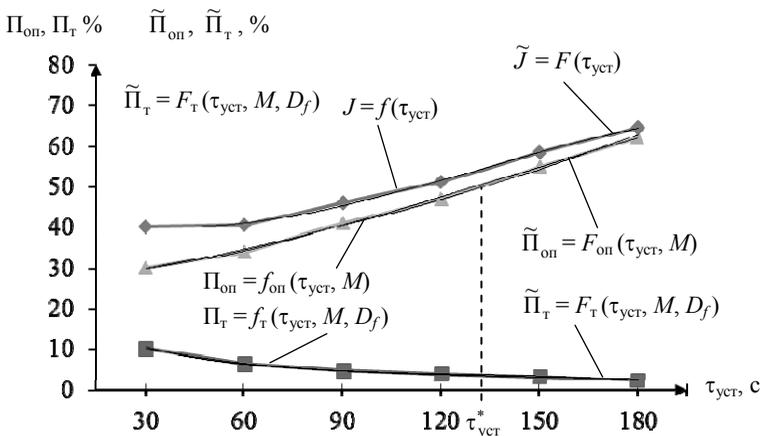


Рис. 3.29. Графики зависимостей  $J = f(\tau_{\text{уст}}, O_{\text{ПММ}})$  и аппроксимирующие зависимости

Аппроксимирующие зависимости потерь точности и оперативности имеют следующий вид:

$$\tilde{\Pi}_T = F_T(\tau_{уст}, M, D_f) = -(0,1255)\tau_{уст}^3 + 1,6236\tau_{уст}^2 - 7,4652\tau_{уст} + 16,007;$$

$$\tilde{\Pi}_{оп} = F_{оп}(\tau_{уст}, M) = -(0,1019)\tau_{уст}^3 + (1,4087 \cdot 10^{-4})\tau_{уст}^2 - 0,9392\tau_{уст} + 276,667;$$

$$\tilde{J} = F(\tau_{уст}) = -(0,2273)\tau_{уст}^3 + 3,0323\tau_{уст}^2 - 6,5261\tau_{уст} + 43,673.$$

Прирост показателей точности ( $\Delta_{П_T}$ ), определяется исходя из того, что до использования метода потери точности  $\Pi_T$  составляли в среднем 10%.  $\Delta_{П_{оп}}$  определяется с учётом того, что  $\Pi_{оп}$  без применения метода повышения точности допускового контроля были равны 50%.

Результаты экспериментальных исследований минеральных ват и других теплоизоляционных материалов, а также прирост показателей точности ( $\Delta_{П_T}$ ) и оперативности ( $\Delta_{П_{оп}}$ ) при оценке качества продукции при производстве минераловатных плит с использованием разработанного метода повышения точности допускового контроля приведены в табл. 3.7.

### 3.7. Результаты экспериментальных исследований показателей точности и оперативности минеральных ват

Исследуемые минеральные ваты	$\lambda_{эТ}$ , Вт/(м·К)	$\lambda_{изм}$ , Вт/(м·К)	$\delta$ , %	$\Delta_{П_T}$ , %	$\Delta_{П_{оп}}$ , %
Рипор	0,028	0,0283	1,071	2,987	31,76
Гераклит	0,035	0,0345	1,471	3,989	33,78
Изолайт	0,032	0,0323	0,938	7,688	38,88
Изовент	0,032	0,0315	1,563	3,112	33,11
Изоруф	0,034	0,0347	2,059	7,758	38,78
Минвата 1	0,033	0,0324	1,818	1,901	38,91
Минвата 2	0,037	0,0364	1,623	1,623	36,98
Минвата 3	0,04	0,0410	2,512	2,512	34,96
Изоруф-В	0,035	0,036	1,765	7,287	37,89
Изофас-ЛМ	0,039	0,0397	1,795	4,578	34,76
ПММ	0,195	0,1943	0,359	8,488	39,66

Применение метода повышения точности допускового контроля и реализующей его ИИИС позволяет повысить оперативность (в среднем прирост оперативности  $\Delta_{\text{П.оп}}$  составил 36%) и точность (в среднем увеличение  $\Delta_{\text{П.т}} = 6\%$ ) неразрушающего контроля теплофизических свойств теплоизоляционных материалов.

### **3.7. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Наиболее существенными процессами, оказывающими значительное влияние на показатели выпускаемых теплоизоляционных материалов, являются измерение и контроль качества данных материалов. Эти два процесса очень важны и являются крайне важными при производстве. Лишь обеспечив требуемый высокий уровень точности измерения и контроля с применением ИИИС, можно в итоге получить материалы надлежащего качества.

Одним из основных показателей, характеризующих качество итогов измерений, является погрешность измерений. Численное значение погрешности зависит от многих факторов, влияющих на процесс измерения: неправильная дозировка и подготовка сырья, несовершенство контроля режимных параметров технологического процесса изготовления материалов, воздействие дестабилизирующих факторов на процесс изготовления и измерения, технического несовершенства компонентов ИИИС и т.д. Большинство этих факторов носят случайный характер, в связи с чем является невозможным полное устранение их влияния на погрешность.

Метрологический уровень мониторинга и допускового контроля режимных параметров с помощью ИИИС зависит, в первую очередь, от характеристик самой системы, таких характеристик, по которым можно судить о пригодности системы для проведения измерений и контроля теплофизических свойств теплоизоляционных материалов в заданном диапазоне и с требуемой точностью.

Погрешности, возникающие в процессе мониторинга и допускового контроля, условно можно разделить на три группы:

- погрешности подготовки сырьевого материала;
- погрешности технологического процесса производства;
- погрешности измерений, вызванные несовершенством структуры и компонентов ИИИС.

Погрешности технологического процесса производства могут возникать по двум причинам:

- отклонение от допустимых значений контролируемых режимных параметров;
- воздействие дестабилизирующих факторов.

Погрешности, вносимые воздействующими дестабилизирующими факторами в первую очередь определяются колебаниями температуры и влажности окружающей среды. В целях снижения составляющих этих погрешностей применяют термостатированные кабины, материалы при испытаниях устанавливаются на специальные паллеты в кабинах, в кабинах поддерживается термостатное состояние при помощи кондиционирования и системы вентиляции, применяются не прямые источники света, а пользуются рассеянным или отражённым (так как ИИИС не должна подвергаться воздействию прямого солнечного света). Для нормализации уровня влажности в помещениях устанавливаются системы увлажнения воздуха. Таким образом, нормализуя микроклимат в производственных помещениях, можно добиться значительного снижения погрешностей, вносимых воздействующими дестабилизирующими факторами.

Одной из важных задач метрологического анализа является снижение погрешностей структуры ИИИС, таких как термическое сопротивление в месте контакта зонда и исследуемого объекта, погрешности датчиков, входящих в состав измерительного устройства.

Погрешность химических датчиков, применяемых в системе, характеризуется в первую очередь химическим загрязнением датчиков. В процессе измерения происходит осаждение на поверхности чувствительных элементов, что приводит к изменению их массы и, как следствие, уходу от калибровочных параметров и искажению показаний. Для предотвращения процесса химического загрязнения датчиков в них встраивают специальные фильтры, задерживающие ненужные вещества, не оказывая при этом никакого влияния на исследуемые компоненты.

Многочисленные сигналы поступают на аналогово-цифровые входы микроконтроллера. Точность аналого-цифрового преобразования зависит в первую очередь от погрешности преобразования применяемого АЦП.

Определение границ допуска производится с некоторой погрешностью, которая оценивается по составляющим, считающимися элементарными систематическими погрешностями. Элементарные систе-

математические погрешности можно считать случайными величинами и обрабатывать с применением математической статистики. Из всех возможных распределений погрешностей следует выбирать наилучшее в целях исключения внесения существенной ошибки в получаемые результаты.

Для оценки приведённой погрешности относительной влажности окружающей среды за верхнюю границу примем  $Q_N^{K_{oc}} = 100\%$ , за абсолютную погрешность  $\Delta_{V_{oc}} = \pm 0,5\%$ , тогда

$$\gamma_{V_{oc}} = \frac{\Delta_{V_{oc}}}{Q_N^{K_{oc}}} = \frac{0,5}{100} = 0,005 \text{ или } 0,5\%.$$

Для оценки приведённой погрешности температуры окружающей среды примем арифметическую сумму двух верхних значений, тогда  $Q_N^{T_{oc}} = 18 + 21 = 39 \text{ }^\circ\text{C}$ , за абсолютную погрешность  $\Delta_{T_{oc}} = \pm 0,5\%$ , тогда

$$\gamma_{T_{oc}} = \frac{\Delta_{T_{oc}}}{Q_N^{T_{oc}}} = \frac{0,5}{39} = 0,013 \text{ или } 1,3\%.$$

Для оценки приведённой погрешности температуры уровня термообработки примем арифметическую сумму двух верхних значений, тогда  $Q_N^{P_T} = 1200 + 1500 = 2700 \text{ }^\circ\text{C}$ , за абсолютную погрешность  $\Delta_{P_T} = \pm 1\%$ , тогда

$$\gamma_T = \frac{\Delta_{P_T}}{Q_N^{P_T}} = \frac{1}{2700} = 0,0003 \text{ или } 0,03\%.$$

Для оценки приведённой погрешности измерений концентрации (газообразная форма) за верхнюю границу примем  $Q_N^C = 100\%$ , за абсолютную погрешность  $\Delta_{C_{oc}} = \pm 1\%$ , тогда

$$\gamma_C = \frac{\Delta_{C_{oc}}}{Q_N^C} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ или } 1\%.$$

Для оценки приведённой погрешности измерений концентрации (жидкая форма) за верхнюю границу примем  $Q_N^W = 90\%$ , за абсолютную погрешность  $\Delta_W = \pm 1\%$ , тогда

$$\gamma_W = \frac{\Delta_W}{Q_N^W} = \frac{1}{90} = 0,011 \text{ или } 1,1\%.$$

Для оценки приведённой погрешности измерений скорости вращения центрифуги за верхнюю границу примем  $Q_N^S = 7000$  об/мин, за абсолютную погрешность –  $\Delta_S = \pm 1\%$ , тогда

$$\gamma_S = \frac{\Delta_S}{Q_N^S} = \frac{1}{7000} = 0,000143 \text{ или } 1,014\%.$$

Сигналы измерений с преобразователей поступают на входы аналогово-цифровых преобразователей микроконтроллера. Для преобразования измеряемых величин применяется 12-разрядный АЦП. Для используемого в ИИИС АЦП номинальная суммарная некомпенсированная погрешность составляет  $\pm 3$  единицы младшего значащего разряда (МРЗ). Погрешность для 1МРЗ вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{2^N} \cdot 100\%,$$

где  $N$  – разрядность АЦП.

Следовательно, погрешность в 1МРЗ для АЦП применяемого в ИИИС

$$\varepsilon = \frac{1}{2^{12}} \cdot 100\% = \frac{1}{4096} \cdot 100\% = 0,0244\%.$$

Таким образом, максимальная некомпенсированная погрешность для данного АЦП составит 0,07%.

Нахождение пределов осуществляется с систематической погрешностью, которая оценивается по составляющим, называемым элементарными систематическими погрешностями.

При равномерном законе распределения систематических погрешностей их сумма равна

$$\delta_c = \sum_{i=1}^n \delta_{ci},$$

где  $\delta_{ci}$  – граница  $i$ -й составляющей систематической ошибки.

Погрешность определения  $\lambda$  теплоизоляционных материалов будет складываться из следующих составляющих:

- погрешность определения влажности окружающей среды;
- погрешность определения температуры окружающей среды;
- погрешность определения температуры уровня термообработки;
- погрешность определения концентрации сырья;
- погрешность определения концентрации минераловатного материала;
- погрешность определения скорости вращения валков центрифуги.

Тогда с учётом определённых приведённых погрешностей результат измерения теплопроводности будет иметь максимальную систематическую постоянную погрешность каждой из составляющих проведения измерений:

$$\begin{aligned}\delta_c &= \delta_{cV_{oc}} + \delta_{cT_{oc}} + \delta_{cP_T} + \delta_{cC} + \delta_{cW} + \delta_{cS} + \delta_{cАЦП} = \\ &= 0,5 + 1,3 + 0,03 + 1 + 1,1 + 0,024 + 0,07 = 4,012.\end{aligned}$$

В целях уменьшения влияния случайных погрешностей проводится выборка результатов измерений. Обработка результатов измерений проводится с использованием известного алгоритма:

1. Рассчитывают значение математического ожидания для каждой составляющей погрешности:

$$M_X = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i}{n} = 136,5 \text{ (для } T_{oc}\text{)}.$$

2. Рассчитывают оценки случайной погрешности среднего арифметического значения результата измерений:

$$\theta_\varphi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_i - M_X)^2}{n(n-1)}} = 30,5.$$

3. Задают уровень доверительной вероятности, число степеней свободы и определяют значение коэффициента Стьюдента. В случае с температурой окружающей среды коэффициент Стьюдента  $t_\varepsilon = 1,96$  при числе степеней свободы 5 и доверительной вероятности 0,95.

4. Рассчитывают доверительный интервал  $M_\varphi - t_\varepsilon \theta_\varphi \leq \varphi \leq M_\varphi + t_\varepsilon \theta_\varphi$ , определяющий возможные границы изменения результатов эксперимента с учётом случайной погрешности. В данном случае доверительный интервал равен  $136,4989 \leq \varphi \leq 136,5011$ .

5. Вычисляют значение относительной случайной погрешности по формуле

$$\delta_{\text{сл}_{T_{\text{oc}}}} = \frac{t_{\varepsilon} \theta_{\Phi}}{M_X} = 0,44.$$

6. Аналогично находят значения относительной случайной погрешности, соблюдая вышеуказанный алгоритм, для всех составляющих погрешности:  $\delta_{\text{сл}_{V_{\text{oc}}}} = 0,42$ ;  $\delta_{\text{сл}_{P_T}} = 0,4$ ;  $\delta_{\text{сл}_C} = 0,45$ ;  $\delta_{\text{сл}_W} = 0,41$ ;  $\delta_{\text{сл}_S} = 0,43$ .

Полная погрешность измерения с учётом систематической и случайной составляющих определяется по формуле

$$\delta_{\Sigma} = \pm \sqrt{\delta_{\text{сл}_{T_{\text{oc}}}}^2 + \delta_{\text{сл}_{V_{\text{oc}}}}^2 + \delta_{\text{сл}_{P_T}}^2 + \delta_{\text{сл}_C}^2 + \delta_{\text{сл}_W}^2 + \delta_{\text{сл}_S}^2 + \delta_{\text{с}}^2} = 4,083\%.$$

Данные о погрешности измерений коэффициентов теплопроводности теплоизоляционных материалов представлены в табл. 3.8.

### 3.8. Показатели теплопроводности и погрешностей измерения теплофизических материалов

Исследуемые теплофизические материалы	Эталонные значения $\lambda_{\text{эт}}$ , Вт/(м·К)	Измеренные значения $\lambda_{\text{изм}}$ , Вт/(м·К)	Погрешность измерений		
			Относительная	Случайная	Полная
	$\delta$ , %	$\delta_{\text{сл}_{\Sigma}}$ , %	$\delta_{\Sigma}$ , %		
Рипор	0,028	0,0283	1,0714	4,0124	4,0835
Гераклит	0,035	0,0345	1,4706	4,0124	4,0835
Изолайт	0,032	0,0323	0,9375	4,0124	4,0835
Изовент	0,032	0,0315	1,5625	4,0124	4,0835
Изорурф	0,034	0,0347	2,0588	4,0124	4,0835
Минвата 1	0,033	0,0324	1,8181	4,0124	4,0835
Минвата 2	0,037	0,0364	1,6231	4,0124	4,0835
Минвата 3	0,04	0,0410	2,5000	4,0124	4,0835
Изорурф-В	0,035	0,0346	1,7647	4,0124	4,0835
Изофас-ЛМ	0,039	0,0397	1,7949	4,0124	4,0835
ПММ	0,195	0,1943	0,3589	4,0124	4,0835

Таким образом, из проведённых вычислений следует, что полная погрешность прямого эксперимента удовлетворяет требованиям точности ИИИС ДК ТТМ. Метрологический анализ результатов исследований погрешностей показывает, что относительная погрешность измерений  $\lambda$  минераловатных плит составляет не более 4%, что соответствует допустимым значениям для данного класса измерительных средств.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

В итоге проведённого научного исследования, представленного в данной монографии, получены следующие результаты:

- разработана математическая модель допускового контроля теплоизоляционных материалов, позволяющая создать алгоритм допускового контроля контролируемых параметров технологического процесса изготовления минераловатных плит и теплопроводности готовой продукции;

- создан метод повышения точности допускового контроля и изготовления минераловатных плит в результате определения порога принадлежности к зоне допуска контролируемых параметров. Выполнена и подтверждена достоверность допускового контроля в соответствии с ГОСТ Р 8. 731–2010 «Системы допускового контроля. Основные положения»;

- получены экспериментальные зависимости теплопроводности минераловатных плит от управляемых и неуправляемых параметров технологического процесса изготовления минват, используемые в базе знаний ИИИС. Аппроксимирующие функции указанных зависимостей позволяют получать достоверную и точную информацию о теплопроводности минват в ходе технологического процесса их изготовления и контроля готовой продукции;

- создан алгоритм допускового контроля теплопроводности минват, режимных параметров техпроцесса и его коррекции на основе использования аналитических зависимостей теплопроводности минват от управляемых и неуправляемых параметров техпроцесса;

- разработана ИИИС ДК ТТМ, отличающаяся созданными блоками мониторинга и допускового контроля, коррекции режимных параметров, созданными базами данных и знаний, содержащими процедурные правила определения порога принадлежностей к зоне допуска контролируемых параметров при функционировании ИИИС;

- проведены экспериментальные исследования ИИИС ДК ТТМ, позволяющие установить, что в результате применения в системе созданного метода и алгоритма допускового контроля режимных параметров техпроцесса повысились точность определения теплопроводности теплоизоляционных материалов, относительная погрешность результатов измерения не более 4% и вероятность выхода качественной продукции до 0,95.

Таким образом, поставленная цель научного исследования достигнута вследствие получения основного научного результата – повышения точности допускового контроля режимных параметров и теплопроводности теплоизоляционных материалов для повышения их качества на основе разработанного метода, отличающегося от известных методов допускового контроля определением порога принадлежности к зоне допуска контролируемых параметров в результате применения разработанной ИИИС ДК ТТМ, позволяющей получать оперативную и точную информацию о теплофизических свойствах материалов и в соответствии с этим изготавливать материалы с требуемой теплопроводностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. **Цапенко, М. П.** Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование : учеб. пособие для вузов / М. П. Цапенко. – 2-е изд., перер. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.
2. **ГОСТ 8.437–81.** Системы информационно-измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения. – Введён 1982-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 10 с.
3. **Раннев, Г. Г.** Методы и средства измерений / Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. – М. : Издательский центр «Академия», 2003. – 426 с.
4. **Информационно-измерительная** техника и электроника : учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г. Г. Раннев, В. А. Суроги-на, В. И. Калашников и др. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 512 с.
5. **Теплофизические** измерения и приборы / Е. С. Платунов, Е. С. Шатунов и др. – Л. : Энергия, 1986. – 256 с.
6. **Платунов, Е. С.** Теплофизические измерения в монотонном режиме / Е. С. Платунов. – Л. : Энергия, 1973. – 143 с.
7. **Филиппов, П. И.** Приложение теории теплопроводности к теплофизическим измерениям / П. И. Филиппов. – Новосибирск, 1973. – 64 с.
8. **Чудновский, А. Ф.** Теплообмен в дисперсных средах / А. Ф. Чудновский. – М. : Гостехиздат, 1954. – 444 с.
9. **Кондратьев, Г. М.** Тепловые измерения / Г. М. Кондратьев. – М.–Л. : Машгиз, 1956. – 253 с.
10. **А.с. № 1124209** СССР, МКИ G01N25/18. Способ неразрушающего контроля ТФХ материалов и устройство для его осуществления [Текст] / Чернышов В. Н. и др. – № 3549461/18-25 ; заявл. 9.02.83 ; опубл. 15.11.84. – Бюл. № 42.
11. **Чудновский, А. Ф.** Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А. Ф. Чудновский. – М. : Энергия, 1962. – 456 с.
12. **Методы** определения теплопроводности и температуропроводности / А. Г. Шашков, Г. М. Волохов, Т. Н. Абраменко, В. П. Козлов. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.
13. **Шлыков, Ю. П.** Контактный теплообмен / Ю. П. Шлыков, Е. А. Гарин. – М.–Л. : Энергия, 1963. – 144 с.

14. **Шнейдер, П.** Инженерные проблемы теплопроводности / П. Шнейдер. – М. : Изд-во литературы, 1960. – 478 с.

15. **Ярышев, Н. А.** Теоретические основы измерения нестационарных температур / Н. А. Ярышев. – Л. : Энергия, 1967. – 298 с.

16. **Методы** определения теплопроводности и температуропроводности / под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.

17. **А. с. № 678332** СССР, МКИ G01K3/02. Устройство для измерения среднеинтегрального значения температуры среды / Власов В. В., Шаталов Ю. С., Трофимов А. В., и др. – № 2499783/18-10 ; заявл. 24.06.77 ; опубл. 05.08.79. – Бюл. № 29. – 4 с.

18. **Основы** построения информационно-измерительных систем / Н. А. Виноградова, В. В. Гайдученко, А. И. Карякин и др.; под ред. В. Г. Свиридова. – М. : Изд-во МЭИ, 2004. – 268 с.

19. **Метрология** и радиозмерения / В. И. Нефедов, В. И. Хахин, В. К. Битюков и др. ; под ред. проф. В. И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2003. – 526 с.

20. **Селиванова, З. М.** Информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / под ред. проф. В. М. Тютюнника // Информационные системы и процессы : сб. науч. тр. – Тамбов ; М. ; СПб. ; Баку ; Вена : Изд-во Нобелистика, 2003. – Вып. 1. – С. 180 – 185.

21. **Селиванова, З. М.** Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических свойств твёрдых материалов / З. М. Селиванова // Проектирование и технология электронных средств. – 2005. – № 2. – С. 35 – 37.

22. **Универсальный** измеритель-регулятор температуры, давления восьмиканальный ОВЕН ТРМ 138 – Краткое описание [Электронный ресурс] : сайт фирмы «ОВЕН». – URL : <http://www.owen.ru/catalog>. – Загл. с экрана (дата обращения 26.10.2013).

23. **C-Therm TCi** Анализатор теплопроводности – Краткое описание [Электронный ресурс] : сайт фирмы «C-Therm Technologies Ltd.». – URL : [http://www.ctherm.com/products/tci\\_thermal\\_conductivity/lang/ru/](http://www.ctherm.com/products/tci_thermal_conductivity/lang/ru/). – Загл. с экрана (дата обращения 26.10.2013).

24. **Технология** производства [Электронный ресурс] : сайт ЗАО «Изорок». – URL : <http://www.isoroc.ru/tehnologia.htm>. – Загл. с экрана (дата обращения 15.02.2013).

25. **Селиванова, З. М.** Решение задачи обеспечения заданной точности и качества при определении теплопроводности теплоизоля-

ционных материалов интеллектуальной информационно-измерительной системой / З. М. Селиванова, К. С. Стасенко // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2011. – № 4(35). – С. 435 – 443.

26. **Розно, М. И.** Пора заняться техпроцессом / М. И. Розно, Л. В. Шинко. – Н. Новгород : Центр «Приоритет», 2004. – С. 39.

27. **Егоров, С. А.** Разработка информационно-измерительной системы определения расхода сыпучих материалов и совершенствование весовых дозаторов : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.16, 05.02.13 / С. А. Егоров. – Тамбов, 2010. – 167 с.

28. **ГОСТ 30124–94.** Весы и весовые дозаторы непрерывного действия. Общие технические требования. – Введён 1997-01-01. – М. : Изд-во стандартов 1996. – 13 с.

29. **Пат. 2257551** Российская Федерация, С2, МПК G 01 G 3/08, 23/36, 23/48. Датчик веса / Першин В. Ф., Подольский В. Е., Однолько В. Г., Егоров С. А. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2003107349 ; заявл. 17.03.03 ; опубл. 27.07.05. – Бюл. № 21.

30. **Пат. 2262080** Российская Федерация, С2, МКИ 7G01 F1/30. Датчик расхода / Першин В. Ф., Подольский В. Е., Однолько В. Г., Егоров С. А. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2003110046 ; заявл. 08.04.03 ; опубл. 10.10.05. – Бюл. № 27.

31. **Пат. 2330243** Российская Федерация, МПК G01D 3/028. Способ температурной компенсации дифференциальных датчиков с линейными характеристиками / Першин В. Ф., Егоров С. А., Подольский В. Е. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2006121843/28 ; заявл. 19.06.06; опубл. 27.08.08. – Бюл. № 21.

32. **Пат. 87011** на полезную модель Российская Федерация, МПК G01F 1/00. Датчик расхода сыпучего материала / Першина С. А., Ди Дженнаро А. И., Мищенко С. В., Егоров С. А., Першин В. Ф., Потоков Е. Г. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2009115169 ; заявл. 21.04.09 ; опубл. 20.09.09. – Бюл. № 26.

33. **Пат. 95843** на полезную модель Российская Федерация, МПК G01N19/02. Информационно-измерительная система для определения коэффициента внешнего трения сыпучего материала / Першина С. В., Ди Дженнаро А. И., Мищенко С. В., Егоров С. А., Першин В. Ф. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2009115159 ; заявл. 21.04.09 ; опубл. 10.07.10. – Бюл. № 19.

34. Пат. № 20011229628 RU, GF17C9/00 РФ. Термозонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и готовых изделий / Чернышов В. Н., Селиванова З. М. – № 2170423 ; заявл. 16.05.2000 ; опубл. 11.06.2001. – Бюл. № 19.

35. ГОСТ Р 50-601-20-91. Рекомендации по оценке точности и стабильности технологических процессов (оборудования). – Введён 1991-11-29. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 28 с.

36. Стасенко, К. С. Повышение точности изготовления и контроля теплопроводности минераловатных плит при воздействующих факторах / К. С. Стасенко, З. М. Селиванова // Материалы VIII Междунар. научн.-практ. конф. «Дни науки-2013». – Секция 36. Технические науки. – Прага : Издательский дом «Образование и наука», 2013. – С. 35 – 39.

37. ГОСТ Р 8. 731–2010. Системы допускового контроля. Основные положения. – Введён 2010-12-23. – М. : Изд-во стандартов 2011. – 12 с.

38. Технология автоматизации производства радиоэлектронной аппаратуры : учебник для вузов / И. П. Бушминский, О. Ш. Даутов, А. П. Достанко и др. – М. : Радио и связь, 1989. – 624 с.

39. Минский, М. Фреймы для представления знаний / М. Минский ; пер. с англ. – М. : Энергия, 1979. – 152 с.

40. Стасенко, К. С. Информационное обеспечение измерительной системы мониторинга производства минераловатных плит / К. С. Стасенко // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых учёных, аспирантов и студентов. – Вып. 5. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – 2014. – С. 7 – 11.

41. Стасенко, К. С. Интеллектуальная информационно-измерительная система мониторинга режимных параметров технологического процесса производства минеральных ват / К. С. Стасенко, З. М. Селиванова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 52 – 56.

42. Селиванова, З. М. Оперативный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств твёрдых материалов / З. М. Селиванова, В. Н. Чернышов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 79 – 83.

43. Стасенко, К. С. Программа для реализации алгоритма контроля режимных параметров информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств теплоизоляцион-

ных материалов / К. С. Стасенко, З. М. Селиванова // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014614760, зарегистрировано 6.05.14.

44. **Стасенко, К. С.** Программа для реализации алгоритма функционирования информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств теплоизоляционных материалов и мониторинга режимных параметров / К. С. Стасенко, З. М. Селиванова // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014614738, зарегистрировано 6.05.14.

45. **Стасенко, К. С.** Аналитическая модель оценки точности изготовления минеральной ваты / К. С. Стасенко // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых учёных, аспирантов и студентов. – Вып. 3. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – 2012. – С. 45 – 49.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А

#### ПРОЦЕДУРНЫЕ ПРАВИЛА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ В БАЗЕ ЗНАНИЙ ИИИС, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ ПО КОРРЕКЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ, ЕСЛИ КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕ СООТВЕТСТВУЮТ ДОПУСКУ

##### ПА.1. Процедурные правила

ЕСЛИ $T_{oc}$	∈	$T_{oc}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	(РП) $T_{oc}$	∈	(РП) $T_{oc, доп}^?$
ЕСЛИ $V_{oc}$	∈	$V_{oc}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{oc}$	∈	(РП) $V_{oc, доп}^?$
ЕСЛИ $C$	∈	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	∈	(РП) $C_{доп}^?$
ЕСЛИ $W_{всc}$	∈	$W_{всc}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всc}$	∈	(РП) $W_{всc, доп}^?$
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	∈	(РП) $C_{св, доп}^?$
ЕСЛИ $C_{д}$	∈	$C_{д}$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_{д}$	∈	(РП) $C_{д, доп}^?$
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц, доп}^?$
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °С,	ТО	(РП) $P_T$	∈	(РП) $P_{T, доп}^?$
ЕСЛИ $T_{oc}$	∉	$T_{oc}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	(РП) $T_{oc}$	∉	(РП) $T_{oc, доп}^?$
ЕСЛИ $V_{oc}$	∈	$V_{oc}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{oc}$	∈	(РП) $V_{oc, доп}^?$
ЕСЛИ $C$	∈	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	∈	(РП) $C_{доп}^?$
ЕСЛИ $W_{всc}$	∈	$W_{всc}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всc}$	∈	(РП) $W_{всc, доп}^?$

ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св} (2,02...4,95)\%$ ,	ТО	$(РП)_{C_{св}}$	∈	$(РП)_{C_{св, доп}}$ ;
ЕСЛИ $C_{д}$	∈	$C_{д} (4,04...9,90)\%$ ,	ТО	$(РП)_{C_{д}}$	∈	$(РП)_{C_{д, доп}}$ ;
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц} (6060...6930)$ об/мин,	ТО	$(РП)_{S_{ц}}$	∈	$(РП)_{S_{ц, доп}}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T (1210...1490)$ °С,	ТО	$(РП)_{P_T}$	∈	$(РП)_{P_T, доп}$ .
ЕСЛИ $T_{ос}$	∉	$T_{ос} (18,18...20,80)$ °С,	ТО	$(РП)_{T_{ос}}$	∉	$(РП)_{T_{ос, доп}}$ ;
ЕСЛИ $V_{ос}$	∉	$V_{ос} (48,5...59,4)\%$ ,	ТО	$(РП)_{V_{ос}}$	∉	$(РП)_{V_{ос, доп}}$ ;
ЕСЛИ $C$	∈	$C (70,7...80,1)\%$ ,	ТО	$(РП)_C$	∈	$(РП)_{C, доп}$ ;
ЕСЛИ $W_{всс}$	∈	$W_{всс} (20,2...29,7)\%$ ,	ТО	$(РП)_{W_{всс}}$	∈	$(РП)_{W_{всс, доп}}$ ;
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св} (2,02...4,95)\%$ ,	ТО	$(РП)_{C_{св}}$	∈	$(РП)_{C_{св, доп}}$ ;
ЕСЛИ $C_{д}$	∈	$C_{д} (4,04...9,90)\%$ ,	ТО	$(РП)_{C_{д}}$	∈	$(РП)_{C_{д, доп}}$ ;
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц} (6060...6930)$ об/мин,	ТО	$(РП)_{S_{ц}}$	∈	$(РП)_{S_{ц, доп}}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T (1210...1490)$ °С,	ТО	$(РП)_{P_T}$	∈	$(РП)_{P_T, доп}$ .
ЕСЛИ $T_{ос}$	∉	$T_{ос} (18,18...20,80)$ °С,	ТО	$(РП)_{T_{ос}}$	∉	$(РП)_{T_{ос, доп}}$ ;
ЕСЛИ $V_{ос}$	∉	$V_{ос} (48,5...59,4)\%$ ,	ТО	$(РП)_{V_{ос}}$	∉	$(РП)_{V_{ос, доп}}$ ;
ЕСЛИ $C$	∉	$C (70,7...80,1)\%$ ,	ТО	$(РП)_C$	∉	$(РП)_{C, доп}$ ;
ЕСЛИ $W_{всс}$	∈	$W_{всс} (20,2...29,7)\%$ ,	ТО	$(РП)_{W_{всс}}$	∈	$(РП)_{W_{всс, доп}}$ ;
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св} (2,02...4,95)\%$ ,	ТО	$(РП)_{C_{св}}$	∈	$(РП)_{C_{св, доп}}$ ;
ЕСЛИ $C_{д}$	∈	$C_{д} (4,04...9,90)\%$ ,	ТО	$(РП)_{C_{д}}$	∈	$(РП)_{C_{д, доп}}$ ;

Продолжение табл. ПА.1

ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц, доп}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °С,	ТО	(РП) $P_T$	∈	(РП) $P_{T, доп}$ .
ЕСЛИ $T_{ос}$	∉	$T_{ос}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	(РП) $T_{ос}$	∉	(РП) $T_{ос, доп}$ ;
ЕСЛИ $V_{ос}$	∉	$V_{ос}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{ос}$	∉	(РП) $V_{ос, доп}$ ;
ЕСЛИ $C$	∉	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	∉	(РП) $C_{доп}$ ;
ЕСЛИ $W_{всс}$	∉	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всс}$	∉	(РП) $W_{всс, доп}$ ;
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	∈	(РП) $C_{св, доп}$ ;
ЕСЛИ $C_d$	∈	$C_d$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_d$	∈	(РП) $C_{d, доп}$ ;
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц, доп}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °С,	ТО	(РП) $P_T$	∈	(РП) $P_{T, доп}$ .
ЕСЛИ $T_{ос}$	∉	$T_{ос}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	(РП) $T_{ос}$	∉	(РП) $T_{ос, доп}$ ;
ЕСЛИ $V_{ос}$	∉	$V_{ос}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{ос}$	∉	(РП) $V_{ос, доп}$ ;
ЕСЛИ $C$	∉	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	∉	(РП) $C_{доп}$ ;
ЕСЛИ $W_{всс}$	∉	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всс}$	∉	(РП) $W_{всс, доп}$ ;
ЕСЛИ $C_{св}$	∉	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	∉	(РП) $C_{св, доп}$ ;
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц, доп}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °С,	ТО	(РП) $P_T$	∈	(РП) $P_{T, доп}$ .
ЕСЛИ $T_{ос}$	∉	$T_{ос}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	(РП) $T_{ос}$	∉	(РП) $T_{ос, доп}$ ;

Продолжение табл. ПА.1

ЕСЛИ $V_{oc}$	€	$V_{oc}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{oc}$	€	(РП) $V_{oc, доп}?$
ЕСЛИ $C$	€	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	€	(РП) $C_{доп}?$
ЕСЛИ $W_{всс}$	€	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всс}$	€	(РП) $W_{всс, доп}?$
ЕСЛИ $C_{св}$	€	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	€	(РП) $C_{св, доп}?$
ЕСЛИ $C_{д}$	€	$C_{д}$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_{д}$	€	(РП) $C_{д, доп}?$
ЕСЛИ $S_{ц}$	€	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	€	(РП) $S_{ц, доп}?$
ЕСЛИ $P_T$	€	$P_T$ (1210...1490) °C,	ТО	(РП) $P_T$	€	(РП) $P_{T, доп}?$
ЕСЛИ $T_{oc}$	€	$T_{oc}$ (18,18...20,80) °C,	ТО	(РП) $T_{oc}$	€	(РП) $T_{oc, доп}?$
ЕСЛИ $V_{oc}$	€	$V_{oc}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{oc}$	€	(РП) $V_{oc, доп}?$
ЕСЛИ $C$	€	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	€	(РП) $C_{доп}?$
ЕСЛИ $W_{всс}$	€	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всс}$	€	(РП) $W_{всс, доп}?$
ЕСЛИ $C_{св}$	€	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	€	(РП) $C_{св, доп}?$
ЕСЛИ $C_{д}$	€	$C_{д}$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_{д}$	€	(РП) $C_{д, доп}?$
ЕСЛИ $S_{ц}$	€	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	€	(РП) $S_{ц, доп}?$
ЕСЛИ $P_T$	€	$P_T$ (1210...1490) °C,	ТО	(РП) $P_T$	€	(РП) $P_{T, доп}?$
ЕСЛИ $T_{oc}$	€	$T_{oc}$ (18,18...20,80) °C,	ТО	(РП) $T_{oc}$	€	(РП) $T_{oc, доп}?$
ЕСЛИ $V_{oc}$	€	$V_{oc}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{oc}$	€	(РП) $V_{oc, доп}?$
ЕСЛИ $C$	€	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	€	(РП) $C_{доп}?$

Продолжение табл. ПА.1

ЕСЛИ $W_{всс}$	€	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всс}$	€	(РП) $W_{всс, доп}^?$
ЕСЛИ $C_{св}$	€	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	€	(РП) $C_{св, доп}^?$
ЕСЛИ $C_{д}$	€	$C_{д}$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_{д}$	€	(РП) $C_{д, доп}^?$
ЕСЛИ $S_{ц}$	€	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	€	(РП) $S_{ц, доп}^?$
ЕСЛИ $P_T$	€	$P_T$ (1210...1490) °C,	ТО	(РП) $P_T$	€	(РП) $P_{T, доп}^?$
ЕСЛИ $T_{ос}$	€	$T_{ос}$ (18,18...20,80) °C,	ТО	(РП) $T_{ос}$	€	(РП) $T_{ос, доп}^?$
ЕСЛИ $V_{ос}$	€	$V_{ос}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{ос}$	€	(РП) $V_{ос, доп}^?$
ЕСЛИ $C$	€	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	€	(РП) $C_{доп}^?$
ЕСЛИ $W_{всс}$	€	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всс}$	€	(РП) $W_{всс, доп}^?$
ЕСЛИ $C_{св}$	€	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	€	(РП) $C_{св, доп}^?$
ЕСЛИ $C_{д}$	€	$C_{д}$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_{д}$	€	(РП) $C_{д, доп}^?$
ЕСЛИ $S_{ц}$	€	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	€	(РП) $S_{ц, доп}^?$
ЕСЛИ $P_T$	€	$P_T$ (1210...1490) °C,	ТО	(РП) $P_T$	€	(РП) $P_{T, доп}^?$
ЕСЛИ $T_{ос}$	€	$T_{ос}$ (18,18...20,80) °C,	ТО	(РП) $T_{ос}$	€	(РП) $T_{ос, доп}^?$
ЕСЛИ $V_{ос}$	€	$V_{ос}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{ос}$	€	(РП) $V_{ос, доп}^?$
ЕСЛИ $C$	€	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	€	(РП) $C_{доп}^?$
ЕСЛИ $W_{всс}$	€	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всс}$	€	(РП) $W_{всс, доп}^?$
ЕСЛИ $C_{св}$	€	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	€	(РП) $C_{св, доп}^?$

Продолжение табл. ПА.1

ЕСЛИ $C_d$	∈	$C_d (4,04...9,90)\%$ ,	ТО	$(PП)_{C_d}$	∈	$(PП)_{C_{д,доп}}?$
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц} (6060...6930)$ об/мин,	ТО	$(PП)_{S_{ц}}$	∈	$(PП)_{S_{ц,доп}}?$
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T (1210...1490)$ °С,	ТО	$(PП)_{P_T}$	∈	$(PП)_{P_{T,доп}}?$
ЕСЛИ $T_{oc}$	∈	$T_{oc} (18,18...20,80)$ °С,	ТО	$(PП)_{T_{oc}}$	∈	$(PП)_{T_{oc,доп}}?$
ЕСЛИ $V_{oc}$	∈	$V_{oc} (48,5...59,4)\%$ ,	ТО	$(PП)_{V_{oc}}$	∈	$(PП)_{V_{oc,доп}}?$
ЕСЛИ $C$	∈	$C (70,7...80,1)\%$ ,	ТО	$(PП)_C$	∈	$(PП)_{C_{доп}}?$
ЕСЛИ $W_{всс}$	∉	$W_{всс} (20,2...29,7)\%$ ,	ТО	$(PП)_{W_{всс}}$	∉	$(PП)_{W_{всс,доп}}?$
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св} (2,02...4,95)\%$ ,	ТО	$(PП)_{C_{св}}$	∈	$(PП)_{C_{св,доп}}?$
ЕСЛИ $C_d$	∈	$C_d (4,04...9,90)\%$ ,	ТО	$(PП)_{C_d}$	∈	$(PП)_{C_{д,доп}}?$
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц} (6060...6930)$ об/мин,	ТО	$(PП)_{S_{ц}}$	∈	$(PП)_{S_{ц,доп}}?$
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T (1210...1490)$ °С,	ТО	$(PП)_{P_T}$	∈	$(PП)_{P_{T,доп}}?$
ЕСЛИ $T_{oc}$	∈	$T_{oc} (18,18...20,80)$ °С,	ТО	$(PП)_{T_{oc}}$	∈	$(PП)_{T_{oc,доп}}?$
ЕСЛИ $V_{oc}$	∈	$V_{oc} (48,5...59,4)\%$ ,	ТО	$(PП)_{V_{oc}}$	∈	$(PП)_{V_{oc,доп}}?$
ЕСЛИ $C$	∈	$C (70,7...80,1)\%$ ,	ТО	$(PП)_C$	∈	$(PП)_{C_{доп}}?$
ЕСЛИ $W_{всс}$	∉	$W_{всс} (20,2...29,7)\%$ ,	ТО	$(PП)_{W_{всс}}$	∉	$(PП)_{W_{всс,доп}}?$
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св} (2,02...4,95)\%$ ,	ТО	$(PП)_{C_{св}}$	∈	$(PП)_{C_{св,доп}}?$
ЕСЛИ $C_d$	∈	$C_d (4,04...9,90)\%$ ,	ТО	$(PП)_{C_d}$	∈	$(PП)_{C_{д,доп}}?$
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц} (6060...6930)$ об/мин,	ТО	$(PП)_{S_{ц}}$	∈	$(PП)_{S_{ц,доп}}?$

Продолжение табл. ПА.1

ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °C,	ТО	(РП) $P_T$	∈	(РП) $P_{T,доп}$
ЕСЛИ $T_{oc}$	∈	$T_{oc}$ (18,18...20,80) °C,	ТО	(РП) $T_{oc}$	∈	(РП) $T_{oc,доп}$
ЕСЛИ $V_{oc}$	∈	$V_{oc}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{oc}$	∈	(РП) $V_{oc,доп}$
ЕСЛИ $C$	∈	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	∈	(РП) $C_{доп}$
ЕСЛИ $W_{всc}$	∈	$W_{всc}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всc}$	∉	(РП) $W_{всc,доп}$
ЕСЛИ $C_{св}$	∉	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	∈	(РП) $C_{св,доп}$
ЕСЛИ $C_d$	∈	$C_d$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_d$	∈	(РП) $C_{d,доп}$
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц,доп}$
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °C,	ТО	(РП) $P_T$	∈	(РП) $P_{T,доп}$
ЕСЛИ $T_{oc}$	∈	$T_{oc}$ (18,18...20,80) °C,	ТО	(РП) $T_{oc}$	∈	(РП) $T_{oc,доп}$
ЕСЛИ $V_{oc}$	∈	$V_{oc}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{oc}$	∈	(РП) $V_{oc,доп}$
ЕСЛИ $C$	∈	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	∈	(РП) $C_{доп}$
ЕСЛИ $W_{всc}$	∈	$W_{всc}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всc}$	∉	(РП) $W_{всc,доп}$
ЕСЛИ $C_{св}$	∉	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	∈	(РП) $C_{св,доп}$
ЕСЛИ $C_d$	∉	$C_d$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_d$	∉	(РП) $C_{d,доп}$
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц,доп}$
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °C,	ТО	(РП) $P_T$	∈	(РП) $P_{T,доп}$
ЕСЛИ $T_{oc}$	∈	$T_{oc}$ (18,18...20,80) °C,	ТО	(РП) $T_{oc}$	∈	(РП) $T_{oc,доп}$

Продолжение табл. ПА.1

ЕСЛИ $C$	∈	$C (70,7...80,1)\%$ ,	ТО	(РП) $_C$	∈	(РП) $_{C_{\text{доп}}}$ ;
ЕСЛИ $W_{\text{всс}}$	∈	$W_{\text{всс}} (20,2...29,7)\%$ ,	ТО	(РП) $_{W_{\text{всс}}}$	∈	(РП) $_{W_{\text{всс, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $C_{\text{св}}$	∈	$C_{\text{св}} (2,02...4,95)\%$ ,	ТО	(РП) $_{C_{\text{св}}}$	∈	(РП) $_{C_{\text{св, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $C_{\text{д}}$	∉	$C_{\text{д}} (4,04...9,90)\%$ ,	ТО	(РП) $_{C_{\text{д}}}$	∈	(РП) $_{C_{\text{д, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $S_{\text{ц}}$	∈	$S_{\text{ц}} (6060...6930)$ об/мин,	ТО	(РП) $_{S_{\text{ц}}}$	∉	(РП) $_{S_{\text{ц, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T (1210...1490)$ °С,	ТО	(РП) $_{P_T}$	∈	(РП) $_{P_{T, \text{доп}}}$ .
ЕСЛИ $T_{\text{ос}}$	∈	$T_{\text{ос}} (18,18...20,80)$ °С,	ТО	(РП) $_{T_{\text{ос}}}$	∈	(РП) $_{T_{\text{ос, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $V_{\text{ос}}$	∈	$V_{\text{ос}} (48,5...59,4)\%$ ,	ТО	(РП) $_{V_{\text{ос}}}$	∈	(РП) $_{V_{\text{ос, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $C$	∈	$C (70,7...80,1)\%$ ,	ТО	(РП) $_C$	∈	(РП) $_{C_{\text{доп}}}$ ;
ЕСЛИ $W_{\text{всс}}$	∈	$W_{\text{всс}} (20,2...29,7)\%$ ,	ТО	(РП) $_{W_{\text{всс}}}$	∈	(РП) $_{W_{\text{всс, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $C_{\text{св}}$	∈	$C_{\text{св}} (2,02...4,95)\%$ ,	ТО	(РП) $_{C_{\text{св}}}$	∈	(РП) $_{C_{\text{св, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $C_{\text{д}}$	∈	$C_{\text{д}} (4,04...9,90)\%$ ,	ТО	(РП) $_{C_{\text{д}}}$	∈	(РП) $_{C_{\text{д, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $S_{\text{ц}}$	∈	$S_{\text{ц}} (6060...6930)$ об/мин,	ТО	(РП) $_{S_{\text{ц}}}$	∈	(РП) $_{S_{\text{ц, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∉	$P_T (1210...1490)$ °С,	ТО	(РП) $_{P_T}$	∉	(РП) $_{P_{T, \text{доп}}}$ .
ЕСЛИ $T_{\text{ос}}$	∉	$T_{\text{ос}} (18,18...20,80)$ °С,	ТО	(РП) $_{T_{\text{ос}}}$	∉	(РП) $_{T_{\text{ос, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $V_{\text{ос}}$	∈	$V_{\text{ос}} (48,5...59,4)\%$ ,	ТО	(РП) $_{V_{\text{ос}}}$	∈	(РП) $_{V_{\text{ос, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $C$	∉	$C (70,7...80,1)\%$ ,	ТО	(РП) $_C$	∉	(РП) $_{C_{\text{доп}}}$ ;
ЕСЛИ $W_{\text{всс}}$	∈	$W_{\text{всс}} (20,2...29,7)\%$ ,	ТО	(РП) $_{W_{\text{всс}}}$	∈	(РП) $_{W_{\text{всс, доп}}}$ ;

Продолжение табл. ПА.1

ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	∈	(РП) $C_{св, доп}$ ;
ЕСЛИ $C_{д}$	∈	$C_{д}$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_{д}$	∈	(РП) $C_{д, доп}$ ;
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц, доп}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °С,	ТО	(РП) $P_T$	∈	(РП) $P_{T, доп}$ .
ЕСЛИ $T_{ос}$	∉	$T_{ос}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	(РП) $T_{ос}$	∉	(РП) $T_{ос, доп}$ ;
ЕСЛИ $V_{ос}$	∈	$V_{ос}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{ос}$	∈	(РП) $V_{ос, доп}$ ;
ЕСЛИ $C$	∉	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	∉	(РП) $C_{доп}$ ;
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	∈	(РП) $C_{св, доп}$ ;
ЕСЛИ $C_{д}$	∈	$C_{д}$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_{д}$	∈	(РП) $C_{д, доп}$ ;
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц, доп}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∉	$P_T$ (1210...1490) °С,	ТО	(РП) $P_T$	∉	(РП) $P_{T, доп}$ .
ЕСЛИ $T_{ос}$	∈	$T_{ос}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	(РП) $T_{ос}$	∈	(РП) $T_{ос, доп}$ ;
ЕСЛИ $V_{ос}$	∈	$V_{ос}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{ос}$	∈	(РП) $V_{ос, доп}$ ;
ЕСЛИ $C$	∉	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	∉	(РП) $C_{доп}$ ;
ЕСЛИ $W_{всс}$	∈	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всс}$	∈	(РП) $W_{всс, доп}$ ;
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	∈	(РП) $C_{св, доп}$ ;
ЕСЛИ $C_{д}$	∈	$C_{д}$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_{д}$	∈	(РП) $C_{д, доп}$ ;
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц, доп}$ ;

ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °С,	ТО	(РП) $P_T$	∈	(РП) $P_{T,доп}$ .
ЕСЛИ $T_{oc}$	∈	$T_{oc}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	(РП) $T_{oc}$	∈	(РП) $T_{oc,доп}$ ;
ЕСЛИ $V_{oc}$	∈	$V_{oc}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{oc}$	∈	(РП) $V_{oc,доп}$ ;
ЕСЛИ $C$	∉	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	∉	(РП) $C_{доп}$ ;
ЕСЛИ $W_{всс}$	∈	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всс}$	∈	(РП) $W_{всс,доп}$ ;
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	∈	(РП) $C_{св,доп}$ ;
ЕСЛИ $C_d$	∈	$C_d$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_d$	∈	(РП) $C_{d,доп}$ ;
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц,доп}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∉	$P_T$ (1210...1490) °С,	ТО	(РП) $P_T$	∉	(РП) $P_{T,доп}$ .
ЕСЛИ $T_{oc}$	∈	$T_{oc}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	(РП) $T_{oc}$	∈	(РП) $T_{oc,доп}$ ;
ЕСЛИ $V_{oc}$	∈	$V_{oc}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{oc}$	∈	(РП) $V_{oc,доп}$ ;
ЕСЛИ $C$	∈	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	∈	(РП) $C_{доп}$ ;
ЕСЛИ $W_{всс}$	∈	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всс}$	∈	(РП) $W_{всс,доп}$ ;
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	∈	(РП) $C_{св,доп}$ ;
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц,доп}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∉	$P_T$ (1210...1490) °С,	ТО	(РП) $P_T$	∉	(РП) $P_{T,доп}$ .
ЕСЛИ $T_{oc}$	∉	$T_{oc}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	(РП) $T_{oc}$	∉	(РП) $T_{oc,доп}$ ;
ЕСЛИ $V_{oc}$	∈	$V_{oc}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{oc}$	∈	(РП) $V_{oc,доп}$ ;

Продолжение табл. ПА.1

ЕСЛИ $C$	∈	$C (70,7...80,1)\%$ ,	ТО	$(РП)_C$	∈	$(РП)_{C_{доп}}$ ;
ЕСЛИ $W_{всс}$	∈	$W_{всс} (20,2...29,7)\%$ ,	ТО	$(РП)_{W_{всс}}$	∈	$(РП)_{W_{всс,доп}}$ ;
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св} (2,02...4,95)\%$ ,	ТО	$(РП)_{C_{св}}$	∈	$(РП)_{C_{св,доп}}$ ;
ЕСЛИ $C_{д}$	∈	$C_{д} (4,04...9,90)\%$ ,	ТО	$(РП)_{C_{д}}$	∈	$(РП)_{C_{д,доп}}$ ;
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц} (6060...6930)$ об/мин,	ТО	$(РП)_{S_{ц}}$	∈	$(РП)_{S_{ц,доп}}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∉	$P_T (1210...1490)$ °С,	ТО	$(РП)_{P_T}$	∉	$(РП)_{P_{T,доп}}$ .
ЕСЛИ $T_{ос}$	∉	$T_{ос} (18,18...20,80)$ °С,	ТО	$(РП)_{T_{ос}}$	∉	$(РП)_{T_{ос,доп}}$ ;
ЕСЛИ $V_{ос}$	∈	$V_{ос} (48,5...59,4)\%$ ,	ТО	$(РП)_{V_{ос}}$	∈	$(РП)_{V_{ос,доп}}$ ;
ЕСЛИ $C$	∈	$C (70,7...80,1)\%$ ,	ТО	$(РП)_C$	∈	$(РП)_{C_{доп}}$ ;
ЕСЛИ $W_{всс}$	∉	$W_{всс} (20,2...29,7)\%$ ,	ТО	$(РП)_{W_{всс}}$	∉	$(РП)_{W_{всс,доп}}$ ;
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св} (2,02...4,95)\%$ ,	ТО	$(РП)_{C_{св}}$	∈	$(РП)_{C_{св,доп}}$ ;
ЕСЛИ $C_{д}$	∈	$C_{д} (4,04...9,90)\%$ ,	ТО	$(РП)_{C_{д}}$	∈	$(РП)_{C_{д,доп}}$ ;
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц} (6060...6930)$ об/мин,	ТО	$(РП)_{S_{ц}}$	∈	$(РП)_{S_{ц,доп}}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T (1210...1490)$ °С,	ТО	$(РП)_{P_T}$	∈	$(РП)_{P_{T,доп}}$ .
ЕСЛИ $T_{ос}$	∉	$T_{ос} (18,18...20,80)$ °С,	ТО	$(РП)_{T_{ос}}$	∉	$(РП)_{T_{ос,доп}}$ ;
ЕСЛИ $V_{ос}$	∈	$V_{ос} (48,5...59,4)\%$ ,	ТО	$(РП)_{V_{ос}}$	∈	$(РП)_{V_{ос,доп}}$ ;
ЕСЛИ $C$	∈	$C (70,7...80,1)\%$ ,	ТО	$(РП)_C$	∈	$(РП)_{C_{доп}}$ ;
ЕСЛИ $W_{всс}$	∈	$W_{всс} (20,2...29,7)\%$ ,	ТО	$(РП)_{W_{всс}}$	∈	$(РП)_{W_{всс,доп}}$ ;

Продолжение табл. ПА.1

ЕСЛИ $C_{св}$	∉	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	$(PP)_{C_{св}}$	∉	$(PP)_{C_{св, доп?}}$
ЕСЛИ $C_{д}$	∈	$C_{д}$ (4,04...9,90)%,	ТО	$(PP)_{C_{д}}$	∈	$(PP)_{C_{д, доп?}}$
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	$(PP)_{S_{ц}}$	∈	$(PP)_{S_{ц, доп?}}$
ЕСЛИ $T_{ос}$	∉	$T_{ос}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	$(PP)_{T_{ос}}$	∉	$(PP)_{T_{ос, доп?}}$
ЕСЛИ $V_{ос}$	∈	$V_{ос}$ (48,5...59,4)%,	ТО	$(PP)_{V_{ос}}$	∈	$(PP)_{V_{ос, доп?}}$
ЕСЛИ $C$	∈	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	$(PP)_C$	∈	$(PP)_{C, доп?}$
ЕСЛИ $W_{всс}$	∈	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	$(PP)_{W_{всс}}$	∈	$(PP)_{W_{всс, доп?}}$
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	$(PP)_{C_{св}}$	∈	$(PP)_{C_{св, доп?}}$
ЕСЛИ $C_{д}$	∉	$C_{д}$ (4,04...9,90)%,	ТО	$(PP)_{C_{д}}$	∉	$(PP)_{C_{д, доп?}}$
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	$(PP)_{S_{ц}}$	∈	$(PP)_{S_{ц, доп?}}$
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °С,	ТО	$(PP)_{P_T}$	∈	$(PP)_{P_T, доп?}$
ЕСЛИ $T_{ос}$	∉	$T_{ос}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	$(PP)_{T_{ос}}$	∉	$(PP)_{T_{ос, доп?}}$
ЕСЛИ $V_{ос}$	∈	$V_{ос}$ (48,5...59,4)%,	ТО	$(PP)_{V_{ос}}$	∈	$(PP)_{V_{ос, доп?}}$
ЕСЛИ $C$	∈	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	$(PP)_C$	∈	$(PP)_{C, доп?}$
ЕСЛИ $W_{всс}$	∈	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	$(PP)_{W_{всс}}$	∈	$(PP)_{W_{всс, доп?}}$
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	$(PP)_{C_{св}}$	∈	$(PP)_{C_{св, доп?}}$
ЕСЛИ $C_{д}$	∈	$C_{д}$ (4,04...9,90)%,	ТО	$(PP)_{C_{д}}$	∈	$(PP)_{C_{д, доп?}}$
ЕСЛИ $S_{ц}$	∉	$S_{ц}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	$(PP)_{S_{ц}}$	∉	$(PP)_{S_{ц, доп?}}$

Продолжение табл. ПА.1

ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °С,	ТО	(РП) $P_T$	∈	(РП) $P_{T,доп}$ .
ЕСЛИ $T_{oc}$	∈	$T_{oc}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	(РП) $T_{oc}$	∈	(РП) $T_{oc,доп}$ ;
ЕСЛИ $V_{oc}$	∉	$V_{oc}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{oc}$	∉	(РП) $V_{oc,доп}$ ;
ЕСЛИ $C$	∉	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	∉	(РП) $C_{доп}$ ;
ЕСЛИ $W_{всс}$	∈	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всс}$	∈	(РП) $W_{всс,доп}$ ;
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	∈	(РП) $C_{св,доп}$ ;
ЕСЛИ $C_{д}$	∈	$C_{д}$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_{д}$	∈	(РП) $C_{д,доп}$ ;
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/МИН,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц,доп}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °С,	ТО	(РП) $P_T$	∈	(РП) $P_{T,доп}$ .
ЕСЛИ $T_{oc}$	∈	$T_{oc}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	(РП) $T_{oc}$	∈	(РП) $T_{oc,доп}$ ;
ЕСЛИ $V_{oc}$	∈	$V_{oc}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{oc}$	∈	(РП) $V_{oc,доп}$ ;
ЕСЛИ $C$	∉	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $C$	∉	(РП) $C_{доп}$ ;
ЕСЛИ $W_{всс}$	∉	$W_{всс}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $W_{всс}$	∉	(РП) $W_{всс,доп}$ ;
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $C_{св}$	∈	(РП) $C_{св,доп}$ ;
ЕСЛИ $C_{д}$	∈	$C_{д}$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $C_{д}$	∈	(РП) $C_{д,доп}$ ;
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц}$ (6060...6930) об/МИН,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц,доп}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °С,	ТО	(РП) $P_T$	∈	(РП) $P_{T,доп}$ .
ЕСЛИ $T_{oc}$	∈	$T_{oc}$ (18,18...20,80) °С,	ТО	(РП) $T_{oc}$	∈	(РП) $T_{oc,доп}$ ;
ЕСЛИ $V_{oc}$	∈	$V_{oc}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $V_{oc}$	∈	(РП) $V_{oc,доп}$ ;

Продолжение табл. ПА.1

ЕСЛИ $C$	∉	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $_C$	∉	(РП) $_{C_{\text{доп}}}$ ;
ЕСЛИ $W_{\text{всс}}$	∈	$W_{\text{всс}}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $_{W_{\text{всс}}}$	∈	(РП) $_{W_{\text{всс, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $C_{\text{св}}$	∉	$C_{\text{св}}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $_{C_{\text{св}}}$	∉	(РП) $_{C_{\text{св, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $C_{\text{д}}$	∈	$C_{\text{д}}$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $_{C_{\text{д}}}$	∈	(РП) $_{C_{\text{д, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $S_{\text{ц}}$	∈	$S_{\text{ц}}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $_{S_{\text{ц}}}$	∈	(РП) $_{S_{\text{ц, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °C,	ТО	(РП) $_{P_T}$	∈	(РП) $_{P_{T, \text{доп}}}$ .
ЕСЛИ $T_{\text{ос}}$	∈	$T_{\text{ос}}$ (18,18...20,80) °C,	ТО	(РП) $_{T_{\text{ос}}}$	∈	(РП) $_{T_{\text{ос, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $V_{\text{ос}}$	∈	$V_{\text{ос}}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $_{V_{\text{ос}}}$	∈	(РП) $_{V_{\text{ос, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $C$	∉	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $_C$	∉	(РП) $_{C_{\text{доп}}}$ ;
ЕСЛИ $W_{\text{всс}}$	∈	$W_{\text{всс}}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $_{W_{\text{всс}}}$	∈	(РП) $_{W_{\text{всс, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $C_{\text{св}}$	∈	$C_{\text{св}}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $_{C_{\text{св}}}$	∈	(РП) $_{C_{\text{св, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $C_{\text{д}}$	∉	$C_{\text{д}}$ (4,04...9,90)%,	ТО	(РП) $_{C_{\text{д}}}$	∉	(РП) $_{C_{\text{д, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $S_{\text{ц}}$	∈	$S_{\text{ц}}$ (6060...6930) об/мин,	ТО	(РП) $_{S_{\text{ц}}}$	∈	(РП) $_{S_{\text{ц, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $P_T$	∈	$P_T$ (1210...1490) °C,	ТО	(РП) $_{P_T}$	∈	(РП) $_{P_{T, \text{доп}}}$ .
ЕСЛИ $T_{\text{ос}}$	∈	$T_{\text{ос}}$ (18,18...20,80) °C,	ТО	(РП) $_{T_{\text{ос}}}$	∈	(РП) $_{T_{\text{ос, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $V_{\text{ос}}$	∉	$V_{\text{ос}}$ (48,5...59,4)%,	ТО	(РП) $_{V_{\text{ос}}}$	∉	(РП) $_{V_{\text{ос, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $C$	∈	$C$ (70,7...80,1)%,	ТО	(РП) $_C$	∈	(РП) $_{C_{\text{доп}}}$ ;
ЕСЛИ $W_{\text{всс}}$	∈	$W_{\text{всс}}$ (20,2...29,7)%,	ТО	(РП) $_{W_{\text{всс}}}$	∈	(РП) $_{W_{\text{всс, доп}}}$ ;
ЕСЛИ $C_{\text{св}}$	∈	$C_{\text{св}}$ (2,02...4,95)%,	ТО	(РП) $_{C_{\text{св}}}$	∈	(РП) $_{C_{\text{св, доп}}}$ ;

Продолжение табл. ПА.1

ЕСЛИ $C_d$	∈	$C_d (4,04...9,90)\%$ ,	ТО	(РП) $C_d$	∈	(РП) $C_{d,доп}?$
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц} (6060...6930)$ об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц,доп}?$
ЕСЛИ $P_T$	∉	$P_T (1210...1490)$ °С,	ТО	(РП) $P_T$	∉	(РП) $P_{T,доп}?$
ЕСЛИ $T_{ос}$	∈	$T_{ос} (18,18...20,80)$ °С,	ТО	(РП) $T_{ос}$	∈	(РП) $T_{ос,доп}?$
ЕСЛИ $V_{ос}$	∈	$V_{ос} (48,5...59,4)\%$ ,	ТО	(РП) $V_{ос}$	∈	(РП) $V_{ос,доп}?$
ЕСЛИ $C$	∈	$C (70,7...80,1)\%$ ,	ТО	(РП) $C$	∈	(РП) $C_{доп}?$
ЕСЛИ $W_{всс}$	∉	$W_{всс} (20,2...29,7)\%$ ,	ТО	(РП) $W_{всс}$	∉	(РП) $W_{всс,доп}?$
ЕСЛИ $C_{св}$	∈	$C_{св} (2,02...4,95)\%$ ,	ТО	(РП) $C_{св}$	∈	(РП) $C_{св,доп}?$
ЕСЛИ $C_d$	∈	$C_d (4,04...9,90)\%$ ,	ТО	(РП) $C_d$	∈	(РП) $C_{d,доп}?$
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц} (6060...6930)$ об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц,доп}?$
ЕСЛИ $P_T$	∉	$P_T (1210...1490)$ °С,	ТО	(РП) $P_T$	∉	(РП) $P_{T,доп}?$
ЕСЛИ $T_{ос}$	∈	$T_{ос} (18,18...20,80)$ °С,	ТО	(РП) $T_{ос}$	∈	(РП) $T_{ос,доп}?$
ЕСЛИ $V_{ос}$	∈	$V_{ос} (48,5...59,4)\%$ ,	ТО	(РП) $V_{ос}$	∈	(РП) $V_{ос,доп}?$
ЕСЛИ $C$	∈	$C (70,7...80,1)\%$ ,	ТО	(РП) $C$	∈	(РП) $C_{доп}?$
ЕСЛИ $W_{всс}$	∈	$W_{всс} (20,2...29,7)\%$ ,	ТО	(РП) $W_{всс}$	∈	(РП) $W_{всс,доп}?$
ЕСЛИ $C_{св}$	∉	$C_{св} (2,02...4,95)\%$ ,	ТО	(РП) $C_{св}$	∉	(РП) $C_{св,доп}?$
ЕСЛИ $C_d$	∈	$C_d (4,04...9,90)\%$ ,	ТО	(РП) $C_d$	∈	(РП) $C_{d,доп}?$
ЕСЛИ $S_{ц}$	∈	$S_{ц} (6060...6930)$ об/мин,	ТО	(РП) $S_{ц}$	∈	(РП) $S_{ц,доп}?$
ЕСЛИ $P_T$	∉	$P_T (1210...1490)$ °С,	ТО	(РП) $P_T$	∉	(РП) $P_{T,доп}?$

**ФУНКЦИИ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ К ПОРОГУ ЗОНЫ ДОПУСКА  
ДЛЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

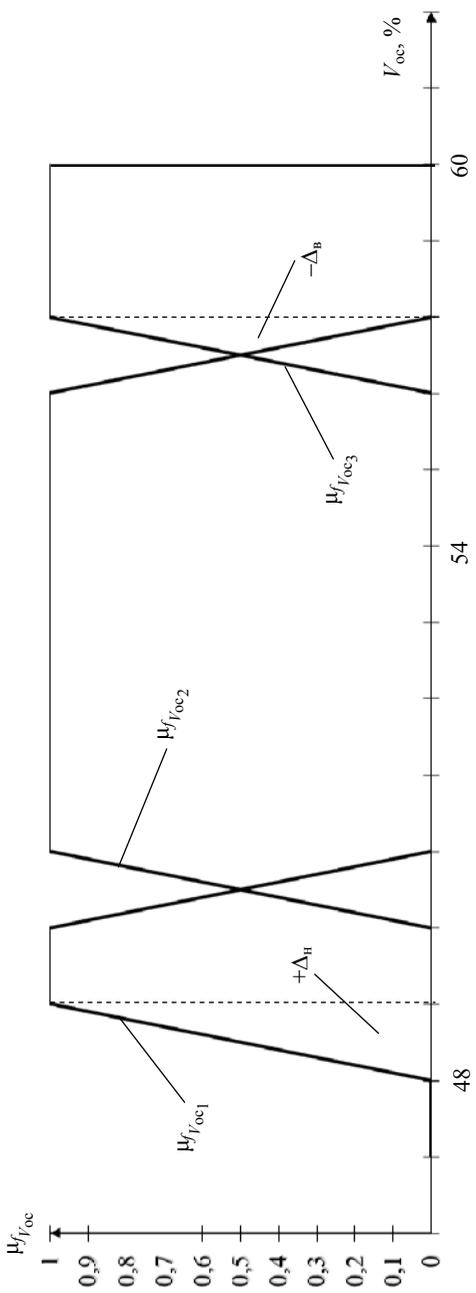


Рис. ПБ.1. Функция принадлежности нечётких множеств  $\mu_{V_{osc}}$

Для влажности окружающей среды  $V_{oc}$  соответствующие функции принадлежности описываются зависимостями:

$$\mu_{f_{oc1}}(V_{oc}) = \begin{cases} 0, & V_{oc} < 48; \\ 1,45 \cdot 10^{-2} V_{oc}^2 - 2,11 \cdot 10^{-2} V_{oc} + 43,3 \cdot 10^{-2}, & V_{oc} \in [48; 48,1]; \\ 1, & V_{oc} \in [48,1; 48,2]; \\ 2,51 \cdot 10^{-2} V_{oc}^2 + 6,81 \cdot 10^{-2} V_{oc} - 81,30 \cdot 10^{-2}, & V_{oc} \in [48,2; 48,5]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{oc2}}(V_{oc}) = \begin{cases} -2,51 \cdot 10^{-2} V_{oc}^2 + 1,76 \cdot 10^{-2} V_{oc} + 58,84 \cdot 10^{-2}, & V_{oc} \in [48,2; 48,5]; \\ 1, & V_{oc} \in [48,5; 53,1]; \\ -1,25 \cdot 10^{-2} V_{oc}^2 + 17,75 \cdot 10^{-2} V_{oc} - 4,38 \cdot 10^{-2}, & V_{oc} \in [53,1; 54,1]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{oc3}}(V_{oc}) = \begin{cases} 4,42 \cdot 10^{-2} V_{oc}^2 + 3,52 \cdot 10^{-2} V_{oc} - 0,08, & V_{oc} \in [53,1; 54,1]; \\ 1, & V_{oc} \in [54,1; 60]. \end{cases}$$

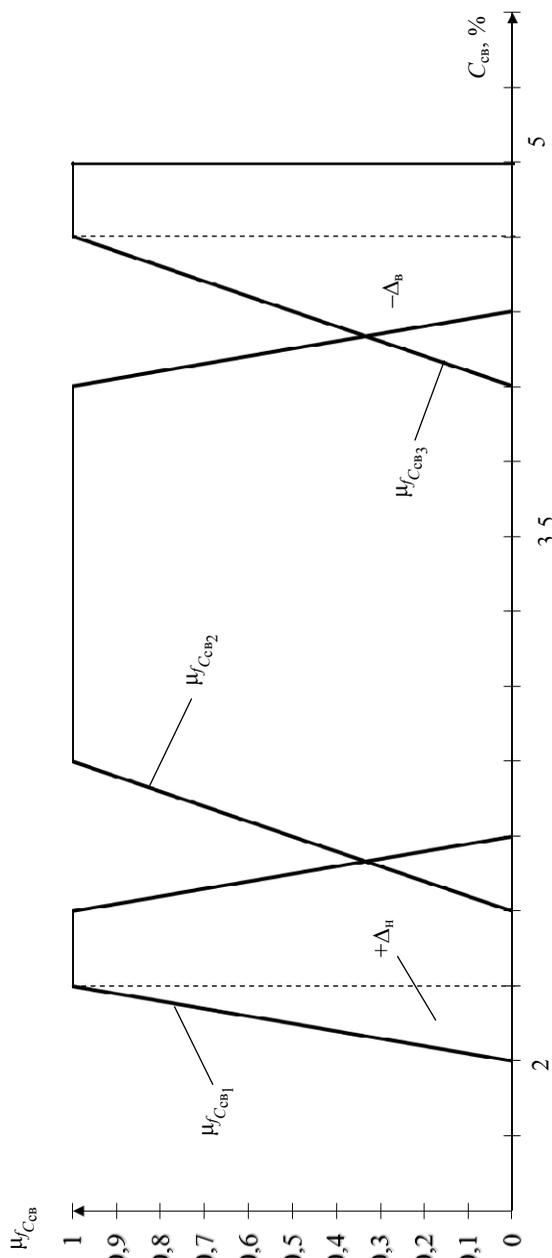


Рис. ПБ.2. Функция принадлежности нечётких множеств  $\mu_{C_{св}}$

Для концентрации связующего компонента  $C_{CB}$  соответствующие функции принадлежности описываются зависимостями:

$$\mu_{f_{C_{CB1}}}(C_{CB}) = \begin{cases} 0, C_{CB} < 2; \\ 4,53 \cdot 10^{-2} C_{CB}^2 - 1,52 \cdot 10^{-2} C_{CB} + 50,1 \cdot 10^{-2}, C_{CB} \in [2; 2,02]; \\ 1, C_{CB} \in [2,02; 2,39]; \\ 1,53 \cdot 10^{-2} C_{CB}^2 + 1,21 \cdot 10^{-2} C_{CB} - 73,3 \cdot 10^{-2}, C_{CB} \in [2,39; 2,61]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{C_{CB2}}}(C_{CB}) = \begin{cases} -2,51 \cdot 10^{-2} C_{CB}^2 + 9,75 \cdot 10^{-2} C_{CB} - 76,5 \cdot 10^{-2}, C_{CB} \in [2,41; 2,91]; \\ 1, C_{CB} \in [2,91; 4,22]; \\ -1,82 \cdot 10^{-2} C_{CB}^2 + 3,22 \cdot 10^{-2} C_{CB} - 44,3 \cdot 10^{-2}, C_{CB} \in [4,22; 4,35]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{C_{CB3}}}(C_{CB}) = \begin{cases} 1,14 \cdot 10^{-2} C_{CB}^2 + 5,32 \cdot 10^{-2} C_{CB} - 71,2, C_{CB} \in [4,21; 4,64]; \\ 1, C_{CB} \in [4,64; 5]. \end{cases}$$

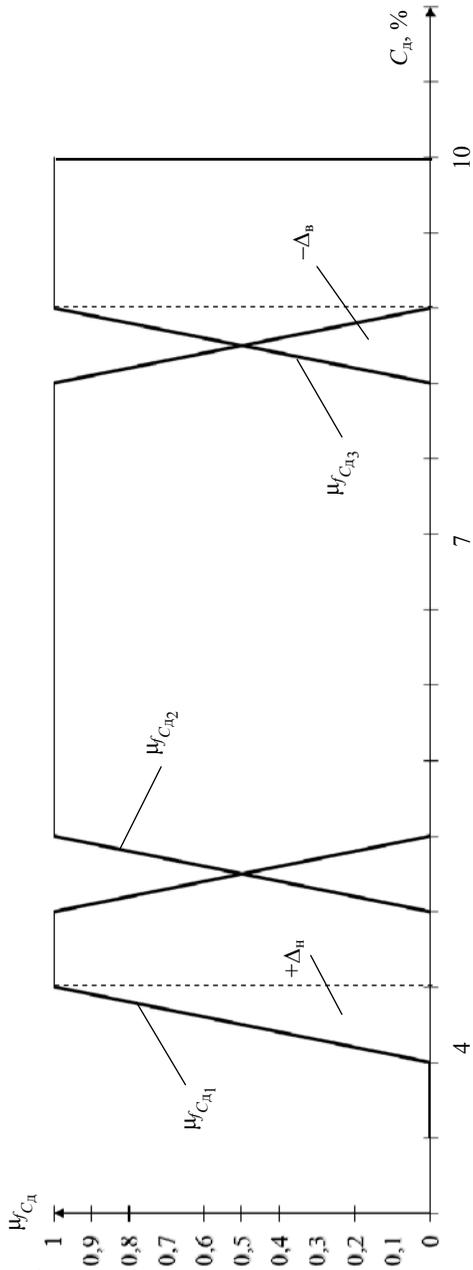


Рис. ПБ.3. Функция принадлежности нечётких множеств  $\mu_{C_{дв}}$

Для концентрации модифицирующих добавок  $C_d$  соответствующие функции принадлежности описываются зависимостями:

$$\mu_{f_{C_{d1}}}(C_d) = \begin{cases} 0, & C_d < 4; \\ 2,15 \cdot 10^{-2} C_d^2 - 4,22 \cdot 10^{-2} C_d + 53,3 \cdot 10^{-2}, & C_d \in [4; 4,9]; \\ 1, & C_d \in [4,9]; 5,45]; \\ 1,52 \cdot 10^{-2} C_d^2 + 3,73 \cdot 10^{-2} C_d - 86,3 \cdot 10^{-2}, & C_d \in [5,45; 5,58]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{C_{d2}}}(C_d) = \begin{cases} -1,25 \cdot 10^{-2} C_d^2 + 2,76 \cdot 10^{-2} C_d + 0,7683, & C_d \in [5,45; 5,58]; \\ 1, & C_{cb} \in [5,58; 8,12]; \\ -2,15 \cdot 10^{-2} C_d^2 + 25,5 \cdot 10^{-2} C_d - 3,48 \cdot 10^{-2}, & C_d \in [8,12; 8,61]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{C_{d3}}}(C_d) = \begin{cases} 4,41 \cdot 10^{-2} C_d^2 + 3,45 \cdot 10^{-2} C_d - 8,16 \cdot 10^{-2}, & C_d \in [8,12; 8,64]; \\ 1, & C_d \in [8,64; 10]. \end{cases}$$

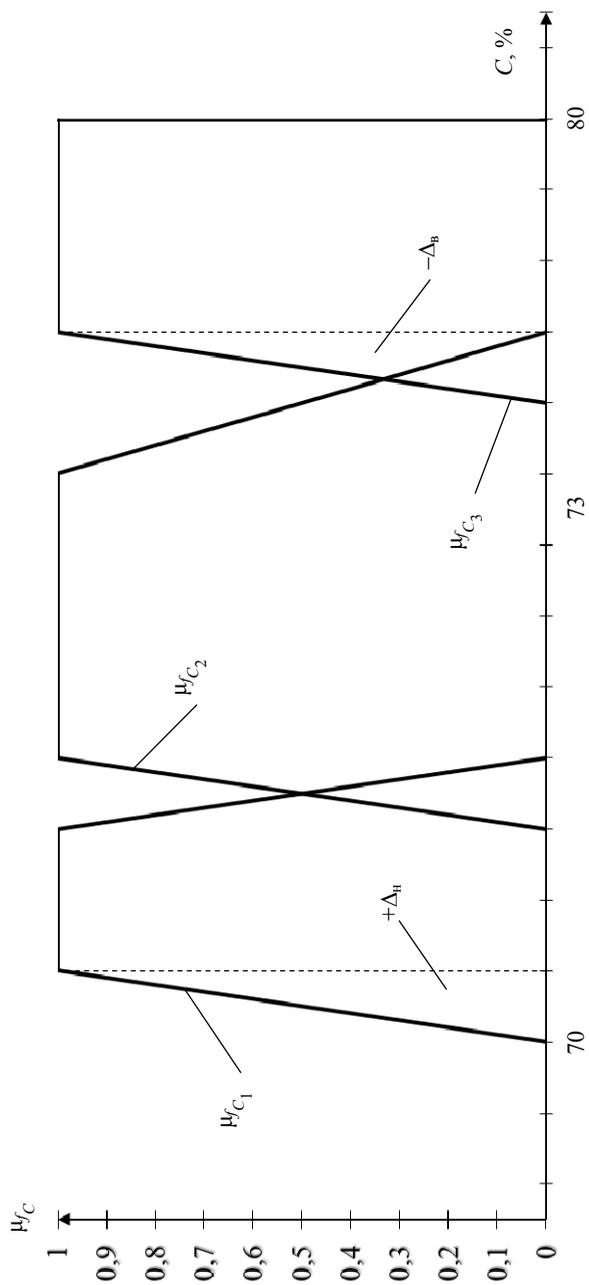


Рис. ПБ.4. Функция принадлежности нечётких множеств  $\mu_C$

Для концентрации исходных компонентов  $C$  соответствующие функции принадлежности описываются зависимостями:

$$\mu_{fC_1}(C) = \begin{cases} 0, & C < 70; \\ 5,41 \cdot 10^{-2} C^2 - 2,152 \cdot 10^{-2} C + 73,5 \cdot 10^{-2}, & C \in [70; 70,7]; \\ 1, & C \in [70,7; 72,2]; \\ 3,263 \cdot 10^{-2} C^2 + 2,121 \cdot 10^{-2} C - 93,1 \cdot 10^{-2}, & C \in [72,2; 73,3]; \end{cases}$$

$$\mu_{fC_2}(C) = \begin{cases} -2,91 \cdot 10^{-2} C^2 + 9,45 \cdot 10^{-2} C - 87,6 \cdot 10^{-2}, & C \in [72,2; 73,3]; \\ 1, & C \in [73,3; 77,7]; \\ -1,73 \cdot 10^{-2} C^2 + 3,22 \cdot 10^{-2} C + 44,3 \cdot 10^{-2}, & C \in [77,7; 79,9]; \end{cases}$$

$$\mu_{fC_3}(C) = \begin{cases} 2,15 \cdot 10^{-2} C^2 + 3,31 \cdot 10^{-2} C - 61,4 \cdot 10^{-2}, & C \in [78,862; 79,9]; \\ 1, & C \in [79,9; 80]. \end{cases}$$

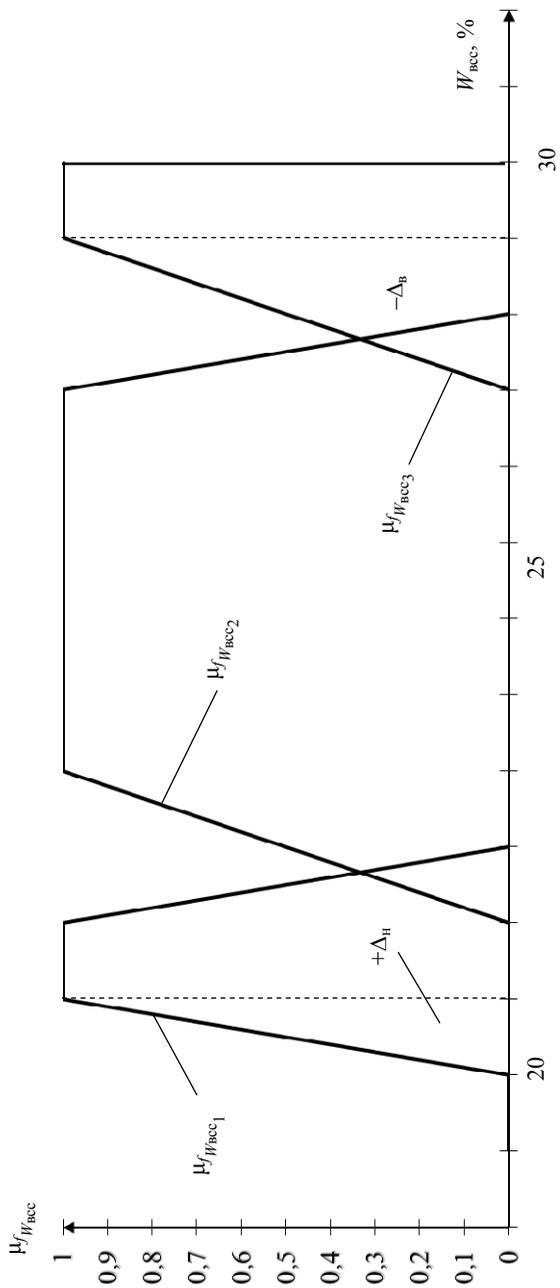


Рис. ПБ. 5. Функция принадлежности нечётких множеств  $\mu_{W_{\text{всес}}}$

Для влажности, фракционного и химического состава сырья  $W_{\text{всс}}$  соответствующие функции принадлежности описываются зависимостями:

$$\mu_{f_{W_{\text{всс}}}}(W_{\text{всс}}) = \begin{cases} 0, W_{\text{всс}} < 20; \\ 4,53 \cdot 10^{-2} W_{\text{всс}}^2 - 1,52 \cdot 10^{-2} W_{\text{всс}} + 50,16 \cdot 10^{-2}, W_{\text{всс}} \in [20; 20,5]; \\ 1, W_{\text{всс}} \in [20,5; 21,4]; \\ 1,54 \cdot 10^{-2} W_{\text{всс}}^2 + 1,22 \cdot 10^{-2} W_{\text{всс}} - 73,4 \cdot 10^{-2}, W_{\text{всс}} \in [21,4; 22,2]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{W_{\text{всс}2}}}(W_{\text{всс}}) = \begin{cases} -2,51 \cdot 10^{-2} W_{\text{всс}}^2 + 9,75 \cdot 10^{-2} W_{\text{всс}} - 76,5 \cdot 10^{-2}, W_{\text{всс}} \in [21,4; 22,2]; \\ 1, W_{\text{всс}} \in [22,2; 27,2]; \\ -1,82 \cdot 10^{-2} W_{\text{всс}}^2 + 3,22 \cdot 10^{-2} W_{\text{всс}} - 44,3 \cdot 10^{-2}, W_{\text{всс}} \in [27,2; 28,2]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{W_{\text{всс}3}}}(W_{\text{всс}}) = \begin{cases} 1,15 \cdot 10^{-2} W_{\text{всс}}^2 + 5,33 \cdot 10^{-2} W_{\text{всс}} - 71,2 \cdot 10^{-2}, W_{\text{всс}} \in [27,2; 28,5]; \\ 1, W_{\text{всс}} \in [28,5; 30]. \end{cases}$$

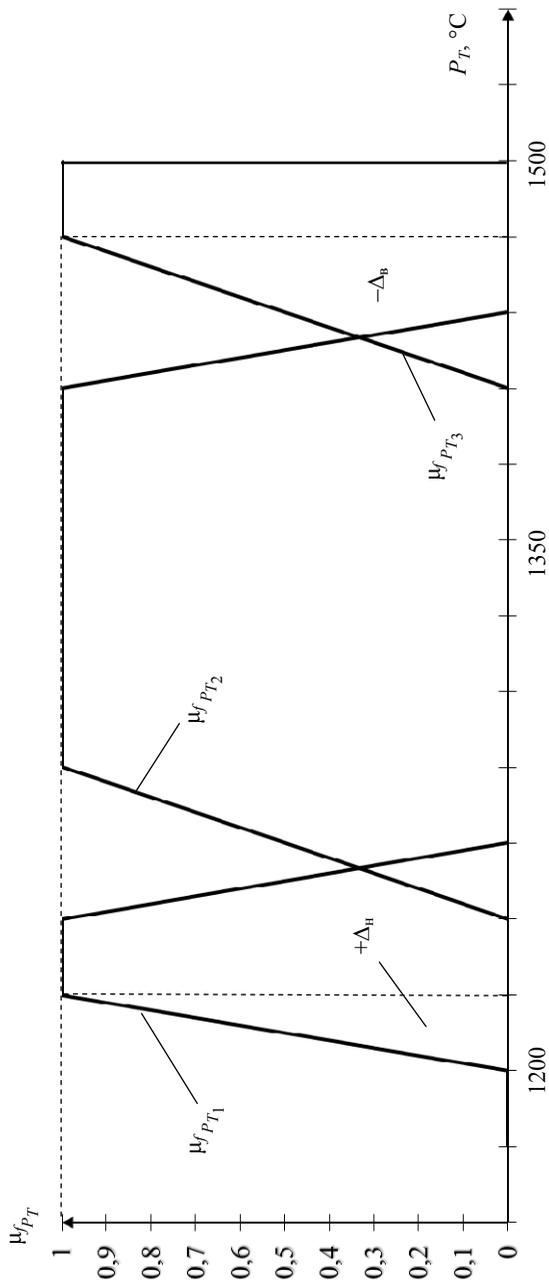


Рис. ПБ. 6. Функция принадлежности нечётких множеств  $\mu_{P_T}$

Для параметра термообработки  $P_T$  соответствующие функции принадлежности описываются зависимостями:

$$\mu_{f_{P_1}}(P_T) = \begin{cases} 0, P_T < 1200; \\ 2,11 \cdot 10^{-7} P_T^2 - 2,56 \cdot 10^{-4} P_T + 82,3 \cdot 10^{-2}, P_T \in [1200; 1245]; \\ 1, P_T \in [1245; 1265]; \\ 5,34 \cdot 10^{-7} P_T^2 + 4,52 \cdot 10^{-4} P_T - 79,8 \cdot 10^{-2}, P_T \in [1265; 1290]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{P_2}}(P_T) = \begin{cases} -1,55 \cdot 10^{-7} P_T^2 + 7,54 \cdot 10^{-3} P_T - 67,7 \cdot 10^{-2}, P_T \in [1265; 1290]; \\ 1, P_T \in [1290; 1420]; \\ -2,17 \cdot 10^{-7} P_T^2 + 2,71 \cdot 10^{-3} P_T - 23,8 \cdot 10^{-2}, P_T \in [1420; 1440]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{P_3}}(P_T) = \begin{cases} 5,14 \cdot 10^{-7} P_T^2 + 1,33 \cdot 10^{-2} P_T - 69,2 \cdot 10^{-2}, P_T \in [1420; 1485]; \\ 1, P_T \in [1485; 1500]. \end{cases}$$

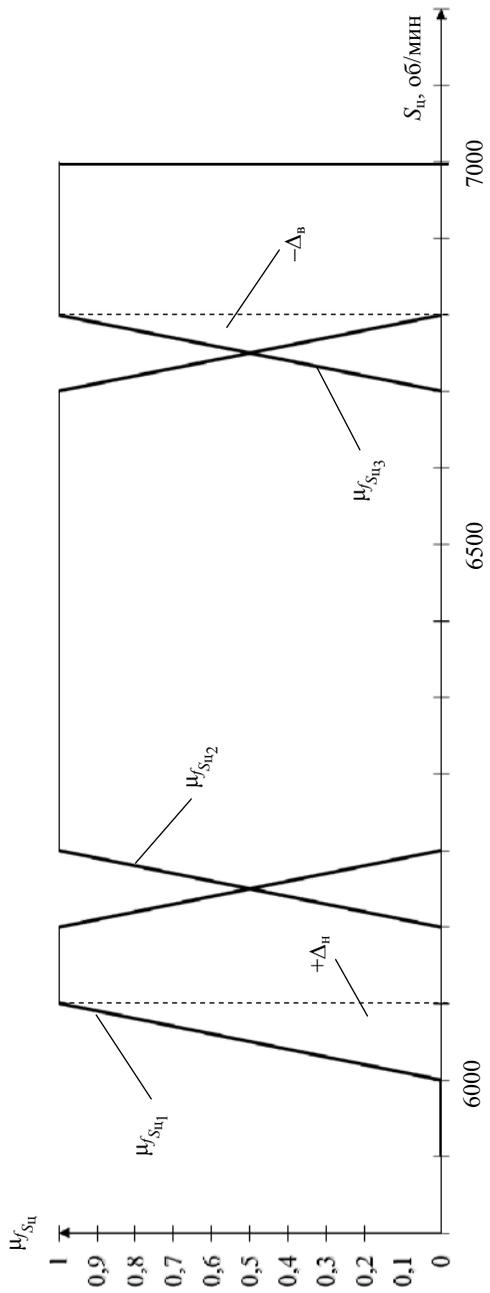


Рис. ПБ.7. Функция принадлежности нечётких множеств  $\mu_{S_{\text{н}}}$

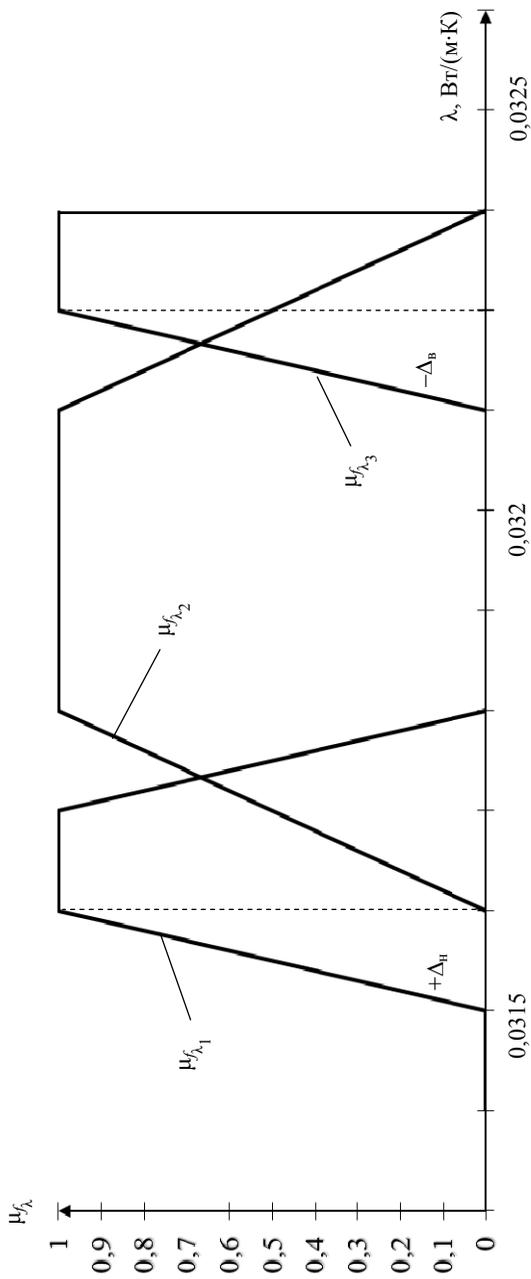
Для скорости вращения валков центрифуги  $S_{ц}$  соответствующие функции принадлежности описываются зависимостями:

$$\mu_{f_{S_{ц}}} (S_{ц}) = \begin{cases} 0, S_{ц} < 6000; \\ 2,16 \cdot 10^{-10} S_{ц}^2 - 4,156 \cdot 10^{-5} S_{ц} + 83,3 \cdot 10^{-2}, S_{ц} \in [6000; 6067]; \\ 1, S_{ц} \in [6067; 6140]; \\ 5,13 \cdot 10^{-10} S_{ц}^2 + 3,72 \cdot 10^{-5} S_{ц} - 96,1 \cdot 10^{-2}, S_{ц} \in [6140; 6213]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{S_{ц2}}} (S_{ц}) = \begin{cases} -1,32 \cdot 10^{-10} S_{ц}^2 + 2,61 \cdot 10^{-5} S_{ц} + 96,8 \cdot 10^{-2}, S_{ц} \in [6140; 6213]; \\ 1, S_{ц} \in [6213; 6720]; \\ -1,84 \cdot 10^{-10} S_{ц}^2 + 4,23 \cdot 10^{-5} S_{ц} - 34,8 \cdot 10^{-2}, S_{ц} \in [6720; 6793]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{S_{ц3}}} (S_{ц}) = \begin{cases} 4,12 \cdot 10^{-10} S_{ц}^2 + 3,51 \cdot 10^{-5} S_{ц} - 80,1 \cdot 10^{-2}, S_{ц} \in [6720; 6793]; \\ 1, S_{ц} \in [6793; 7000]. \end{cases}$$

**ФУНКЦИИ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ К ПОРОГУ ЗОНЫ ДОПУСКА  
ДЛЯ ОСНОВНЫХ ВИДОВ МИНЕРАЛОВАТНЫХ ПЛИТ**



**Рис. ПБ.8.** Функция принадлежности нечётких множеств  $\mu_\lambda$  для материала изолайт

Соответствующие функции принадлежности описываются зависимостями:

$$\mu_{f_{\lambda_1}}(\lambda) = \begin{cases} 0, \lambda < 0,0317; \\ 2,46 \cdot 10^{-2} \lambda^2 - 4,38 \cdot 10^{-2} \lambda + 8,71 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,0317; 0,0320]; \\ 1, \lambda \in [0,0320; 0,03203]; \\ 5,52 \cdot 10^{-3} \lambda^2 - 60,5 \cdot 10^{-2} \lambda + 75,1 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,03203; 0,03205]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{\lambda_2}}(\lambda) = \begin{cases} -22,3 \cdot 10^{-2} \lambda^2 + 32,5 \cdot 10^{-2} \lambda + 22,1 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,03203; 0,03205]; \\ 1, \lambda \in [0,03205; 0,03208]; \\ 4,73 \cdot 10^{-3} \lambda^2 - 48,6 \cdot 10^{-2} \lambda + 75,6 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,03208; 0,03209]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{\lambda_3}}(\lambda) = \begin{cases} 1,33 \cdot 10^{-2} \lambda^2 + 34,3 \cdot 10^{-2} \lambda + 8,84 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,03208; 0,03209]; \\ 1, \lambda \in [0,03209; 0,0323]. \end{cases}$$

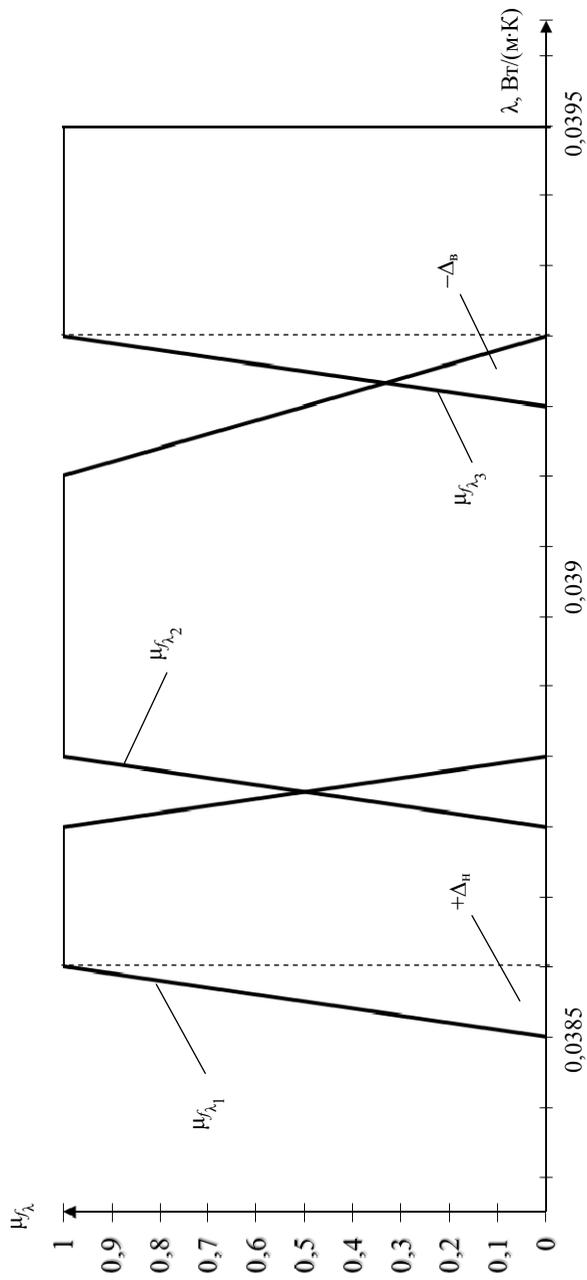


Рис. ПБ.9. Функция принадлежности нечётких множеств  $\mu_{\lambda}$  для материала изофас-ЛМ

Соответствующие функции принадлежности описываются зависимостями:

$$\mu_{f_{\lambda_1}}(\lambda) = \begin{cases} 0, \lambda < 0,0387; \\ 2,77 \cdot 10^{-2} \lambda^2 - 3,68 \cdot 10^{-7} \lambda + 7,39 \cdot 10^{-7}, \lambda \in [0,0387; 0,03900]; \\ 1, \lambda \in [0,03900; 0,03902]; \\ 7,51 \cdot 10^{-3} \lambda^2 - 50,55 \cdot 10^{-3} \lambda + 53,1 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,03902; 0,03904]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{\lambda_2}}(\lambda) = \begin{cases} -12,5 \cdot 10^{-2} \lambda^2 + 24,7 \cdot 10^{-2} \lambda + 11,2 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,03902; 0,03904]; \\ 1, \lambda \in [0,03904; 0,03907]; \\ 2,93 \cdot 10^{-3} \lambda^2 - 36,8 \cdot 10^{-2} \lambda + 69,5 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,03907; 0,03908]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{\lambda_3}}(\lambda) = \begin{cases} 1,51 \cdot 10^{-2} \lambda^2 + 28,1 \cdot 10^{-2} \lambda + 7,73 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,03907; 0,03908]; \\ 1, \lambda \in [0,03908; 0,0394]. \end{cases}$$

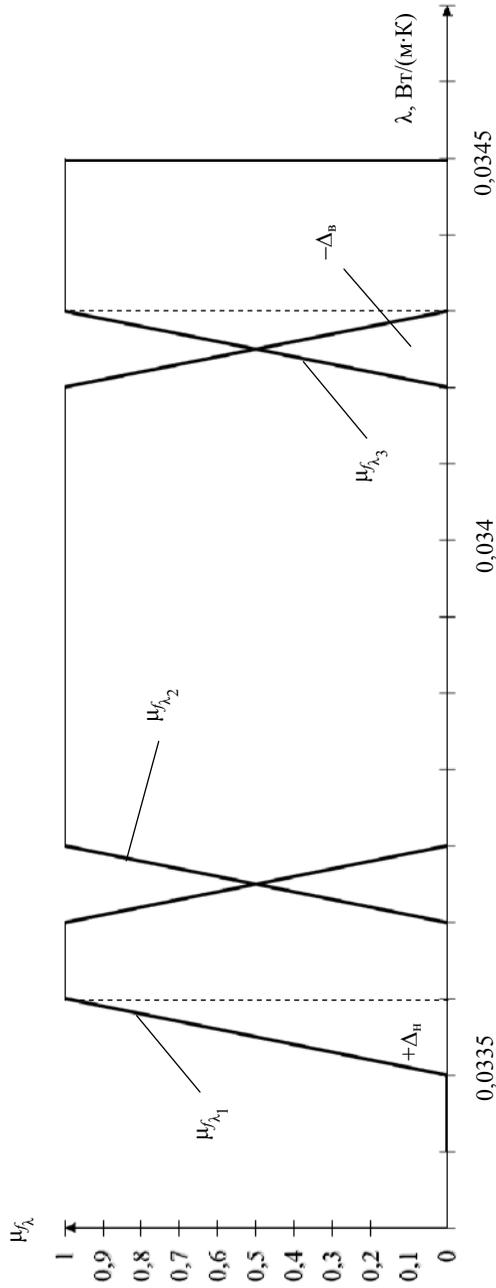


Рис. ПБ.10. Функция принадлежности нечётких множеств  $\mu_\lambda$  для материала изофас

Соответствующие функции принадлежности описываются зависимостями:

$$\mu_{f_{\lambda_1}}(\lambda) = \begin{cases} 0, \lambda < 0,0337; \\ 2,46 \cdot 10^{-2} \lambda^2 - 4,39 \cdot 10^{-2} \lambda + 8,71 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,0337; 0,03401]; \\ 1, \lambda \in [0,03401; 0,03403]; \\ 5,57 \cdot 10^{-3} \lambda^2 - 60,5 \cdot 10^{-2} \lambda + 75,1 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,03403; 0,03405]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{\lambda_2}}(\lambda) = \begin{cases} -22,3 \cdot 10^{-2} \lambda^2 + 32,6 \cdot 10^{-2} \lambda + 22,1 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,03403; 0,03405]; \\ 1, \lambda \in [0,03405; 0,03408]; \\ 4,74 \cdot 10^{-3} \lambda^2 - 48,6 \cdot 10^{-2} \lambda + 75,6 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,03408; 0,03409]; \end{cases}$$

$$\mu_{f_{\lambda_3}}(\lambda) = \begin{cases} 1,33 \cdot 10^{-2} \lambda^2 + 34,3 \cdot 10^{-2} \lambda + 88,4 \cdot 10^{-2}, \lambda \in [0,03408; 0,03409]; \\ 1, \lambda \in [0,03409; 0,03443]. \end{cases}$$

**ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
И МОНИТОРИНГА РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

**АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
И МОНИТОРИНГА РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

1. Сравнение чисел с реальными допустимыми значениями для каждого контролируемого режимного параметра (индикация процесса контроля на дисплее интеллектуальной информационно-измерительной системы (ИИИС)).
2. Сравнение  $C$  с  $C_{\text{доп}}$ .
3. Если  $C \in C_{\text{доп}}$ , то продолжается контроль следующего режимного параметра. Если нет, то параметр корректируется на оборудовании для подготовки сырья (ОПС).
4. Сравнение  $W_{\text{vs}}$  с  $W_{\text{vs доп}}$ .
5. Если  $W_{\text{vs}} \in W_{\text{vs доп}}$ , то продолжается контроль. Если нет, то параметр корректируется на ОПС.
6. Сравнение  $C_d$  с  $C_{d \text{ доп}}$ .
7. Если  $C_d \in C_{d \text{ доп}}$ , то продолжается контроль. Если нет, то происходит коррекция параметра на оборудовании для формирования волокна (ОФВ).
8. Сравнение  $C_{SK}$  с  $C_{SK \text{ доп}}$ .
9. Если  $C_{SK} \in C_{SK \text{ доп}}$ , то продолжается контроль. Если нет, то происходит коррекция параметра на ОФВ.
10. Сравнение  $V_{OS}$  с  $V_{OS \text{ доп}}$ .
11. Если  $V_{OS} \in V_{OS \text{ доп}}$ , то продолжается контроль. Если нет, то параметр корректируется в устройстве климат-контроля (УКК).
12. Сравнение  $T_{OS}$  с  $T_{OS \text{ доп}}$ .
13. Если  $T_{OS} \in T_{OS \text{ доп}}$ , то продолжается контроль следующего параметра. Если нет, то параметр корректируется в УКК.
14. Сравнение  $S_C$  с  $S_{C \text{ доп}}$ .
15. Если  $S_C \in S_{C \text{ доп}}$ , то продолжается контроль. Если нет, то происходит коррекция параметра на центрифуге.
16. Сравнение  $T$  с  $T_{\text{доп}}$ .

17. Если  $T \in T_{\text{доп}}$ , то контроль режимных параметров закончен (индикация на дисплее «режимные параметры в норме»). Если нет, то происходит коррекция параметра в камере термообработки и весь материал отправляется заново на переработку.

18. Контроль температуры ( $T_{in}$ ) в области контакта измерительного зонда и исследуемого материала (индикация на дисплее ИИИС).

19. Сравнение  $T_{in}(x_n, \tau_i)$  с  $\varepsilon_{\text{зад}}$ , где  $x_n$  – расстояние от датчика температуры до нагревателя,  $\tau_i$  – текущее время,  $\varepsilon_{\text{зад}}$  – заданное пороговое значение температуры.

20. Если  $T_{in} > \varepsilon_{\text{зад}}$ , то продолжается контроль  $T_{in}$ .

21. Если  $T_{in} \leq \varepsilon_{\text{зад}}$ , то измерительный зонд помещают на исследуемый материал.

22. Осуществляется тепловое воздействие на исследуемый материал с помощью линейного нагревателя при подаче на него импульсов нагрева заданной мощности (индикация процесса нагрева на дисплее ИИИС).

23. Регистрация и запись в память микроконтроллера термограммы по данным датчиков температуры в области измерения (области контакта измерительного зонда и исследуемого материала).

24. Отключение подаваемых импульсов нагрева на исследуемый материал.

25. Запись в память контролируемых информационных параметров – температур  $T_n(x_i, \tau_i)$  и  $T_m(x_i, \tau_i)$ .

26. Расчёт по температурно-временным характеристикам  $T_n(x_i, \tau_i)$ ,  $T_m(x_i, \tau_i)$  параметров теплофизических свойств материалов – коэффициентов теплопроводности ( $\lambda$ ) и температуропроводности ( $\alpha$ ) (индикация  $\lambda$  и  $\alpha$  на дисплее ИИИС).

27. Расчёт относительной погрешности ( $\delta$ ) определения  $\lambda$  и  $\alpha$  (индикация  $\delta_\lambda$   $\delta_\alpha$  на дисплее ИИИС).

28. Ввести значение плотности ( $\rho$ ) для исследуемого материала.

29. Расчёт теплоёмкости ( $C$ ) (индикация на дисплее ИИИС).

30. Расчёт математического ожидания ( $M$ ) (индикация на дисплее ИИИС).

31. Расчёт среднеквадратической погрешности ( $\sigma$ ) (индикация на дисплее ИИИС).

32. Расчёт предельных абсолютной и относительной погрешностей  $\lambda$  и  $\alpha$  ( $\Delta_{\text{пред}} \lambda_j$ ,  $\Delta_{\text{пред}} \alpha_j$ ) (индикация на дисплее ИИИС).

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ ИИИС

1. Допустимые значения режимных параметров.

### ПВ. 1. Допустимые значения режимных параметров

Режимный параметр	Допусковое значение	
	Нижняя граница	Верхняя граница
	$x_{HA+1\%(PI)}$	$x_{BA-1\%(PI)}$
$C$	70,7000	79,2000
$W_{всс}$	20,2000	29,7000
$C_d$	4,0400	9,9000
$C_{св}$	2,0200	4,9500
$V_{ос}$	48,4800	59,4000
$T_{ос}$	18,1800	20,7900
$P_T$	1212	1485
$S_{ц}$	6060	6930

2. Формулы для расчёта  $\lambda$ ,  $\alpha$  и теплоёмкости  $C$ :

$$\alpha = K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right);$$

$$\lambda = \frac{1}{T_m} K_3 \ln(K_4 \alpha),$$

где 
$$K_1 = \frac{\alpha_1}{\exp\left(K_2 \frac{T_{n1}}{T_{m2}}\right)}; \quad K_2 = \frac{\ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{\frac{T_{n2}}{T_{m2}} - \frac{T_{n1}}{T_{m1}}}; \quad K_3 = \frac{\lambda_1 T_{m1}}{\ln(K_4 \alpha_1)};$$

$$K_4 = \exp\left[\frac{\ln \alpha_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{T_{m1}}{T_{m2}} \ln \alpha_2}{\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{T_{m1}}{T_{m2}} - 1}\right]; \quad \alpha_1 = 1,09 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \alpha_2 = 4,61 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda_1 = 0,195 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}); \quad \lambda_2 = 0,028 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}); \quad C = \frac{\lambda}{\rho \alpha}.$$

3. Математические зависимости для выполнения метрологического анализа:

а) относительные погрешности  $\lambda$  и  $\alpha$ :

$$\delta_\lambda = \frac{\Delta\lambda_{\text{изм}}}{\lambda_{\text{эТ}}} \cdot 100\%, \quad \delta_\alpha = \frac{\Delta\alpha_{\text{изм}}}{\alpha_{\text{эТ}}} \cdot 100\%;$$

б) математическое ожидание

$$M[\Delta\alpha_j] = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta\alpha_j,$$

где  $m$  – число экспериментов,

$$M[\Delta\lambda_j] = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta\lambda_j;$$

в) среднеквадратическая погрешность

$$\sigma[\Delta\alpha_j] = \left[ \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\Delta\alpha_j - M[\Delta\alpha_j])^2 \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$\sigma[\Delta\lambda_j] = \left[ \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\Delta\lambda_j - M[\Delta\lambda_j])^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

г) предельные абсолютные и относительные погрешности  $\alpha$  и  $\lambda$

$$\Delta_{\text{пред}}\alpha_j = M[\Delta\alpha_j] + t_{\alpha, n-1} \sigma[\Delta\alpha_j];$$

$$\Delta_{\text{пред}}\lambda_j = M[\Delta\lambda_j] + t_{\alpha, n-1} \sigma[\Delta\lambda_j];$$

$$\delta_{\text{пред}}\alpha_j = \frac{\Delta_{\text{пред}}\alpha_j}{\alpha_j};$$

$$\delta_{\text{пред}}\lambda_j = \frac{\Delta_{\text{пред}}\lambda_j}{\lambda_j},$$

где  $t_{\alpha, n-1}$  – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  и количестве измерений  $n - 1$ .

## БЛОК-СХЕМА ПРОГРАММЫ

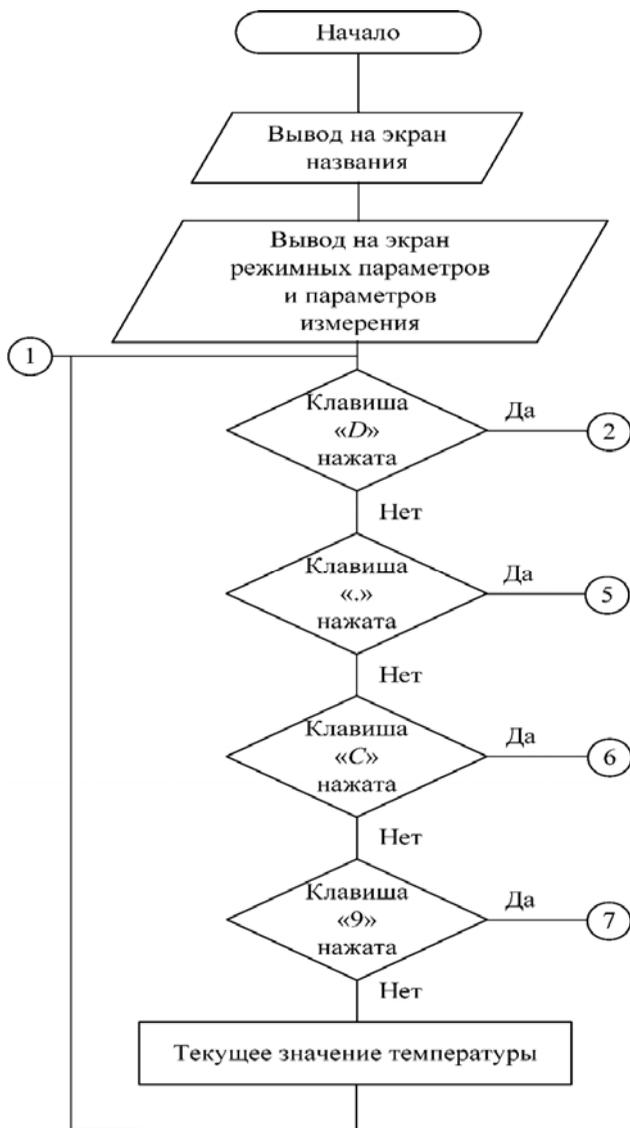


Рис. ПВ.1. Блок-схема программы реализации алгоритма функционирования интеллектуальной информационно-измерительной системы и мониторинга режимных параметров

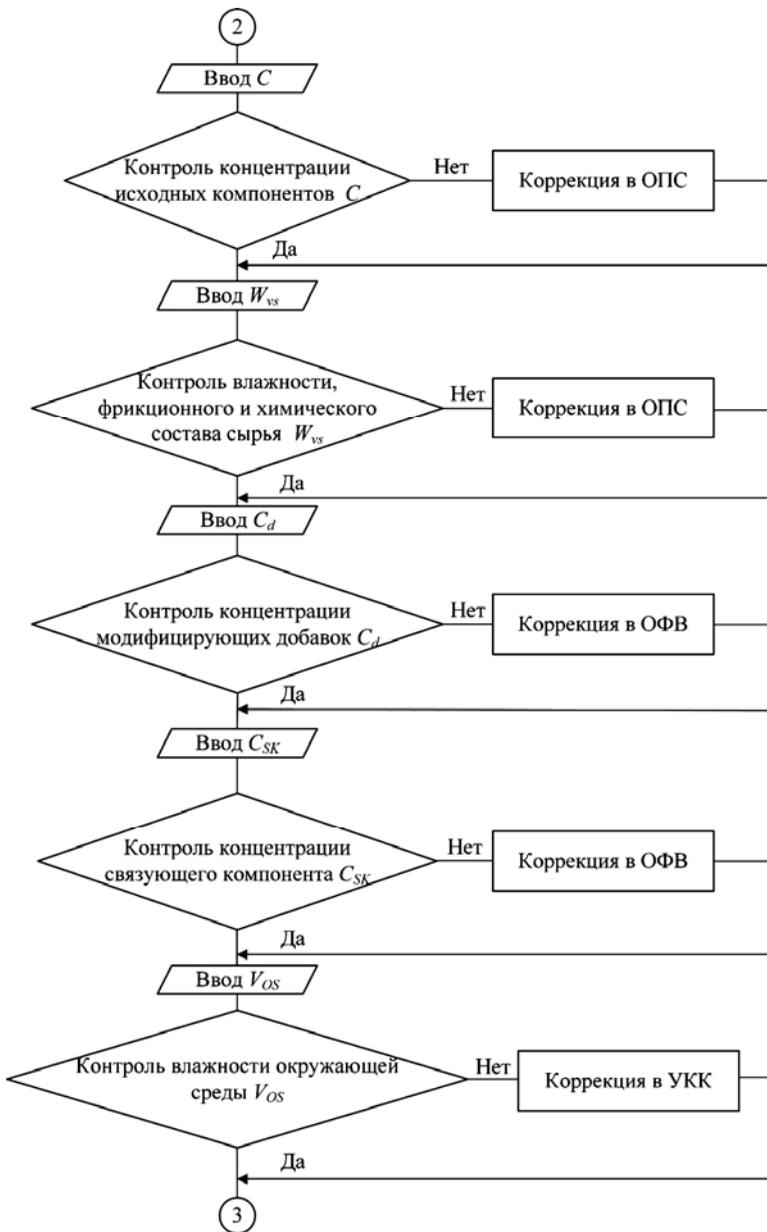


Рис. ПВ.1 (продолжение)

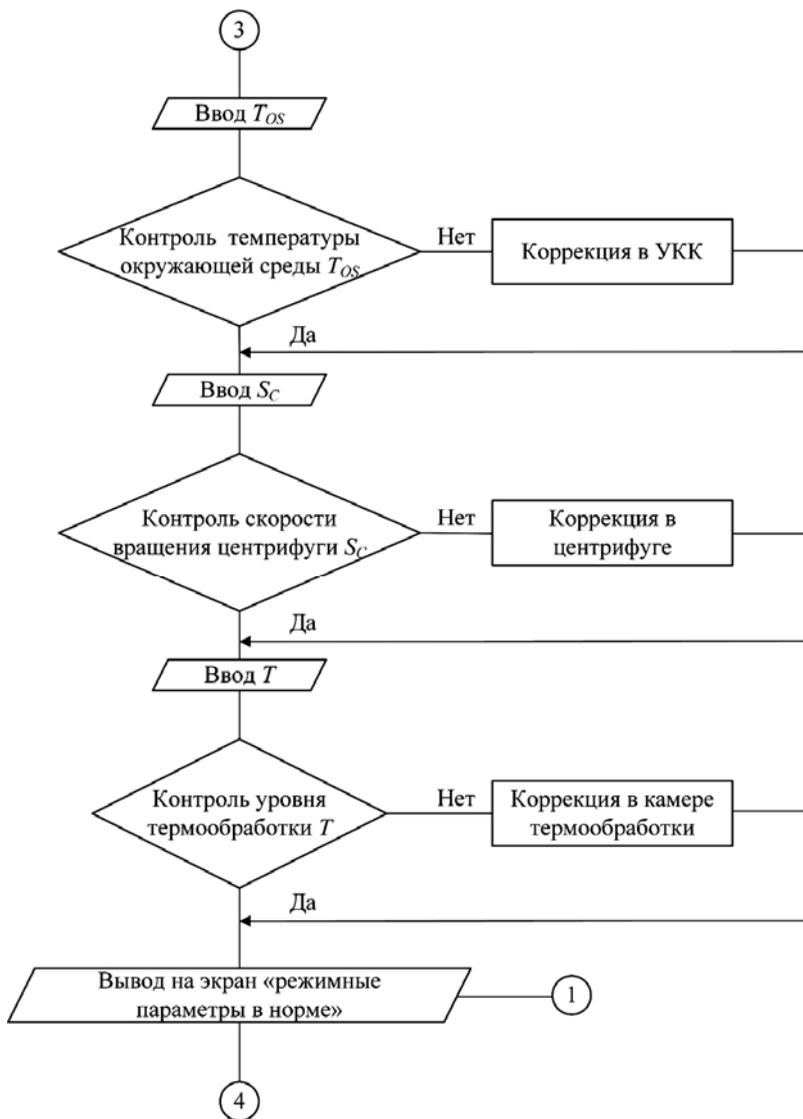


Рис. ПВ.1 (продолжение)

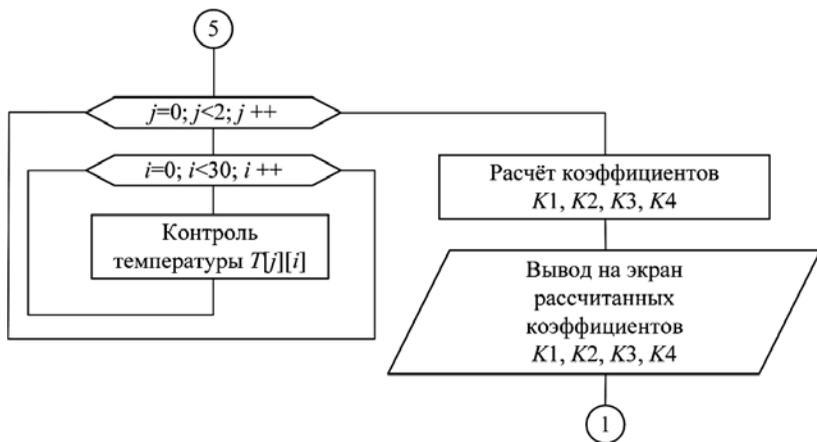
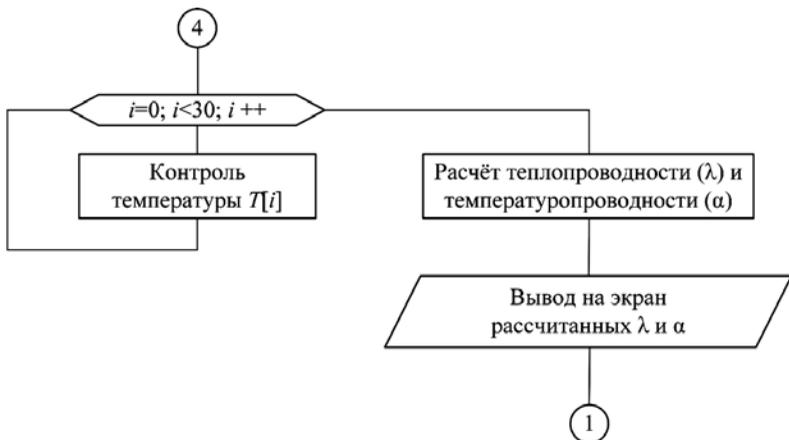


Рис. ПВ.1 (продолжение)

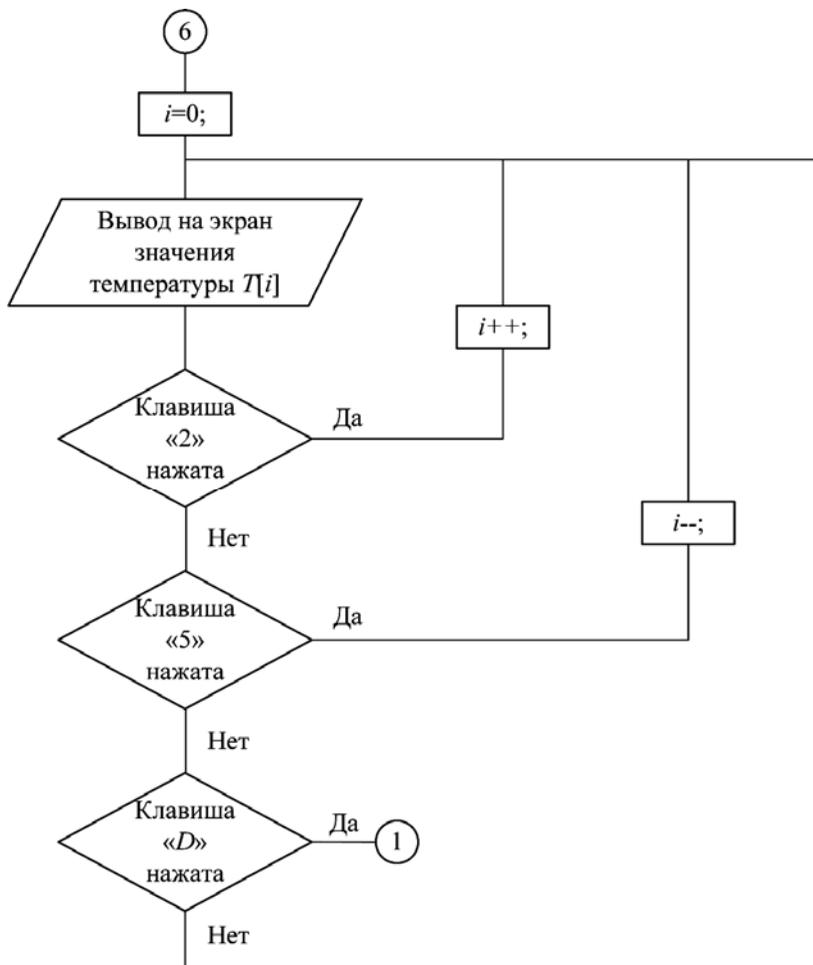


Рис. ПВ.1 (продолжение)

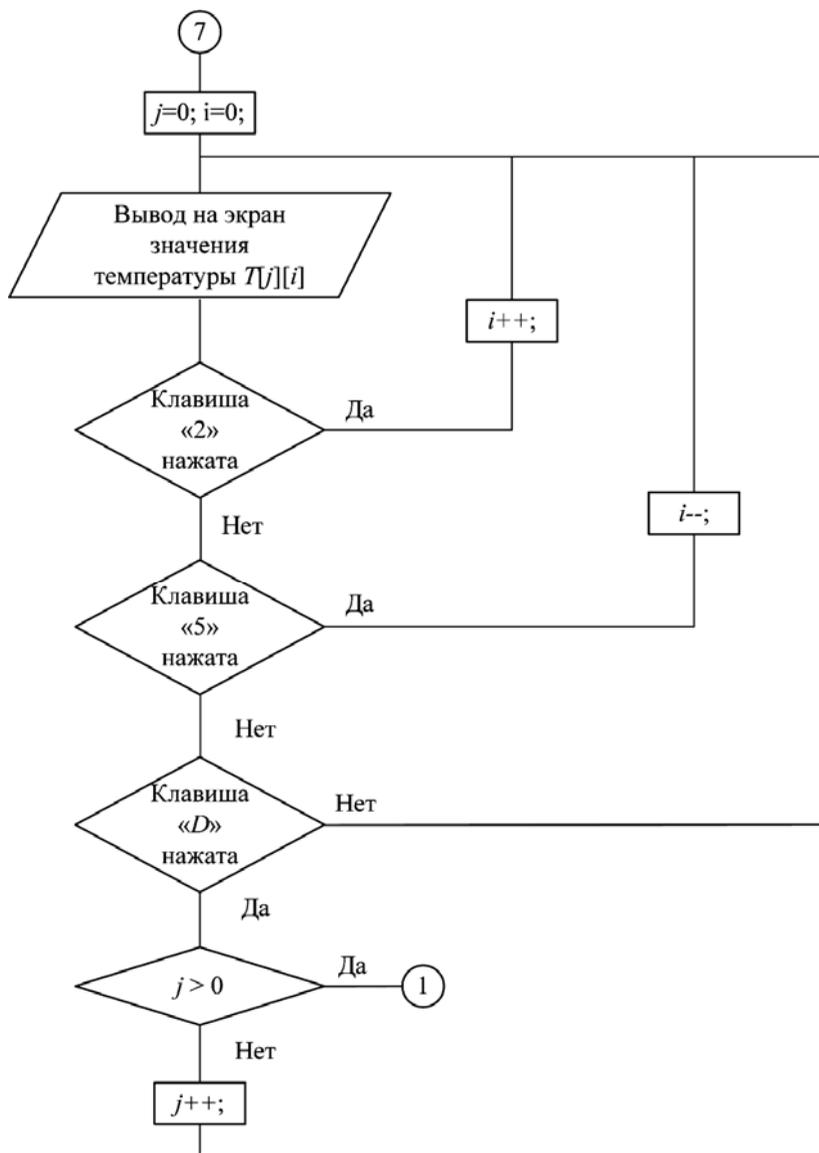


Рис. ПВ.1 (окончание)

## ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Производственные погрешности режимных параметров исследуются в работе статистическими методами. При этом устанавливаются закономерности распределения этих погрешностей. Применение статистических характеристик (средних арифметических значений, средних квадратичных отклонений, кривых распределения отклонений) обусловлено тем, что производственные погрешности режимных параметров – это случайные величины, которые определяются на основе математической статистики и теории вероятности. Для построения кривой распределения замеряется режимный параметр  $A$  в количестве  $N = 20$  шт. Пример гистограммы и полигона распределения погрешностей для концентрации исходных компонентов ( $C$ ) представлен на рис. ПГ.1.

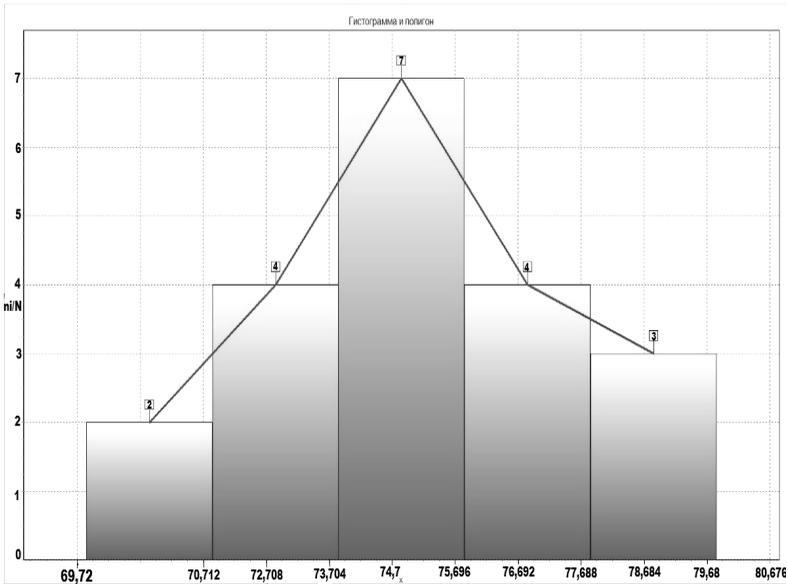


Рис. ПГ.1. Гистограмма и полигон распределения погрешностей  $C$

Замеренный параметр  $A$  разбивается на равные интервалы и считается число параметров  $n$  в каждом интервале. Определяется частота повторений отклонений параметров в партии  $n/N$ . После этого строится гистограмма и полигон распределения погрешностей. Определяется характер кривой распределения исходя из критериев подобия Колмогорова. Вид кривой распределения зависит от вида погрешностей. Например, случайная погрешность подчиняется закону нормального распределения Гаусса.

Пример гистограммы и полигона распределения погрешностей для концентрации модифицирующих добавок ( $C_d$ ) представлен на рис. ПГ.2.

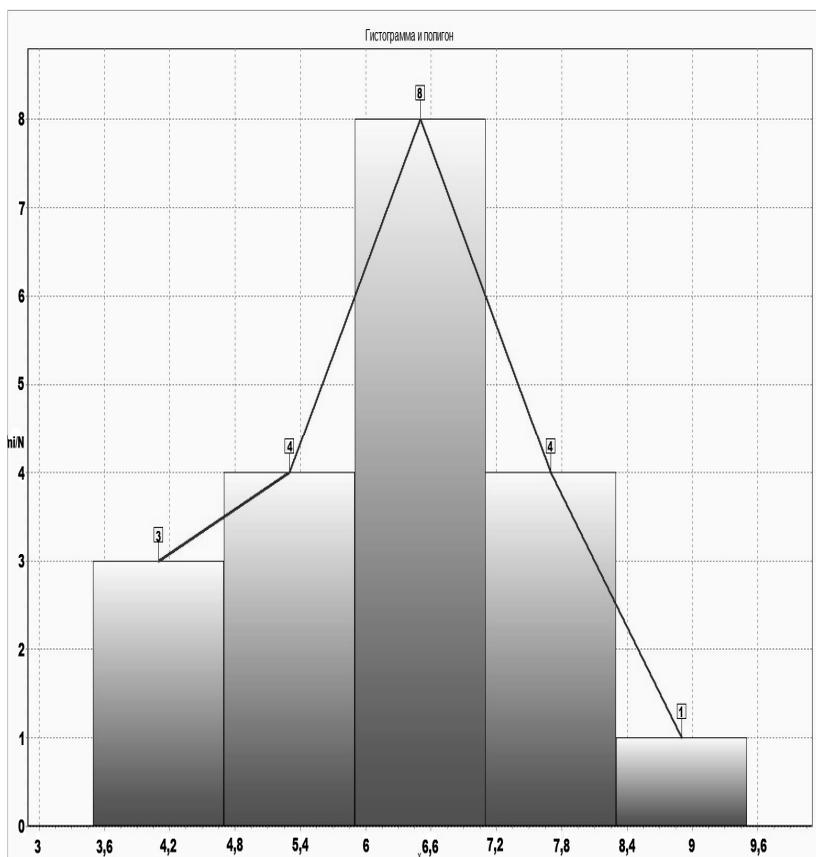


Рис. ПГ.2. Гистограмма и полигон распределения погрешностей  $C_d$

Пример гистограммы и полигона распределения погрешностей для концентрации связующего компонента ( $C_{св}$ ) представлен на рис. ПГ.3.

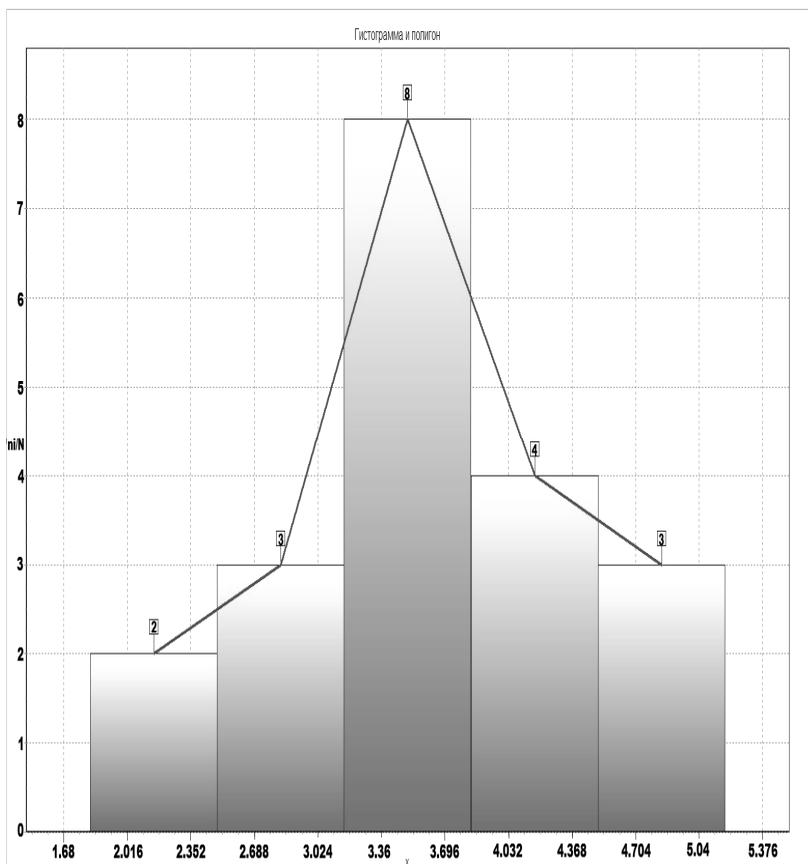


Рис. ПГ.3. Гистограмма и полигон распределения погрешностей  $C_{св}$

Пример гистограммы и полигона распределения погрешностей для влажности, фракционного и химического состава сырья ( $W_{вс}$ ) представлен на рис. ПГ.4.

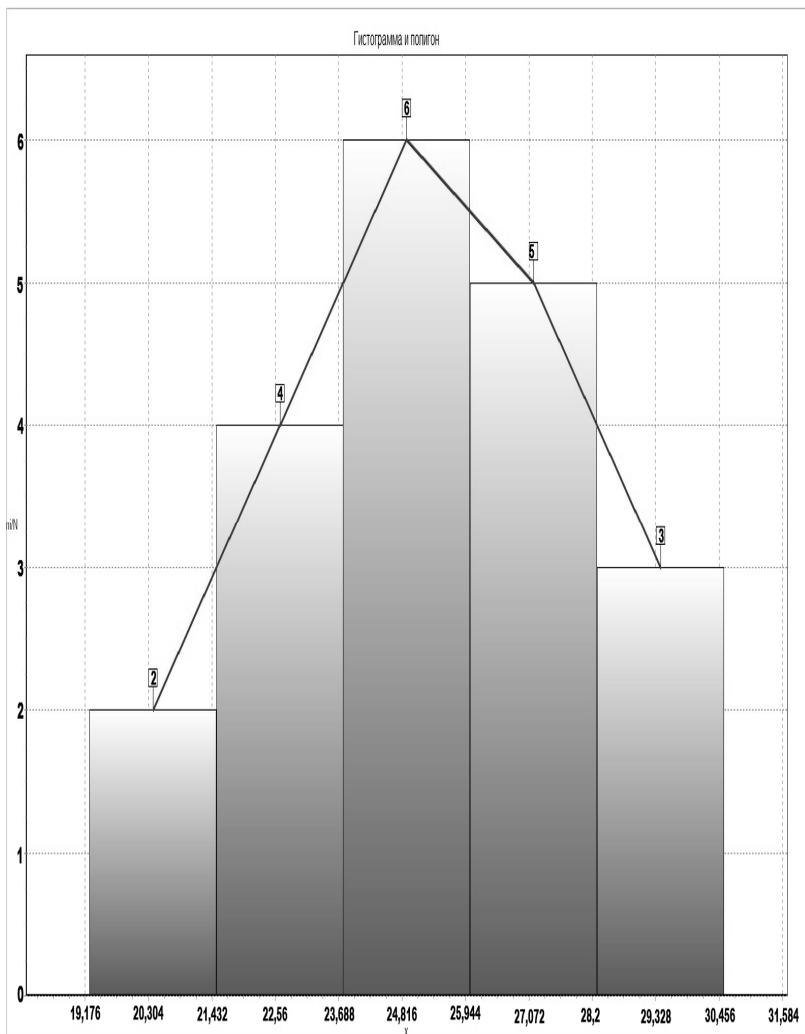


Рис. ПГ.4. Гистограмма и полигон распределения погрешностей  $W_{вс}$

Пример гистограммы и полигона распределения погрешностей для параметра термообработки ( $P_T$ ) представлен на рис. ПГ.5.

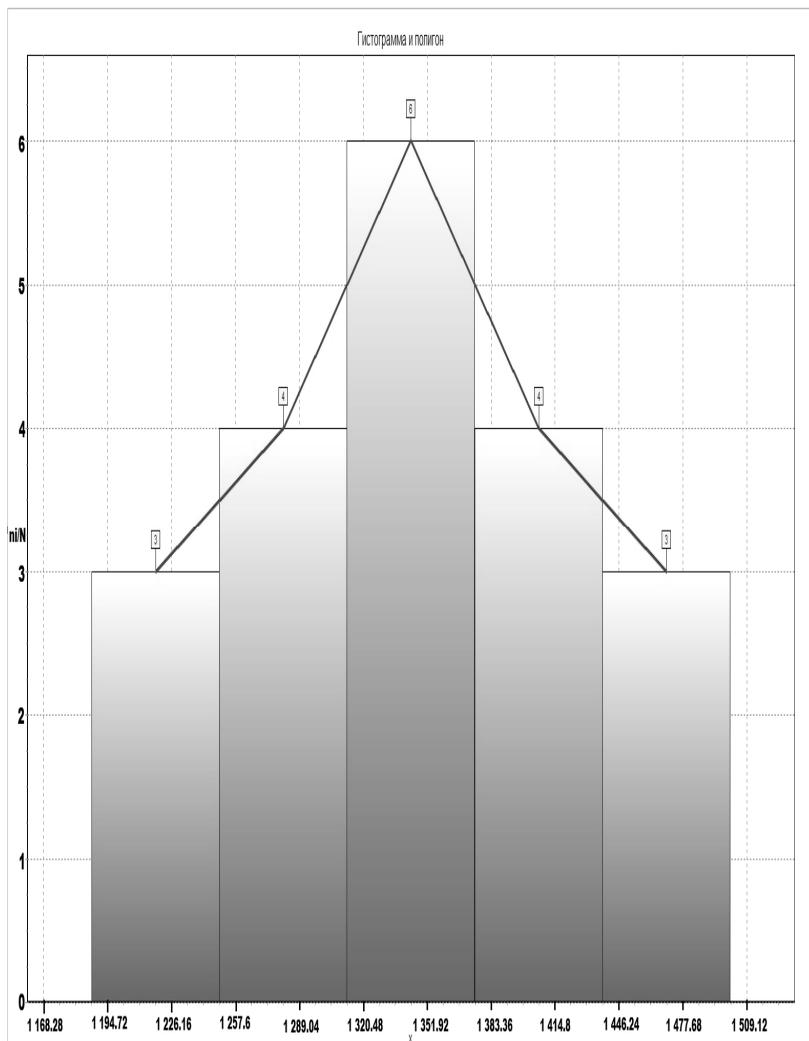


Рис. ПГ.5. Гистограмма и полигон распределения погрешностей  $P_T$

Пример гистограммы и полигона распределения погрешностей для скорости вращения валков центрифуги ( $S_{ц}$ ) представлен на рис. ПГ.6.

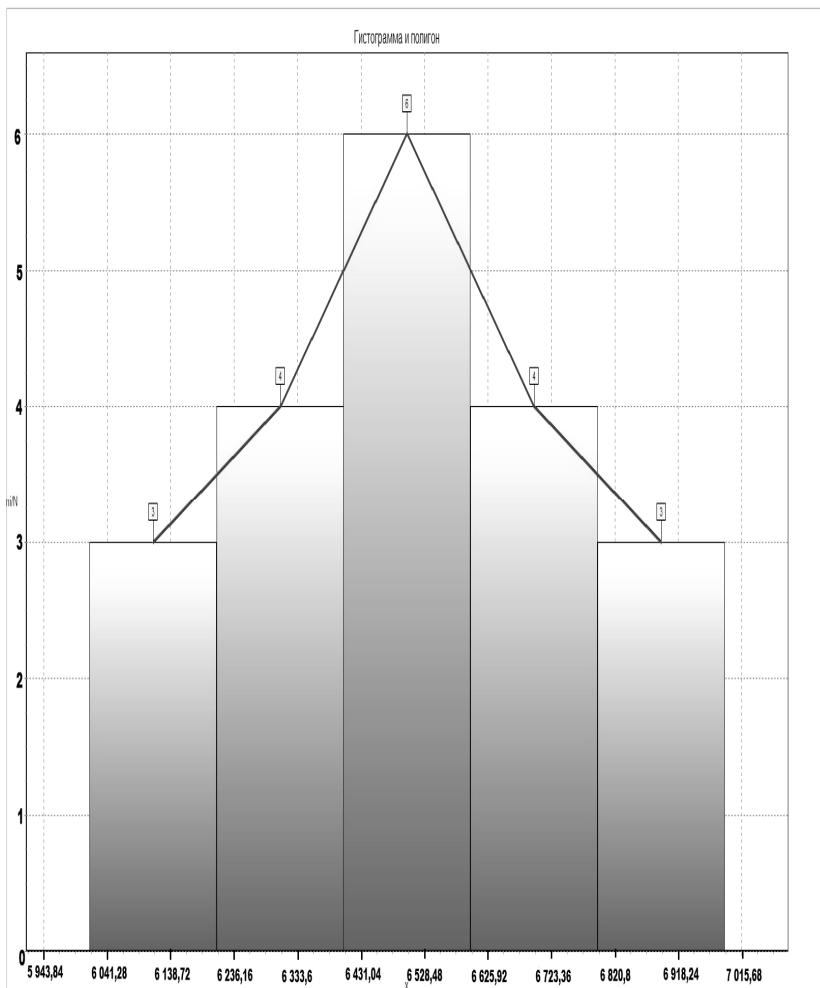


Рис. ПГ.6. Гистограмма и полигон распределения погрешностей  $S_{ц}$

Пример гистограммы и полигона распределения погрешностей для температуры окружающей среды ( $T_{oc}$ ) в помещении представлен на рис. ПГ.7.

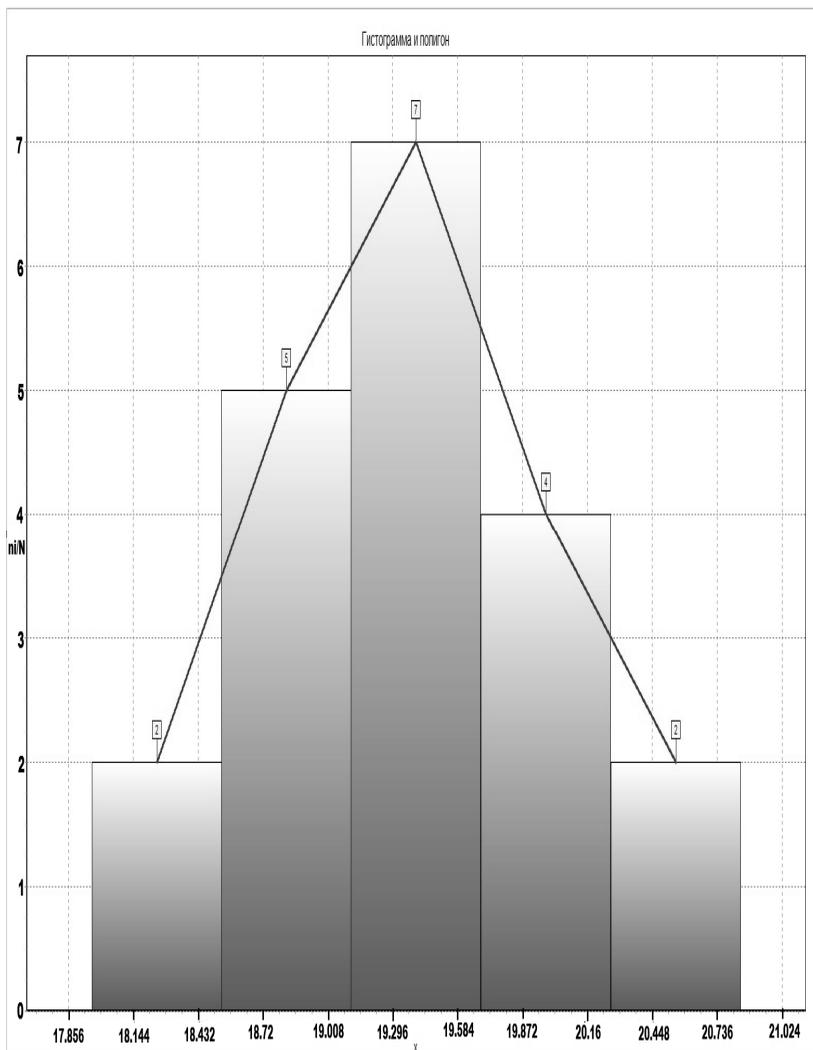


Рис. ПГ.7. Гистограмма и полигон распределения погрешностей  $T_{oc}$

Пример гистограммы и полигона распределения погрешностей для относительной влажности ( $V_{oc}$ ) в помещении представлен на рис. ПГ.8.

Статистическая обработка и построение гистограмм и полигонов распределения погрешностей для режимных параметров осуществлялись с использованием персонального компьютера с помощью программы *Stat.exe*.

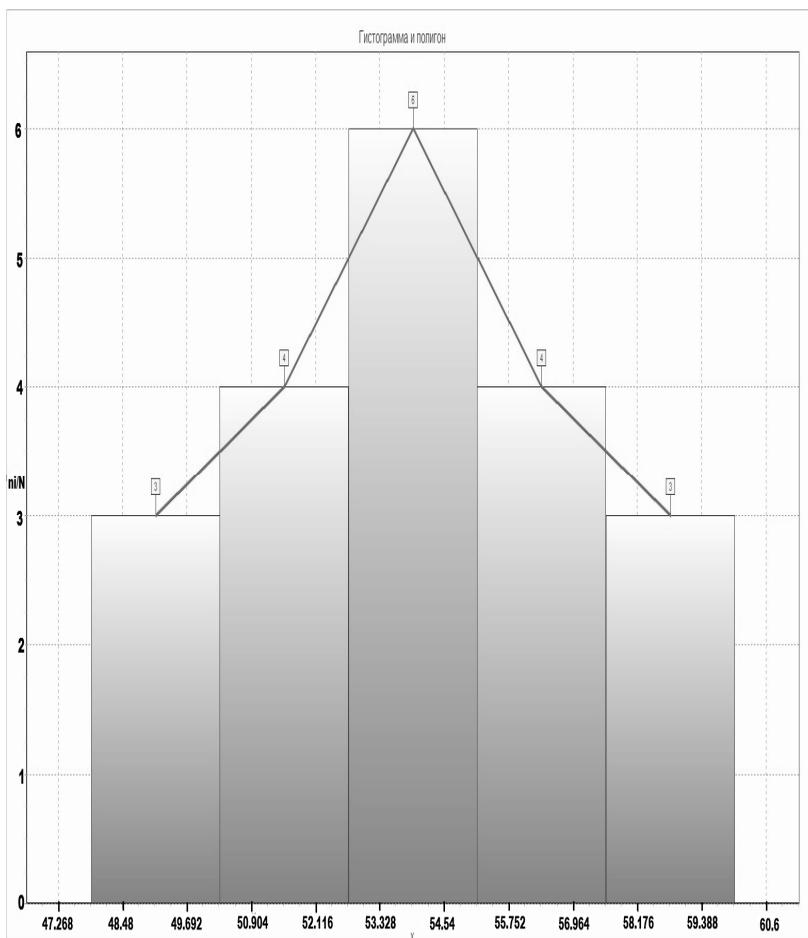


Рис. ПГ.8. Гистограмма и полигон распределения погрешностей  $V_{oc}$

## СОДЕРЖАНИЕ

---

---

ВВЕДЕНИЕ .....	3
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	10
1. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯ- ЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	15
<b>1.1. Методы и средства неразрушающего контроля         теплофизических свойств твёрдых материалов ...</b>	15
<b>1.2. Информационно-измерительные системы         для контроля теплопроводности теплоизоля-         ционных материалов .....</b>	17
1.2.1. Интеллектуальные информационно- измерительные системы .....	20
1.2.2. Информационно-измерительные системы допускового контроля .....	22
1.2.3. Информационно-измерительные приборы контроля теплофизических характеристик .....	23
<b>1.3. Анализ технологических процессов изготовле-         ния теплоизоляционных материалов .....</b>	24
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОН- НЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	31
<b>2.1. Анализ воздействующих факторов на технолги-         ческий процесс изготовления теплоизоляцион-         ных материалов и интеллектуальную информа-         ционно-измерительную систему допускового         контроля их теплопроводности .....</b>	31

2.1.1. Оценка точности технологического процесса изготовления теплоизоляционных материалов	39
<b>2.2. Математическая модель допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов</b>	<b>44</b>
<b>2.3. Аналитические зависимости управляемых и неуправляемых параметров технологического процесса производства теплоизоляционных материалов от воздействующих факторов</b>	<b>45</b>
<b>2.4. Метод повышения точности допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов</b>	<b>53</b>
2.4.1. Оценка достоверности допускового контроля	71
<b>3. АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДОПУСКОВОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b>	<b>74</b>
<b>3.1. Алгоритм реализации метода допускового контроля</b>	<b>74</b>
<b>3.2. Информационное обеспечение интеллектуальной информационно-измерительной системы</b>	<b>87</b>
3.2.1. Модель представления знаний	87
3.2.2. Информационная модель базы знаний интеллектуальной информационно-измерительной системы	97
3.2.3. База знаний интеллектуальной информационно-измерительной системы	99
<b>3.3. Структурная схема интеллектуальной информационно-измерительной системы</b>	<b>102</b>
<b>3.4. Система измерительных устройств интеллектуальной информационно-измерительной системы</b>	<b>110</b>
<b>3.5. Функциональная схема интеллектуальной информационно-измерительной системы</b>	<b>113</b>

<b>3.6. Алгоритм функционирования интеллектуальной информационно-измерительной системы .....</b>	<b>117</b>
<b>3.7. Метрологический анализ интеллектуальной информационно-измерительной системы .....</b>	<b>130</b>
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	137
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	139
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	144
<b>Приложение А. Процедурные правила .....</b>	<b>144</b>
<b>Приложение Б. Функции принадлежности .....</b>	<b>159</b>
<b>Приложение В. Описание программы реализации алгоритма функционирования интеллектуальной информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств теплоизоляционных материалов и мониторинга режимных параметров .....</b>	<b>179</b>
<b>Приложение Г. Закон распределения вероятностей режимных параметров.....</b>	<b>189</b>

Научное издание

СЕЛИВАНОВА Зоя Михайловна  
СТАСЕНКО Константин Сергеевич

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДОПУСКОВОГО  
КОНТРОЛЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Монография

Редактор Л. В. Комбарова  
Инженер по компьютерному макетированию Т. Ю. Зотова

ISBN 978-5-8265-1494-8



Подписано в печать 30.11.2015.  
Формат 60×84 /16. 11,63 усл. печ. л.  
Тираж 500 экз. (1-й з-д 50). Заказ № 532

Издательско-полиграфический центр  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14  
Тел. 8(4752) 63-81-08;

E-mail: [izdatelstvo@admin.tstu.ru](mailto:izdatelstvo@admin.tstu.ru)