

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

В.П. ПОПОВ,  
В.А. ГРУЗИНЦЕВА

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СУШКИ МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

МОНОГРАФИЯ

Рекомендовано к изданию Ученым советом  
государственного образовательного учреждения высшего профессионального  
образования «Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2008

УДК 664.692.7

ББК 36.83

П 58

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор А.А. Аверкиев

доктор биологических наук, профессор С.А. Мирошников

**Попов В.П.**

**П 58 Проектирование технологического процесса сушки макаронных изделий: монография / В.П. Попов, В.А. Грузинцева. - Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2008. – 141 с.**

**ISBN**

В монографии рассмотрены теоретические и практические аспекты совершенствования технологического процесса сушки макаронных изделий.

Монография предназначена для научных работников, конструкторов и эксплуатационников сушильного оборудования, преподавателей, аспирантов, студентов старших курсов, занимающихся исследованием технологического процесса сушки макаронных изделий и проектированием новых ресурсосберегающих технологий, позволяющих получить высококачественный продукт.

ББК 36.83

П 4001040000

**ISBN**

© Попов В.П.,  
Грузинцева В.А., 2008  
© ГОУ ОГУ, 2008

## Содержание

Введение.....	5
1 Современные взгляды на процесс удаления влаги из макарон.....	6
1.1 Проблема обеспечения качества макаронных изделий при их сушке.....	6
1.2 Состояние изученности процесса сушки, анализ существующих моделей процесса сушки и методов их получения.....	10
1.3 Методы оптимизации технологических процессов.....	18
2 Анализ существующих технологий и оборудования для сушки макаронных изделий.....	22
2.1 Обзор технологий и применяемого оборудования.....	22
2.2 Средства автоматизации технологии.....	30
3 Математическая модель процесса сушки макаронных изделий.....	32
3.1 Анализ растрескивания упруго пластического материала.....	32
3.2 Методика построения математической модели процесса сушки макаронных изделий на основе теории трещинообразования.....	38
4 Эмпирическое исследование процесса сушки макаронных изделий.....	45
4.1 Методики исследований свойств полуфабрикатов и готовых изделий.....	45
4.2 Модернизация метода изучения структуры макаронных изделий.....	57
4.3 Математические методы обработки результатов измерений.....	60
4.4 Анализ процесса сушки макаронных изделий.....	64
5 Методология оптимизации параметров процесса сушки и сушильного оборудования.....	74
5.1 Структурная схема управления процессом сушки макаронных изделий.....	74
5.2 Определение оптимальных значений параметров процесса сушки.....	76
6 Автоматизация технологического процесса сушки длинных макаронных изделий.....	88
6.1 Алгоритм управления процессом сушки в автоматизированных системах производства длинных макаронных изделий.....	88
6.2 Установка для сушки длинных макаронных изделий подвесным способом.....	93
6.3 Устройство для испытания пищевых материалов на растяжение.....	95
Заключение .....	98
Список использованных источников.....	100

Приложение А. Определение зависимости коэффициентов $\alpha$ , $K_1$ и $K$ от выходного значения относительного удлинения при растяжении полуфабрикатов.....	104
Приложение Б. Графоаналитические зависимости органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от исходных факторов (управляющих воздействий и возмущений) для каждого этапа сушки.....	106
Приложение В. Графоаналитические зависимости комплексного показателя качества от исходных факторов (управляющих воздействий и возмущений) для каждого этапа сушки.....	117
Приложение Г. Графоаналитические зависимости удельных затрат энергии от исходных факторов (управляющих воздействий и возмущений) для каждого этапа сушки.....	128
Приложение Д. Графоаналитические зависимости относительного удлинения полуфабрикатов в конце каждого этапа сушки от исходных факторов (управляющих воздействий и возмущений).....	139

## Введение

Настоящими макаронными изделиями называется продукт, полученный формованием смеси муки и воды, который имеет при массовой доле влаги 12-13 % желтый цвет, хороший вид, специфический запах и вкус, полное отсутствие трещин и подгорелостей. В настоящее время при жесткой конкуренции на рынке сбыта актуальной проблемой всех макаронных фабрик является получение продукта высокого качества. Наиболее продолжительной и важной стадией производства, температурные режимы которой оказывают влияние на качество продукта, является сушка. От правильности проведения процесса сушки напрямую зависят такие показатели качества, как прочность и цвет готовых макаронных изделий, количество сухих веществ, перешедших в воду при варке изделий, степень слипаемости и удельная прочность сваренных изделий. Нарушение технологического регламента сушки макарон приводит к закисанию, плесневению и растрескиванию изделий. Прогрессивные методы сушки макаронных изделий внедряются в производство благодаря трудам Г.М. Медведева, М.Е. Чернова, Н.И. Назарова, Л. Милатовича, G. Mondelli, однако в настоящее время:



- сушка макаронных изделий производится исключительно по рациональным режимам, так как объективные технологические и технические трудности не позволяют осуществить работу оборудования в оптимальном режиме;

- производится частичная автоматизация отдельных рациональных режимов сушки, причем при её проведении не учитываются качественные изменения в полуфабрикатах в процессе потери влаги.

В связи с вышеизложенным, является актуальной оптимизация значений параметров технологического процесса сушки макаронных изделий с использованием ресурсосберегающих режимов, позволяющих получать высококачественные изделия всех видов. В трудах Н.Е. Нетушила, Ж.М. Курбанова, А.М. Остапенкова, D.L. Griffith проблема качества макаронных изделий напрямую связана с процессом трещинообразования при их сушке. Поэтому является актуальной дальнейшая разработка теории трещинообразования применительно к процессу потери влаги макаронными изделиями с целью создания новых эффективных систем управления процессом сушки.

Инновационное моделирование технологических стадий при производстве макаронных изделий создает предпосылки для улучшения конкурентоспособности производимого продукта на рынке. Полученные при этом результаты обеспечивают активное участие управляющих алгоритмов в формировании технологии путем попутного решения проблем разработки оптимальных технологических инструкций и оптимального проектирования производственных стадий с позиций их последующего функционирования в оптимальном режиме.

# 1 Современные взгляды на процесс удаления влаги из макарон

## 1.1 Проблема обеспечения качества макаронных изделий при их сушке

Макаронные изделия являются одной из важнейших составляющих рациона питания человека. Их высокая питательная ценность обусловлена содержанием в изделиях до 12 % белка, 75 % крахмала, около 13 % воды. 100 г макаронных изделий практически полностью удовлетворяют суточную потребность человека в белках и углеводах (кроме лизина). Под качеством макаронных изделий понимается «совокупность свойств продукции, обуславливающих её пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с её назначением». Пищевые продукты характеризуются рядом свойств, имеющих определенную количественную характеристику, которые называются показателями качества продукции.

Основными показателями качества макаронных изделий являются:

- 1) для сухих изделий: внешний вид, влажность, кислотность, прочность;
- 2) для сваренных изделий: вкус и запах.

При этом внешний вид характеризуется цветом, состоянием поверхности (степень гладкости), изломом (степень стекловидности), формой (степень правильности).

Влажность, кислотность и прочность сухих изделий определяют физико-химическими методами, а остальные вышеуказанные показатели качества - органолептическими. Кроме того, ряд исследователей, например, Г.М. Медведев, Н.И. Назаров рекомендуют характеризовать варочные свойства макаронных изделий по следующим физико-химическим показателям:

- длительность варки до готовности;
- количество поглощенной при варке воды;
- потери сухих веществ при варке;
- прочность и степень слипаемости сваренных изделий.

В макаронном производстве существует большое количество физико-химических показателей. Следует отметить, что улучшение одного из них приводит к ухудшению другого, а методы оценки показателей разнообразны и необъективны.

Сушка является теплотребляющим технологическим процессом, в результате осуществления которого получают промежуточную, а чаще товарную продукцию. Реализация этого процесса сопряжена с изменением теплового состояния вещества при регламентированном тепловом воздействии на исходный материал посредством тепло- и массопереноса. Процесс сушки это сложный комплекс физико-химических, биохимических и реологических изменений высушиваемого материала. Поэтому нельзя рассматривать

проблемы плохого качества макаронных изделий без учета всех этих изменений в процессе их изготовления.

Одним из наиболее значимых недостатков качества макаронных изделий, появляющихся при их сушке, является возникновение трещин. Известны несколько теорий предельных состояний, которые рассматривают появление трещин как следствие возникновения внутренних напряжений в изделиях.

**Первая теория прочности** учитывает только наибольшие нормальные напряжения и предполагает, что предельное состояние наступает тогда, когда они достигают некоторого критического значения, независимо от величины других напряжений. Известно, что при сколь угодно равномерном всестороннем давлении материалы не разрушаются и практически не деформируются. Поэтому эта теория не пригодна для определения условий, при которых начинается пластическая деформация или наступает разрушение материала.

**Вторая теория прочности** предполагает, что начало разрушения наступает при достижении максимальными касательными напряжениями определенной величины

$$\tau_{MAX} = \frac{\sigma_{MAX} - \sigma_{MIN}}{2} = const \quad (1.1)$$

Это выражение обычно называют условием пластичности Сен-Венана.

Вторая теория прочности не учитывает влияния средних главных напряжений и нормального напряжения в плоскости сдвига, а также не во всех случаях правильно описывает условие наступления пластической деформации, т.к. установлено расхождение в пределах разрушения при растяжении и сдвиге.

Проведенные опыты показали, что эта теория подходит лишь для предельных состояний чистых металлов.

Согласно **третьей теории прочности** наступление предельных состояний определяется некоторой постоянной величиной наибольших положительных упругих удлинений, подсчитанных по формуле

$$\varepsilon_{MAX} = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 - \sigma_3)] = const \quad (1.2)$$

Эксперименты показывают, что эта теория может быть рекомендована для определения предельного состояния хрупких тел.

Однако в США эта теория была применена для анализа появления трещин при сушке макаронных изделий. Макароны принимались за полый цилиндр. Так как эксперименты были проведены с деформациями изгиба макаронной трубки, то растягивающие напряжения определялись в трех направлениях: радиальном, тангенциальном и линейном вдоль образующей. Распределение влажности принималось по закону экспоненты. Полученные соотношения прямой экспериментальной проверке не подвергались, кроме того, касательные напряжения не учитывались, несмотря на то, что в

деформации изгиба имеются деформации сдвига, также не учитывались пластические свойства макаронного теста (макаронная трубка принималась за идеально упругое тело).

В результате этого полученные соотношения не удалось применить для определения перепада влажности.

По **четвертой теории прочности** предельное состояние наступает после накопления материалом некоторой, постоянной по величине, потенциальной энергии изменения формы.

Условие достижения предельного состояния дается этой теорией в следующем виде

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = const \quad (1.3)$$

Это условие известно как условие пластичности Мизеса –Генки.

Оно представляет собой по физическому смыслу потенциальную энергию упругой деформации, запасенную в материале.

Из приведенного условия видно, что четвертая теория прочности связывает наступление предельного состояния с разностями главных напряжений, т.е. по существу, опять с касательными напряжениями, но не с максимальными (как это принято во второй теории прочности). А также с так называемым октаэдрическим напряжением, действующим в плоскости, равно наклоненной ко всем трем главным осям, и выражаемым через разности главных напряжений следующим образом

$$\tau_n = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1.4)$$

Таким образом, четвертая теория прочности учитывает влияние среднего главного напряжения, но не учитывает влияния нормального напряжения в плоскости сдвига.

Фридрих Эчер привел единую теорию прочности о двух видах разрушения, обусловленных различными по своей природе напряжениями: приведенными напряжениями для случаев хрупкого разрушения и максимальными касательными напряжениями для пластического разрушения.

Единая теория прочности исходит из следующих положений: каждый материал может разрушаться хрупко от нормальных напряжений или пластически от касательных напряжений в зависимости от характера напряженного состояния.

Таким образом, применительно к процессу сушки можно применить две теории растрескивания упруго-пластического материала. Согласно первой гипотезе, растрескивание связано с возникновением предельных нормальных напряжений, а согласно второй – с возникновением предельных касательных напряжений.



Для материалов с «пониженными» структурно-механическими характеристиками, т.е. склонных к образованию трещин важную роль играют явления усадки и развития общей деформации, причем в зависимости от свойств материала могут развиваться как упругие, так и пластические деформации. Таким образом, проблема улучшения качества макаронных изделий не может быть решена без учета реологических преобразований в процессе их сушки.

Сушка макаронных изделий одна из основных стадий формирования их качества. Многие исследователи занимались совершенствованием процесса сушки с целью как улучшения качества макаронных изделий, так и снижения удельных затрат энергии на проведение процесса высушивания.

Назаров Н.И. и другие предлагали проводить гигротермическую обработку изделий перед сушкой (обработку паром) для заваривания клейковинного каркаса. При этом наблюдается снижение связи влаги с денатурированными белками, кристаллизация и частичная клейстеризация крахмала. Качество изделий повышается за счет приобретения ими прозрачности и глянцевої поверхности, вызванной кристаллизацией и клейстеризацией крахмала, повышения прочности клейковинного каркаса, вызванной денатурацией белков. Энергоемкость дальнейшего процесса сушки снижается вследствие ослабления энергии связи влаги с денатурированными белками.

Медведевым Г.М. совместно с А.Аль Сайедом установлено, что для предотвращения трещинообразования, приводящего к изменению качества является целесообразным производить высушивание макаронных изделий в поле токов СВЧ. При таком высушивании материал разогревается равномерно по всей толщине и наблюдается равномерное сокращение слоев изделий.

Арапов В.М. и другие обосновывают необходимость быстрого разогрева на начальном этапе сушки для снижения общей энергоемкости процесса.

Лыков А.В. и Савина И.М. указывают на быстрый разогрев изделий под воздействием инфракрасного облучения.

Функционирование систем автоматики и автоматизации основано на получении и переработке информации о ходе процесса. По данным М.М. Благовещенской, В.А. Соколова, Г.А. Гуляева, А.М. Гордона, В.Ф. Коробко и других авторов, в настоящее время степень автоматизации тепломассообменных процессов, являющихся основой технологического процесса переработки пищевых продуктов, допускает существование резервов для повышения качества продукции, снижения трудоемкости, энергетических и сырьевых затрат. Эффективное функционирование поточных линий производства макаронных изделий обеспечивается за счет надежной работы систем автоматического контроля и регулирования технологических процессов и управления механизмами аппаратов линии. В настоящее время при автоматизации технологических линий для процесса сушки используются в основном замкнутые системы автоматического регулирования – цепочка «переменная – регулятор» представляет собой обратную связь по отношению к объекту. Объектом сушки является макаронный полуфабрикат, основные

контролируемые параметры - температура изделий, температура и относительная влажность сушильного воздуха. Но современные системы управления процессом сушки не обеспечивают достаточного качества макаронных изделий, а в настоящее время, при жесткой конкуренции на рынке сбыта проблема улучшения качества становится наиболее актуальной.

## **1.2 Состояние изученности процесса сушки, анализ существующих моделей процесса сушки и методов их получения**

Автоматизация управления тепломасообменными процессами позволяет сократить длительность тепловой обработки, в результате чего уменьшаются затраты на производство, тем более, что именно тепловая обработка, как отмечают А.С. Гинзбург, А. В. Лыков, Б.С. Сажин и другие, обычно является наиболее продолжительным по времени процессом теплообменного производства. Новая ориентация автоматического управления на решение проблем качества продукции должна привлечь новый аппарат для решения задач, таким аппаратом является математическое моделирование. В общем случае модель устанавливает количественное или качественное взаимоотношение между комплексом причинно-следственных связей, присущих процессу.

Математические модели подразделяются на имитационные и оптимизационные модели. Имитационное моделирование позволяет осуществить сравнение альтернативных конструкций воспроизведением в них течения технологического процесса. Оптимизационные модели в свою очередь направлены на отыскание оптимума конкретной функции, они не предусматривают изменения исходных условий и корректировки конечных результатов. Исследование процессов сушки проводится с целью научного обоснования выбора рациональных методов и оптимальных режимов процесса, а также получения необходимых формул для построения математической модели. Как и для других технологических процессов, методы исследования процессов сушки можно разбить на 3 основные группы: аналитические, экспериментальные и синтетические.

Аналитическое исследование протекает в три этапа:

- математическое описание задачи;
- формулировка краевых условий (необходимость вызвана тем, что уравнение процесса сушки описывает целый класс явлений и для однозначного его решения нужно сформулировать начальное и граничное условия);
- решение задачи (получение в общем виде зависимостей для искомых величин).

К основным целям экспериментального исследования относятся:

- исследование механизма и получение данных для формулировки физической модели процесса;
- получение эмпирических расчетных зависимостей;
- формулировка конкретных краевых условий;

- проверка адекватности аналитического решения физической модели процесса.

При проведении экспериментального исследования также важно создание экспериментальной установки, которая является моделью будущих полупроизводственных установок и обобщение экспериментальных данных с целью получения эмпирических расчетных формул. Решение этих задач реализуется в третьем – синтетическом методе исследования, который базируется на теории подобия и анализе размерностей, а также на математических методах планирования экспериментов. Разработка различных методов расчета процессов невозможна без построения соответствующей математической модели. Различают статистические, динамические и кинетические модели.

А.С. Гинзбург, В.Д. Скверчак описывали кинетику внутреннего массопереноса (переноса влаги внутри материала) уравнением, аналогичным уравнению теплопроводности. Это уравнение устанавливает связь между изменением влажности во времени и по координатам тела (x,y,z) или, другими словами, описывает скорость уменьшения влажности в любой точке тела

$$\frac{dU}{d\tau} = a_m \cdot \nabla^2 \cdot U + a_m \cdot \delta \cdot \nabla^2 \cdot \theta + \left( \frac{K_P}{\rho_0} \right) \nabla^2 \cdot P, \quad (1.5)$$

где  $U$  – удельное влагосодержание материала, кг вл./кг сух. вещ.;

$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$  - оператор Лапласа;

$a_m$  – коэффициент массопереноса, м<sup>2</sup>/ч;

$\delta$  – относительный коэффициент термовлагопроводности;

$\theta$  – температура материала, °С;

$K_P$  – коэффициент молярного фильтрационного переноса влаги, обусловленного появлением внутри материала градиента общего давления;

$\rho_0$  – плотность абсолютно сухого материала, кг сух. вещ./м<sup>3</sup>;

$P$  – парциальное давление паров воды, Па.

Это уравнение описывает скорость изменения влажности в любой точке тела в любой момент времени.

Для упрощения А.С. Гинзбург и др. принимали, что материал имеет форму пластины, тогда дифференциальное уравнение влагопереноса для конвективной сушки этой пластины имеет вид

$$\frac{dU}{d\tau} = a_m \cdot \left( \frac{d^2 U}{dx^2} \right) \quad (1.6)$$

К началу процесса сушки  $\tau=0$ , влага равномерно распределена по сечению тела, начальное условие записывается в виде

$$U(x; y; z; 0) = U_0 = const \quad (1.7)$$

Граничное условие можно представить в виде баланса влаги для поверхности: количество влаги, переместившееся изнутри тела к его поверхности, равно количеству влаги, переместившейся с поверхности тела в окружающую среду

$$q_m = -a_m \cdot \rho_0 \left( \frac{dU}{dx} \right)_{\text{пов}} = \alpha_{mp} \cdot (P_M - P_{II}), \quad (1.8)$$

где  $q_m$  – интенсивность влагоотдачи, кг/(м<sup>2</sup>·ч);

$\left( \frac{dU}{dx} \right)_{\text{пов}}$  – градиент влажности на поверхности тела;

$\alpha_{mp}$  – коэффициент влагообмена, кг/(м<sup>2</sup>·ч·Па);

Барометрическое давление принималось равным 0,1 МПа.

Уравнение (1.6) решено академиком А.В. Лыковым при краевых условиях (1.7) и (1.8) и  $q_m = const$  (т.к. скорость сушки постоянна)

$$U = U_1 - \left[ \frac{q_m}{R \cdot \rho_0} \right] \cdot \left[ \tau - \frac{(R^2 - 3x^2)}{6a_m} \right], \quad (1.9)$$

где  $U$  – влагосодержание в любой точке тела в любой момент времени, кг вл./кг сух. вещ.;

$R$  – определяющий геометрический размер (половина толщины пластины).

Из формулы (1.9) видно, распределение влаги по толщине тела определяется параболой. Затем из выражения (1.9) получили формулу для определения первой критической влажности  $W_{K1}$ . В первой критической точке средняя влажность пластины  $W^c = W_{K1}^c$ , а влагосодержание на поверхности  $U_{\text{пов}} = U_{K1}$  (для коллоидного тела  $U_{K1}$  – максимальная гигроскопическая влажность). Отсюда

$$W_{K1} = 100 \cdot U_{K1} + 100 \cdot \frac{q_m \cdot R}{3a_m \cdot \rho_0} = 100 \cdot U_{K1} + \frac{N \cdot R^2}{3a_m} \quad (1.10)$$

Из формулы видно, что первая критическая влажность зависит от определяющего размера материала (толщины образца), коэффициента переноса влаги внутри материала  $a_m$  и режима сушки. А.В. Лыков и Л.Я. Ауэрман доказали экспериментально, что для материалов со сравнительно большим  $R$  величина  $W_{K1}$  может быть больше начальной влажности (сушка происходит

только в период падающей скорости), а с уменьшением  $R$  величина  $W_{K1}$  тоже уменьшается.

Уравнение (1.10) получено исходя из предположения, что в период постоянной скорости сушки испарение происходит на поверхности тела. Если учесть, что испарение частично может протекать и в толще материала, то выражение для критической влажности тела (пластина, цилиндр, шар) будет иметь вид

$$W_{K1} = 100 \cdot U_{K1} + \left[ \frac{(100 \cdot q_m \cdot R)}{(\Gamma \cdot a_m \cdot \rho_0)} \right] \cdot \left[ \frac{1 + \varepsilon \cdot r \cdot \delta \cdot a_m}{C \cdot a} \right], \quad (1.11)$$

где  $\Gamma$  – постоянный коэффициент формы тела (для пластины  $\Gamma=3$ , для цилиндра  $\Gamma=4$ , для шара  $\Gamma=5$ );

$\varepsilon$  – критерий фазового перехода;

$C$  – удельная теплоемкость, Дж/кг·К;

$a$  – коэффициент температуропроводности.

Обычно в первый период сушки считают, что температура тела равна температуре мокрого термометра. Исходя из этого, получили выражение для массообменного критерия Кирпичева  $Ki_m$ , который является показателем отношения интенсивности внешнего влагообмена и внутреннего переноса влаги, обусловленного величиной  $a_m$ .

$$Ki_m = \frac{q_m \cdot R}{a_m \cdot \rho_0 \cdot (U_1 - U_p)} = 2 \frac{(U_{ц} - U_{пов})}{(U_1 - U_p)}, \quad (1.12)$$

где  $U_{ц}$  – влагосодержание в центре материала, %;

$U_{пов}$  – влагосодержание на поверхности материала, %;

$U_1$  – начальная влажность материала, %;

$U_p$  – равновесная влажность материала, %.

Критерий  $Ki_m$  является важным технологическим параметром, характеризующим трещинообразование в процессе сушки или величину допустимого градиента влажности. При параболическом распределении влаги по сечению материала и  $U_1 \gg U_p$

$$Ki_m = \frac{(\nabla U)_{пов} \cdot R}{U_1}, \quad (1.13)$$

Отдельно исследователи рассматривали период убывающей скорости сушки. Для периода убывающей скорости ( $\tau=0$ ) начальное условие имеет вид

$$U = U_{ц} - \left( \frac{X}{R} \right)^2 \cdot (U_{ц} - U_{пов}) \quad (1.14)$$

Если же период постоянной скорости сушки отсутствует, то начальное условие будет иметь такой же вид, как и для периода постоянной скорости:  $(\tau=0) U(x,y,z) = U_1 = const.$

Процессы переноса влаги для периода убывающей скорости сушки описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений, при этом значительную трудность представляет формулировка граничных условий. Поэтому для практических целей ряд авторов принимали, что между скоростью сушки и массой удаляемой влаги существует прямая пропорциональная зависимость, т.е. кривую сушки во второй период заменяли прямой. В этом случае в качестве граничного условия принимали уравнение баланса влаги для поверхности тела, описываемое формулой вида

$$q_m = -a_m \cdot \rho_0 \left( \frac{dU}{dx} \right)_{ПОВ} = \alpha_{mU} \cdot \rho_0 (U_{ПОВ} - U_P) \quad (1.15)$$

А.В. Лыков решил дифференциальное уравнение влагопереноса во второй период сушки при краевых условиях (1.14) и (1.15)

$$-\frac{dW^c}{d\tau} \approx \frac{a_m}{R^2} \cdot \frac{1}{4/\pi^2 + 1/Bi_m} (W - W_P), \quad (1.16)$$

где  $a_m$  и  $a_{mU} = const$ ;

$$Bi_m = \frac{a_{mU} \cdot R}{a_m} - \text{массообменный критерий Био.}$$

Из формулы (1.16) видно, что во второй период скорость сушки находится в прямой зависимости от влажности материала и в обратной зависимости от определяющего геометрического размера тела  $R$ . Скорость сушки зависит также от влагокоэффициентов, которые изменяются в процессе.

Гинзбургом А.С., Поповым В.И. и Гержоем А.П. рассчитана продолжительность сушки для различных продуктов, путем ввода в выражение (1.12) коэффициента сушки  $K$

$$K = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{(1/a_{mU}) + (4/\pi^2) \cdot (R/a_m)} \quad (1.17)$$

После преобразований получали время сушки для второго периода

$$\tau_2 = \frac{1}{K} \ln \left( \frac{W_{к.п.} - W_P}{W_2 - W_P} \right) \quad (1.18)$$

Коэффициент сушки находился по экспериментальным данным. Также экспериментально было доказано, что зависимости между удаляемой влагой и временем имеют линейный характер.

На основе обобщенных синтетических методов анализа П.Д. Лебедевым предложено универсальное уравнение для определения коэффициента конвективного теплообмена, пригодного для любого способа подвода тепла к материалу, охватывающего весь процесс сушки

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot K^m \cdot Q^R \cdot \left( \frac{W}{W_{k1}} \right)^S, \quad (1.19)$$

где  $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$  - критерий конвективного теплообмена Нуссельта, характеризующий интенсивность процессов теплообмена между материалом и сушильным агентом;

$\alpha$  - коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$l$  - определяющий размер поверхности испарения, м;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);

$A$  - постоянная;

$Re = \frac{V_{c.a.} \cdot l}{\nu}$  - критерий Рейнольдса, характеризующий

гидродинамические условия протекания процесса, зависящий от скорости сушильного агента  $V_{c.a.}$  и коэффициента кинематической вязкости  $\nu$ ;

$K = \frac{T_c}{T_m}$  - видоизмененный критерий Гухмана, определяющий

увеличение коэффициента теплоотдачи за счет турбулизации воздушного потока паром, образующимся у поверхности материала, т.е. учитывающим влияние массообмена на теплообмен, равный отношению температур сушильного агента  $T_c$  и мокрого термометра  $T_m$ ;

$Q = \frac{T_{изл}}{T_c}$  - параметрический критерий (симплекс), определяющий

увеличение коэффициента теплоотдачи за счет уменьшения толщины пограничного слоя с повышением температуры поверхности при радиационной сушке, равный отношению температуры излучателя к температуре сушильного воздуха;

$\frac{W}{W_{k1}}$  - параметрический критерий, учитывающий уменьшение

коэффициента теплообмена в период убывающей скорости сушки.

Все перечисленные исследователи производили оценку состояния материала во время сушки посредством уравнений тепломассообмена, без учета свойств высушиваемого материала.

Ю.А. Михайлов, после обработки большого количества экспериментальных данных дал следующее заключение

$$\chi = \frac{1,8}{W_1}, \quad (1.20)$$

где  $\chi = \frac{K}{N}$  - относительный коэффициент сушки, который зависит от свойств материала и его влажности.

Для второго периода сушки массообменный критерий Кирпичева изменяется со временем:  $Ki_m = f(\tau)$ . Для его определения поток влаги представляли в виде

$$q_m = \frac{1}{100} \cdot \frac{dW}{d\tau} R \rho_0, \quad (1.21)$$

$$Ki_m = \frac{q_m \cdot R}{a_m \cdot \rho_0 (U_1 - U_p)} = \frac{R^2}{a_m (W_1 - W_p)} \cdot \frac{dW}{d\tau} = \frac{\chi \cdot NR^2}{a_m} \cdot \frac{(W - W_1)}{(W_1 - W_p)} \quad (1.22)$$

Как указывалось выше критерий Кирпичева  $Ki_m$  характеризует процесс трещинообразования материала. Во всех приведенных теориях не рассматривалась связь процесса потери влаги с изменением структурно-механических свойств высушиваемого материала, а образование трещин связывали только с критерием Кирпичева.

В дальнейшем были проведены исследования процесса сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов с учетом изменения реологических характеристик объекта сушки. Так, например, А.М. Остапенков и Ж.М. Курбанов проводили анализ сушки лагманного полуфабриката с использованием комбинированного высокочастотно-конвективного энергоподвода. При этом процесс сушки делился на 4 зоны и находились значения максимально допустимого градиента влажности и соответствующей скорости сушки для каждой зоны. Для учета изменения реологических свойств дополнительно находился градиент поверхностных сил  $\nabla \sigma$ , обусловленный действием нормальных  $\sigma_1$  и касательных  $\sigma_2$  сил. При составлении математической модели процесса в качестве основного выходного параметра взят максимально допустимый градиент влагосодержания  $\nabla U$ , определяющий качество готового продукта. Объект сушки рассматривался на разных стадиях процесса как упруго-вязкое, вязко-пластично-упругое и упругое тело, свойства которого могут быть описаны дифференциальным уравнением

$$\frac{d\sigma}{d\tau} + \frac{1}{\tau_p} \cdot (\sigma - \sigma_{kp}) = 0,5E \left( \frac{d\varepsilon}{d\tau} \right), \quad (1.23)$$



где  $\tau_P$  - время релаксации, с;  
 $\sigma_{KP}$  - критическое напряжение, Па;  
 $E$  - модуль сдвига, Па;  
 $\mathcal{E}$  - деформация, %.

Данное уравнение недостаточно точно описывает процесс на всем протяжении сушки, кроме того, измерение возникающих напряжений вызывает значительные трудности в связи с переменным поперечным сечением макаронных изделий.

Для изучения внутренних закономерностей процесса требуется привлечение новых методов и моделей. Изучением методов моделирования занимались Иващенко А.Г., Браверманн Э.М., Шеннон и другие.

При статистическом анализе технологических объектов наиболее распространен корреляционно-регрессионный анализ.

Основные задачи управления позволяет решать метод группового учета аргумента (МГУА). Идея метода заключается в переборе моделей с постепенным их усложнением до достижения минимального значения некоторого критерия. В алгоритмах МГУА есть генераторы усложняющихся из ряда в ряд комбинаций и пороговые самоотборы лучших из них.

Недостаток таких моделей в их сложности из-за большого числа коэффициентов, которые нужно определить.

Для преодоления этого недостатка целесообразно применять методы факторного анализа. Методы ориентированы на выявление, конструирование и анализ внутренних факторов по информации об их внешних проявлениях.

Наиболее универсальным методом факторного анализа является метод главных компонент, который заключается в переходе от исходного к меньшему набору параметров, достаточных для описания процесса. Найденные параметры используются для построения регрессии на главных компонентах

$$y = \sum_{i=1}^n b_i Z_i = b_0, \quad (1.24)$$

где  $b_i$  - коэффициенты регрессии;  
 $b_0$  - ошибка модели.

Методы факторного анализа в рамках компактного исследования путем довольно сложной обработки экспериментальных данных позволяют расположить исследуемые факторы в порядке убывания их влияния на процесс. Но на технологический процесс, как правило, влияет множество независимых параметров, экспериментальное определение которых затруднено. Поэтому обычно к исследованию принимают не более 3-5 факторов. Если необходимо исследовать большое число разнородных факторов, то проводят 2 или больше экспериментов, группируя для каждого из них по возможности разнородные факторы. Методы математического планирования эксперимента позволяют

получить математические модели исследуемого процесса в реализованном диапазоне изменения многих факторов, наиболее экономичным и эффективным способом.

Теоретические основы явлений, происходящих при сушке, разработаны А.В. Лыковым и другими. Однако их практическая реализация при создании математических моделей происходящих процессов и построении АСУ осложнена рядом причин, главной из которых является необходимость предварительных громоздких лабораторных исследований, недостаточно соответствующих реальным условиям производства. Оценка состояния материала во время сушки ведется посредством уравнений теплообмена и различных эмпирических зависимостей на основе измеряемых параметров теплоносителя. Поэтому необходимо создание математических моделей, связывающих процесс потери влаги с изменением качества изделий.

### **1.3 Анализ методов оптимизации технологических процессов**

Конечной целью моделирования технологического процесса является достижение оптимального режима его функционирования, поддержка динамического равновесия с внешней средой. Основываясь на общности решения этих задач можно сказать, что основной проблемой является проблема построения наиболее эффективных оптимальных систем. Теория оптимального и адаптивного управления изложена М. Атансом, П. Фалбом, А.Г. Александровым, П.В. Куропаткиным, Р. Беллманом и другими авторами. Применительно к тепловым процессам оптимальное управление рассмотрено А.И. Егоровым, В.Е. Куцаковой, А.Н. Богатыревым, С.Г. Герасимовым.

Главной задачей оптимального управления является нахождение такого закона, при котором система при заданных ограничениях перейдет из одного заданного состояния в другое оптимальным образом, причем функционал  $J(x,u)$ , выражающий качество процесса получит наименьшее или наибольшее значение. На этом законе основаны методы вариационного исчисления, методы динамического программирования. Но все эти методы оптимизируют процесс в динамике, а для проектирования технологических процессов больше подходят методы многокритериальной оптимизации, к которым приходят в случае отсутствия полных точных сведений о решаемой задаче или тогда, когда оптимальное решение следует оценивать сразу с нескольких точек зрения.

В технологических исследованиях зачастую результат процесса невозможно представить каким-либо одним параметром оптимальности. В практике многокритериальной оптимизации используется ряд методов. Один из них заключается в том, что из всех рассмотренных критериев выделяют важнейший, по которому и решается задача оптимизации, по всем другим показателям задаются пороговые значения  $y_2, y_3, \dots, y_n$ , т.е. значения достаточно оптимального уровня. Если ограничения могут быть сформулированы в виде равенств, для оптимизации процесса по главному критерию может быть принят метод неопределенных множителей Лангранжа. Метод применим не во всех

случаях, так как из всех критериев оптимальности приходится выбирать один, главный, что не всегда возможно, а остальным критериям задавать конкретные численные значения. Иными словами, метод работает, если требуется найти экстремум функции

$$y_1 = f(x_i), \quad (1.25)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  при наличии ограничений типа

$$\begin{aligned} y_2 = f(x_i) &= a_2; \\ y_k = f_k(x_i) &= a_k \end{aligned} \quad (1.26)$$

Алгоритм применения этого метода сводится к следующим операциям:

1) формируется вспомогательная функция

$$\varphi(x_i, \lambda_i) = f_1(x_i) + \sum_{k=1}^m \lambda_k \cdot \psi_k(x_i),$$

где  $\lambda_k$  - неопределенное множество Лангранжа;

2) берутся частные производные функции  $\varphi(x_i, \lambda_i)$  по всем независимым переменным  $(x_i)$  и по всем множителям Лангранжа  $\lambda_k$ ;

3) используя некоторые уравнения, выражают  $\lambda_k$  через переменные  $x$ ;

4) подставляя полученные выражения в соответствующие уравнения, исключаются неопределенные множители из системы уравнений;

5) решая систему, в которой неопределенные множители исключены находят координаты экстремальных точек, которых в общем случае может быть и несколько.

Но зачастую создается конфликтная ситуация: удовлетворение одного критерия оптимальности вызывает ухудшение процесса по другому критерию. Если возможно этим критериям придать тот или иной «вес», то задача решается простым построением обобщенного критерия

$$y = \sum_{j=1}^n y_{iU} \cdot g_j, \quad (1.27)$$

где  $y_{iU}$  - значение  $j$ -го критерия оптимальности в  $U$ -ом опыте;

$g_j$  - «вес»  $j$ -го критерия оптимальности.

По данным  $y_{iU}$  получают уравнение, на основе которого строится процесс оптимизации.

Другой метод заключается в формировании некоторого обобщенного критерия  $y$ , представляющего собой функцию частных критериев  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$ . Тогда обобщенный критерий можно представить в виде дроби, числитель

которой представляет произведение всех частных критериев, которые надо обратить в минимум, а знаменатель – произведение максимальных критериев

$$y = \frac{y_1 \cdot y_3 \cdot y_4}{y_2} \quad (1.28)$$

Кроме скалярных существуют также векторные решения задач оптимизации при максимизации одного показателя. Одним из таких методов является весовой – поиск максимально взвешенной суммы для различных значений положительных весовых коэффициентов. Параметрическую запись взвешенной суммы называют весовой поверхностью, поверхность содержит только эффективные точки. Но не все возможные эффективные точки в общем случае принадлежат весовой поверхности. Если весовая поверхность оказывается определенной во всей области интересующих нас значений, то только в этой области она совпадает с искомой областью компромиссов.

Другой метод векторной оптимизации на дискретном множестве заключается в том, что выбирают крайние точки, такие, в которых достигается максимум по какому-либо параметру эффективности. Из оставшихся выделяют крайние лучшие точки, сравнивают с другими, и выявляют неэффективные до тех пор, пока не будут пройдены все точки.

Задача векторной оптимизации, когда параметры эффективности являются линейными функциями на множестве (множество представляет из себя выпуклый многогранник) состоит в нахождении эффективных точек на границе этого многогранника.

Выпуклый многогранник ограничений в пространстве параметров эффекта при линейном отображении является также выпуклым многогранником. Оптимальная поверхность в этом случае представляет собой ту часть границы этого многогранника, которая содержит эффективные опорные точки. Опорная точка будет эффективной, если, во-первых, среди всех остальных опорных точек нет точки, у которой все показатели эффективности не хуже и хотя бы один лучше, и во-вторых, эффективная точка в пространстве должна лежать на границе выпуклого многогранника, то есть не должна быть внутренней точкой многогранника.

Метод векторной оптимизации при гладких целевых функциях и отсутствии ограничений позволяет узнать, есть ли эффективные точки вне области или все возможные точки лежат внутри данной области. В последнем случае объект можно улучшить, только лишь изменив функции, т.е. структуру объекта.

Однако назначить «вес» тому или иному критерию – задача трудная. Специалисту легче сказать, при каком значении данного критерия можно дать процессу положительную или отрицательную оценку. Разнообразие выбора целевых функций позволяет определить оптимальное конструктивное решение, но не дает решить задачу оптимизации по существу.

Если отсутствует целевая функция и для разработчика ценны все выходные показатели процесса, то одним из приемов, позволяющих выделить область лучших решений, является метод Парето. Сначала находится область оптимальных по Парето решений, затем в этой области отыскиваются единственные лучшие решения. Область Парето называют также оптимальной поверхностью или областью компромиссов, поскольку она сочетает наилучшие сочетания параметров эффекта. Для лица, принимающего решения, желательно по каждому из критериев  $f_1, f_2, \dots, f_n$  получить по возможности большее (меньшее) значение, т.е. максимизировать (минимизировать) каждый из критериев. Точка максимума (минимума) на множестве  $X$ , является решением одновременно для всех функций  $f_1, f_2, \dots, f_n$ . Однако на практике этот случай имеет место крайне редко, т.к. такой точки максимума (минимума) как правило, не существует. Следует отметить, что реализация данного метода связана с большим объемом вычислительных операций и значительными трудностями отыскания области компромиссов.

Приступая к анализу технологического процесса, как объекта исследования, мы должны выделить из всей совокупности свойств объекта наиболее важные для проведения дальнейшей оптимизации. Проблема эта не так проста, как кажется на первый взгляд, потому что не ясно, как выделить то свойство, оказывающее на другие определяющее воздействие. Выполнение этого условия и приводит к тому, что мы создаем модель процесса, которую затем и рассматриваем.

Построение целевой функции как инструмента получения параметров эффекта и их оптимизации перспективно при использовании статических моделей, построенных по результатам экспериментального исследования технологического процесса в виде функции отклика. Однако в этом случае необходимым условием является возможность экспериментального определения выбранных параметров эффекта.

Обычно при этом используется планирование эксперимента, то есть процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для получения функции отклика с требуемой точностью.

При планировании эксперимента учитываются:

- стремление к минимизации общего числа опытов;
- одновременное варьирование всеми факторами;
- использование формального алгоритма при проведении планирования.

Алгоритмы планирования эксперимента могут быть применены при любых вычислительных экспериментах для отыскания оптимальных решений.

## 2 Анализ существующих технологий и оборудования для сушки макаронных изделий

### 2.1 Обзор технологий и применяемого оборудования

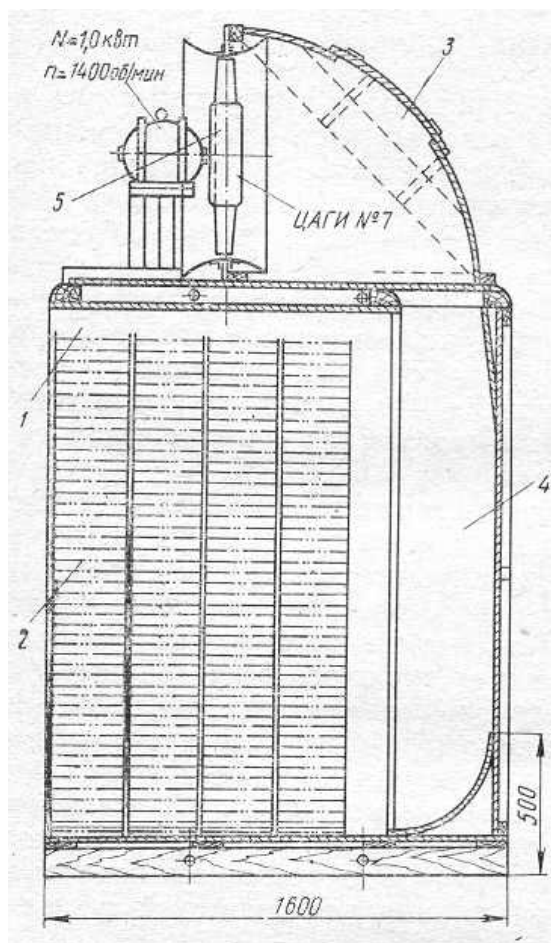
В настоящее время в зависимости от температуры воздуха используют 3 основных режима конвективной сушки макаронных изделий:

- традиционные низкотемпературные (НТ) режимы, когда температура сушильного воздуха не превышает  $60^{\circ}\text{C}$ ;

- высокотемпературные (ВТ) режимы, когда температура сушильного воздуха на определенном этапе сушки достигает  $70-90^{\circ}\text{C}$ ;

- сверхвысокотемпературные (СВТ) режимы, когда температура воздуха превышает  $90^{\circ}\text{C}$ .

Самым старым способом, который положил начало использованию низкотемпературных режимов, является сушка макаронных изделий на открытом воздухе, которая длилась 3-5 суток. При низкотемпературных режимах высушивание производят в шкафных безкалориферных сушилках типа ВВП, 2-ЦАГИ-700, «Диффузор». Сушилка марки ВВП представлена на рисунке 2.1.

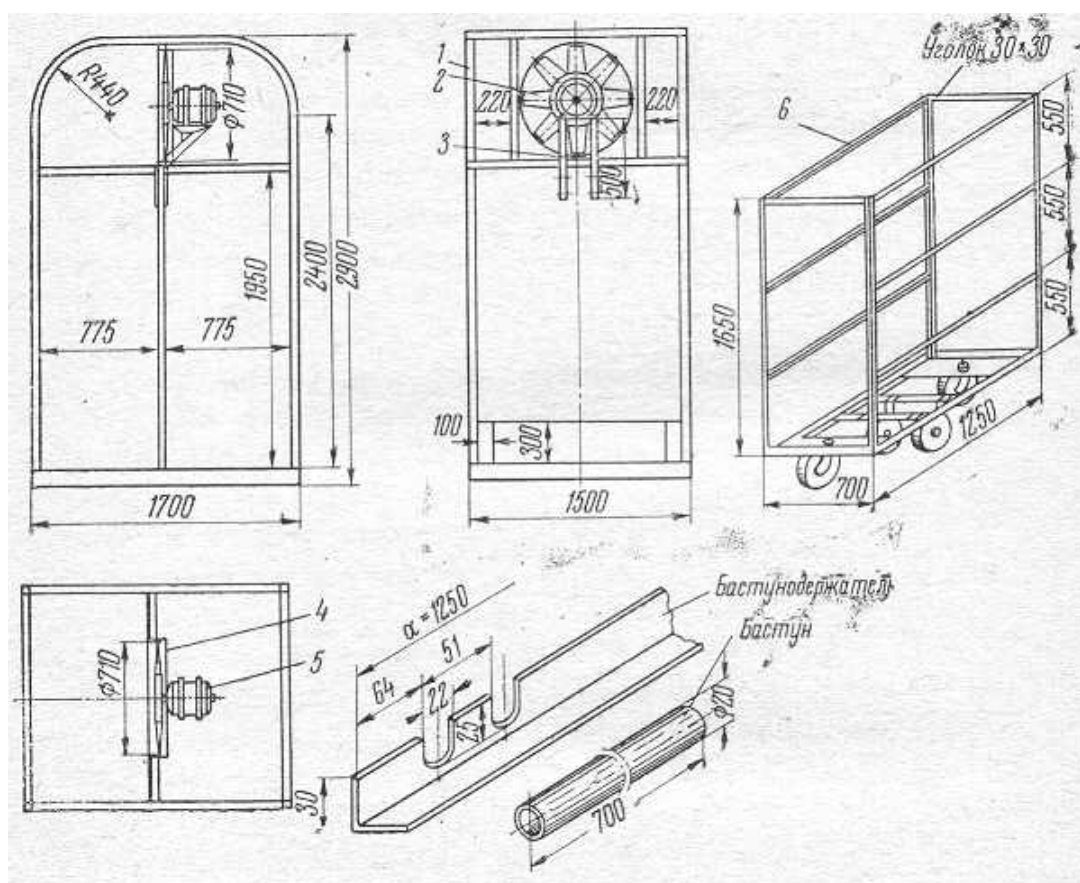


- 1 – сушильная камера;
- 2 – кассеты;
- 3 – кожух вентилятора;
- 4 – обводной распределительный канал;
- 5 – вентилятор ЦАГИ-700.

Рисунок 2.1 – Сушилка марки ВВП

В таких сушилках макаронные изделия сушат при температуре от 30 до 50 °С и в зависимости от ассортимента 5-8 часов для коротких, 16-24 часа для длинных макарон, при влажности сушильного воздуха от 70 до 75 %. Если сушилка заключена в кожух или шкаф закрывается дверцами, то процесс сушки интенсифицируется путем увеличения температуры до 60-65 °С с одновременным увеличением влажности воздуха до 75-80 %.

Е.С. Поляков предложил конструкцию шкафной сушилки закрытого типа специально для сушки длинных макаронных изделий. Сушилка оборудована двумя отсеками закрытого типа, куда закатываются бастуны с подвешенными на них изделиями. Конструкция сушилки представлена на рисунке 2.2.



- 1 – закрытая камера с двумя отсеками;
- 2 – вентилятор;
- 3 – кронштейн;
- 4 – труба для вентилятора;
- 5 – электродвигатель;
- 6 – вагонетка.

Рисунок 2.2 – Шкафная сушилка для подвесной сушки макарон

Недостатками такого способа является длительный процесс сушки и неравномерное удаление влаги с поверхности макаронных изделий, что приводит к сильному искривлению изделий во время сушки. При низкотемпературных режимах макаронные изделия высушиваются также в

паровых конвейерных сушилках типов КСК-4Г-45, КСК-4Г-90, в которых применяются более жесткие режимы высушивания, т.к. за короткий срок (30-90 мин) необходимо полностью высушить продукт. В них используют режим с повышающейся сушильной способностью воздуха: свежий воздух подогревается калорифером до температуры 50-60 °С и влажности 15-20 %, а при выходе из сушилки имеет температуру 50-55 °С и влажность 50 %.

Сушка в жестких режимах приводит к растрескиванию, т.к. макаронные изделия сохраняют свои пластические свойства примерно до влажности 20 %, а при снижении влажности от 20 до 16 % приобретают характер упруго-твердого тела. Исходя из этого, при современных режимах сушки макарон выявлены две технологические стадии, правильное проведение которых позволяет получать готовые изделия высокого качества. Первой из них является предварительная сушка, которая характеризуется большой интенсивностью и практически постоянной скоростью сушки. Что же касается второго периода – окончательной сушки, то здесь предъявляются особые требования к технологическим параметрам режимов сушки, на выходе процесса должны быть строго обеспечены параметры продукта, предусмотренного нормативными документами, в частности финальная влажность продукта должна находиться в диапазоне 12 - 12,5 %.

Однако на первом этапе удаления влаги из изделий степень жесткости режима имеет свои ограничения, поскольку чрезмерно быстрое осушение поверхностного слоя сырых изделий сухим воздухом температурой около 60 °С может привести к его отслаиванию, к образованию чешуйчатой поверхности изделий, вследствие того, что влага не успевает подойти из внутренних слоев плотной структуры тестовых заготовок. Кроме того, при таком режиме сушки резкое превращение влаги изделий в пар может привести к образованию пузырьков в толще ещё пластичных изделий. Поэтому, чем выше температура воздуха в начале сушки, тем выше должна быть его влажность. Так например, Назаровым Н.И. с сотрудниками разработаны режимы с гигротермической обработкой изделий перед сушкой. Сущность их заключается в обработке сырых изделий паровоздушной смесью в течении 2 мин (для макарон) или сухим паром в течении 30 секунд (для короткорезанных изделий). Параметры паровоздушной смеси: температура 95-98 °С, относительная влажность 95 %, температура перегретого пара от 120 до 180 °С: при этом снижается усадка изделий в 1,5-2 раза вследствие ослабления энергии связи влаги с денатурированными белками. Возможно применение более жестких режимов высушивания без опасения появления трещин и паровоздушных пузырьков при использовании гигротермической обработки изделий перед сушкой.

Так известен способ сушки макаронных изделий по патенту РФ № 2101978, предусматривающий на первом этапе удаления влаги путем принудительной циркуляции подогретого до температуры 65 °С и влажности близкой к насыщению (100 %) сушильного воздуха создается эффект бани в течении 20 мин с момента начала сушки, затем влажность воздуха уменьшают до 80 % и продолжают сушку в этом режиме до приобретения полуфабрикатом влажности 19-20 %. В другом способе по патенту РФ № 2087104 паровую



обработку проводят 2 мин при температуре 100-110 °С и относительной влажности 95-98 %. Г.М. Медведев предложил способ производства термообработанных макаронных изделий, при котором они подвергаются воздействию пара, проходя через отверстия матрицы, разогретой до температуры более 80 °С. Пар образуется из внутренней влаги изделий при их разогреве.

Недостатками данных способов является то, что при паровой обработке прогреваются только наружные слои изделия, температура внутренних слоев меньше температуры наружных, градиент температуры мешает дальнейшей сушке макаронных изделий. Клейстеризация крахмала в поверхностном слое макаронных изделий делает их липкими, что усложняет дальнейшую сушку.

В настоящее время используются различные варианты высокотемпературных режимов сушки. Однако главная предпосылка их разработки заключается в том, что повышение температуры сушки макаронных изделий должно сопровождаться повышением относительной влажности воздуха. Высокотемпературная сушка позволяет снизить расход энергии за счет уменьшения продолжительности процесса и сократить производственные площади на единицу вырабатываемой продукции, значительно улучшить её микробиологическое состояние и при правильно подобранных параметрах сушки улучшить цвет и варочные свойства изделий. Используются различные варианты высокотемпературной сушки, так например: применение ВТ режима на предварительной стадии сушки с постепенным ступенчатым снижением температуры воздуха до 40 - 45 °С и дальнейшей стабилизацией изделий при этой температуре. Режим температурной инверсии предусматривает повышение температуры воздуха до максимальной величины и последующее снижение до 40-45 °С. Высокотемпературные режимы используют на автоматизированных линиях фирмы «Брайбанти» с сушилкой GPL/ITRG, где контроль и регулирование температурно-влажностных условий осуществляется программируемой системой «Ротроник». В сушилке используется режим увеличения температуры на стадии предварительной сушки до максимального значения в пределах 75 - 85 °С, а затем с сушкой и стабилизацией изделий при этой же температуре и влажности 82 %, общей продолжительностью 6 часов. Предварительная и окончательная сушка осуществляется на лентах, установленных одна под другой и движущихся в противоположные стороны (см. рисунок 2.3).

Говоря о преимуществах высокотемпературной сушки перед низкотемпературной необходимо иметь ввиду, что чем ниже температура сушки, тем в меньшей степени возникает опасность возникновения в изделиях чрезмерных напряжений сдвига в результате тех или иных нарушений в заданном режиме. Поэтому применение ВТ режимов возможно только на оборудовании, оснащённом автоматизированными системами контроля и регулирования заданного режима.

Фирма «Паван-Мапимпьянти СпА» одна из первых использовала сверхвысокотемпературные режимы сушки как длинных, так и коротких макаронных изделий, при этом на предварительной стадии сушки используется

кратковременный прогрев изделий, температура сушильного воздуха повышается до  $106^{\circ}\text{C}$  у длинных, и до  $97^{\circ}\text{C}$  у коротких изделий, при соответствующей влажности воздуха 93 % и 75 %. Окончательная сушка осуществляется при постепенном незначительном снижении температуры и влажности воздуха.

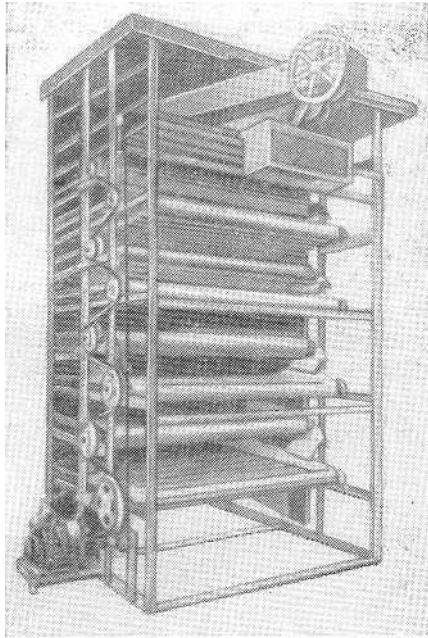


Рисунок 2.3 – Сушилка фирмы «Брайбанти» с нейлоновыми лентами (вид сзади)

Фирма «Бюлер» (Швейцария) разработала систему сверхвысокотемпературной сушки макаронных изделий «Турботорматик». Сущность этой системы заключается в поэтапном повышении температуры воздуха на стадии предварительной сушки до  $95^{\circ}\text{C}$  (за 45 мин в сушилках линий для длинных изделий и за 30 мин для коротких изделий), выдерживании этой температуры в течение 40 мин для длинных изделий и 30 мин для коротких (при относительной влажности воздуха 85 %) и, наконец, в поэтапном снижении температуры сушки до  $85^{\circ}\text{C}$  на стадии окончательной сушки изделий. Общая продолжительность сушки (без их стабилизации) составляет 4,25 часа для спагетти и 2,45 часа для короткорезанных макаронных изделий. Одной из последних разработок фирмы «Паван» является сушилка TAS (термо-активная система), в которой изделия сушатся с помощью пульсирующих режимов, когда периоды сушки сочетаются с периодами отволаживания. Общий вид сушилки поточной линии фирмы «Бюлер» представлен на рисунке 2.4.

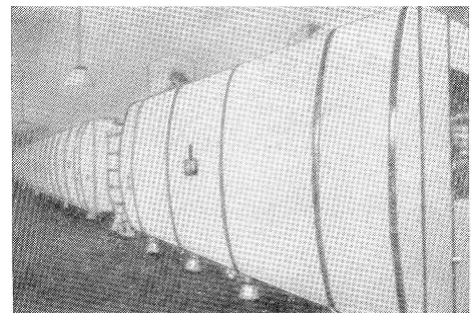
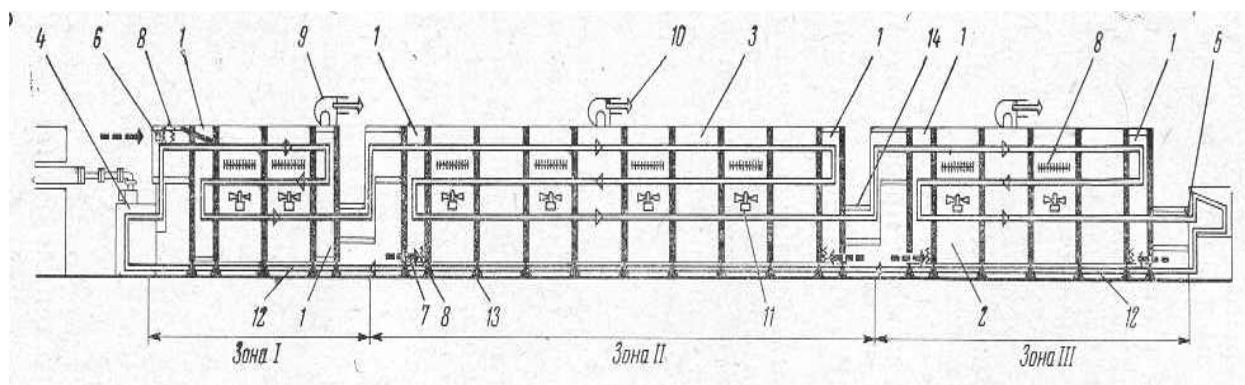


Рисунок 2.4 – Сушилка фирмы «Бюлер»

Схема сушилки для макаронных изделий поточной линии «Бюлер» представлена на рисунке 2.5.



- 1- начальная и конечная фазы сушки в данной зоне;
- 2- вентиляционный блок;
- 3- зона отволаживания;
- 4- ввод сырых изделий в камеру предварительной сушки;
- 5- вывод готовой продукции из камеры стабилизации;
- 6- вентилятор предварительной обдувки;
- 7- подача свежего воздуха;
- 8- радиатор;
- 9- вытяжной вентилятор;
- 10 - выхлоп влажного воздуха;
- 11 - вентилятор для рециркуляции воздуха;
- 12 - конвейер для возврата бастунов;
- 13 - регулируемые опоры для каркаса сушилки;
- 14 - конвейер для бастунов.

Рисунок 2.5 – Схема сушилки для длинных макаронных изделий поточной линии «Бюлер»

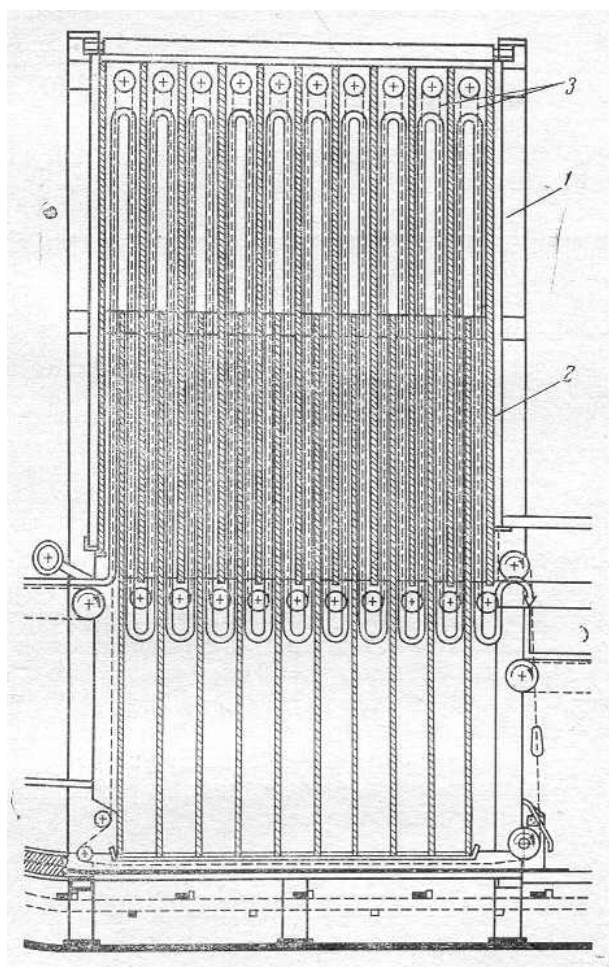
Задача СВТ сушки заключается в выборе температуры и влажности воздуха, продолжительности сушки, режима изменения температуры и влажности высушиваемых изделий на уровне, обеспечивающем получение их высокого качества, по всем показателям не уступающего качеству изделий ВТ или НТ сушки или превосходящего его. Но очевидно, что при СВТ сушке общая продолжительность сушки и время окончательной сушки и стабилизации должны быть особенно короткими. И за этот короткий промежуток времени нужно затратить большое количество энергии, чтобы полностью высушить продукт до оптимального качества. С этой точки зрения конвективная сушка является недостаточно интенсивным способом передачи энергии влажному материалу.

Поэтому значительно более интенсивным способом по сравнению с конвективным является воздействие на продукт энергетического поля - терморadiационная сушка и сушка в электромагнитном поле высокой и сверхвысокой частоты.

Терморadiационная сушка инфракрасными лучами - прогрессивный способ обезвоживания влажных материалов. В качестве генераторов инфракрасного излучения применяют специальные зеркальные лампы (температура нити 220-2500 К), кварцевые трубки (температура нити 2500 К), электронагревательные элементы сопротивления (температура поверхности 873-1173 К) и газовые горелки инфракрасного излучения, в которых происходит беспламенное сжигание газа (температура поверхности 1073 - 1173 К). Инфракрасное облучение выгодно тем, что его энергия мало рассеивается, и коллоидные вещества, в частности макаронное тесто, прогреваются энергией ИК-излучения на глубину до 2 мм. Инфракрасные лучи пробегают путь от генератора излучения до объекта облучения в миллионные доли секунды и, не встречая сопротивления пограничного слоя, что наблюдается при конвективной сушке, обеспечивают эффективное нагревание материала за счет интенсификации движения атомов и молекул в его поверхностных и глубже расположенных слоях.

Лыковым А.В. и Савиной И.М. были разработаны теоретические основы терморadiационной сушки макаронных изделий и рекомендованы пульсирующие режимы сушки короткорезанных изделий с чередованием очень кратковременных 2 - 4 секунды, но интенсивных облучений изделий и более длительного 40 - 80 секунд отволаживания. Нагревание изделий ИК-лучами во много раз интенсивнее, чем при передаче продукту тепла от сушильного воздуха, поэтому при длительном воздействии ИК-лучей влага из изделий удаляется слишком быстро, что может привести к растрескиванию высушенных изделий. Для сушки длинных макаронных изделий инфракрасными лучами используется установка «Rototerm» итальянской фирмы «Паван-Мапимпьянти СпА», а для сушки короткорезанных изделий - отечественная сушилка транспортерного типа УСК МКПА 101.132.001 ПС. Камера «Rototerm» представляет собой батарею инфракрасных излучателей (см. рисунок 2.6). В результате этого происходит поглощение энергии поверхностным слоем, так как пропускание составляет весьма незначительную величину для длин волн больше 3 нм. В камере одновременно происходит прогрев и отволаживание. Принудительная циркуляция воздуха отсутствует. Но данное оборудование обладает большой энергоемкостью, поэтому его применение на всем протяжении сушки экономически невыгодно.

В отличие от терморadiационной и тем более конвективной сушки особенностью сушки в электромагнитном поле токов ВЧ и СВЧ являются прогрев влажного материала на всю глубину независимо от его толщины, т.к. СВЧ-энергия поступает непосредственно в области с повышенной концентрацией влаги и не тратится на повышение температур других частей обрабатываемого продукта.



- 1 – корпус;
- 2 – темные инфракрасные излучатели;
- 3 – конвейер для макарон.

Рисунок 2.6 - Схема камеры «Rototerm»

Известна установка фирмы «Липтон» (США) для сушки короткорезанных изделий с применением СВЧ-энергии. В ней предусмотрен трехстадийный режим сушки: традиционная конвективная предварительная сушка до влажности изделий 20 % (применяется для снижения затрат энергии, т.к. большая стоимость СВЧ-энергии перекрывает экономию от сокращения длительности сушки макаронных изделий), СВЧ-сушка до влажности изделий 14 % при температуре воздуха 80 °С и относительной влажности 20 % и стабилизация изделий при медленном их остывании и снижении влажности до 12,5 %. При этом общая продолжительность высушивания короткорезанных изделий составляет 40-60 минут, из которых период СВЧ-нагрева (частота 915 МГц) – 10-12 минут.

Известен способ по патенту США № 6217918, при котором макаронные изделия подвергаются сверхвысокочастотному воздействию в чашеобразной емкости, что позволяет получить равномерно термообработанный продукт.

Японские ученые предлагают обрабатывать лапшу в микроволновой печи в специализированных пакетах с добавлением воды и получать при этом готовые изделия (по патенту Япония № 6180148).

Медведевым Г.М. совместно с А.Аль Сайедом разработаны пульсирующие режимы СВЧ-сушки с чередованием периодов микроволнового нагрева и остывания изделий без применения конвективной сушки. Ими рекомендован наиболее оптимальный режим СВЧ-нагрева для сушки

вермишели при влажности 30 % и температуре 20 °С с интенсивностью нагрева 2,5 Вт/г и продолжительностью 24-25 минут. Но влияние микроволнового нагрева на другие сорта макаронных изделий не было исследовано.

Хотя СВЧ-нагрев значительно сокращает продолжительность сушки макаронных изделий, но применять его на всем протяжении процесса высушивания невозможно, т.к. до 20 % влажности макаронные изделия являются пластичным материалом, а резкий нагрев их внутренних слоев приводит к образованию паровоздушных пузырьков, с другой стороны, когда высушиваемый материал приобретает характер твердого тела интенсивный прогрев приводит к образованию микротрещин в результате значительного по величине градиента влажности и как следствие, неравномерной усадки слоев изделий, а также к коричневению в результате реакции Майяра. Сушка в поле токов высокой и сверхвысокой частоты, а также терморadiационная сушка макарон ещё недостаточно изучены.

При использовании только одной из технологических схем (НТ, ВТ, СВТ, ИК и СВЧ) на всем протяжении сушки имеется опасность снижения качества макаронных изделий, даже если для их изготовления было использовано высококачественное сырьё, и лишь определенные сочетания режимов сушки дают возможность получить изделия оптимального качества.

## **2.2 Средства автоматизации технологии**

В настоящее время некоторые поточные линии производства макаронных изделий автоматизированы. Основными контролируемыми технологическими параметрами процессами сушки считаются температура и влажность воздуха в зонах сушилки, а также температура и влажность самого продукта. Однако, в настоящее время, осуществлять непрерывные измерения температуры и влажности обрабатываемого продукта не представляется возможным. Как правило, измерение параметров, характеризующих состояние продукта в основных зонах сушки, выполняется периодически по определенным методикам с использованием специального лабораторного оборудования и приборов. С внедрением в производство макаронных изделий наиболее прогрессивных технологий высокотемпературной и сверхвысокотемпературной сушки непрерывный контроль параметров в динамике сушки стал совершенно необходимым.

Автоматическое измерение, регистрация и регулирование параметров технологических процессов, а также управление механизмами поточных линий различных модификаций осуществляется с помощью автоматических систем. В состав типовой системы управления поточной линией входят:

- специализированные датчики (температуры, влажности и др.), размещенные в характерных для процессов сушки зонах сушилки;
- измерительные приборы и регистраторы для визуального контроля за ходом процессов;

- автоматические регуляторы, обеспечивающие стабилизацию технологических процессов посредством воздействия на исполнительные механизмы запорных и регулирующих органов (клапанов, заслонок, переключателей);

- органы дистанционного ручного управления (ключи, кнопки клавиши).

В качестве средств автоматизации используются:

- датчики температуры, которые представляют собой термочувствительные элементы с изменяющимся электрическим сопротивлением;

- датчики измерения относительной влажности сушильного воздуха, которые представляют собой пары термометров, один из каждой пары является «мокрым», другой «сухим». Автоматическая система регулирования обеспечивает режим сушки путем поддержания требуемой разницы между показаниями «сухого» и «мокрого» термометров;

- емкостно-резисторные датчики, которые представляют собой гигроскопический полимер (диэлектрик), который изменяет свои свойства в зависимости от влажности среды. Распространены две модификации этого датчика:

- ZUT-C, применяемая для контроля температуры и влажности среды до  $100^{\circ}\text{C}$  и двумя выходными сигналами напряжения постоянного тока (0-1 В);

- НТR, применяемая для контроля температуры и влажности среды от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $150^{\circ}\text{C}$  с двумя выходными сигналами постоянного тока (4-20 мА). Один из пары выходных сигналов датчиков пропорционален влажности, другой температуре среды;

- энкодеры, которые позволяют контролировать различные физические и механические процессы и посылать кодированные серии дискретных сигналов (импульсов), которые, в свою очередь, могут быть использованы для дистанционного управления механизмами и системами регулирования;

- программируемые логические средства управления, которые представляют собой статические и динамические схемы, функционирование которых достигается коммутацией соответствующих компонентов схемы проводными связями в зависимости от программы, заложенной в эту схему.

Созданные системы управления ввиду невозможности полноценного непрерывного измерения параметров обрабатываемого материала основаны на контроле и регулировании параметров теплоносителя. Для дальнейшего улучшения качества необходимы прямые измерения параметров материала, а именно их структурно-механических характеристик, т.к. макаронные изделия по мере удаления влаги теряют свойства пластичности.

Если свойства или условия работы сложного технологического процесса недостаточно известны или существенно непостоянны, то необходима адаптация характеристик системы. В систему в этом случае встраивается вычислительное устройство, которое пересчитывает значения фактически работающей передаточной функции до тех пор, пока отклонение регулируемого квантованного параметра не придет к нулю за минимально возможное время.

### 3 Математическая модель процесса сушки макаронных изделий

#### 3.1 Анализ растрескивания упруго-пластического материала

Лыков А.В., Ауэрман Л.Я. связали влагораспределение внутри материала с геометрическими размерами тел (толщиной слоя). Поэтому рассмотрим процесс потери влаги макаронными изделиями, принимая слой изделий за неограниченную пластину толщиной  $2R$  (половина толщины пластины). Экспериментально установлено, что для макаронных изделий зависимость длины от влажности  $l = f(W)$  получается линейной практически на всем протяжении их сушки и увлажнения (рисунок 3.1). Такая линейная зависимость может быть выражена следующим образом

$$\begin{aligned} l &= l_0(1 + \alpha W) \\ &\text{или} \\ l &= l_0(1 + \alpha U), \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $l$  – длина макаронных изделий, мм;  
 $l_0$  – первоначальная длина макаронных изделий, мм;  
 $\alpha$  – коэффициент интенсивности усадки;  
 $W$  – средневзвешенная влажность макаронных изделий, %;  
 $U$  – влажность материала в любой его точке, %.

Усадку можно характеризовать с помощью величины  $\delta$  – это относительная по отношению к первоначальной длине усадка.

Причем

$$\delta = \frac{l_1 - l_2}{l_1} = \frac{l_0 - l}{l_0} \quad (3.2)$$

Интенсивность усадки лучше характеризовать величиной  $\alpha$ .

В случае, если зависимость  $l = f(W)$  представляет собой прямую линию, то коэффициент линейной усадки определяли из графика усадки по тангенсу угла наклона прямой

$$\alpha = \frac{1}{l} \operatorname{tg} \varphi \quad (3.3)$$

Можно также определить коэффициент линейной усадки по формуле

$$\alpha = \frac{\delta}{(W_1 - W_2) - \delta \cdot W_1} \quad (3.4)$$

При этом использовались графики изменения длины при сушке (рисунок 3.1).



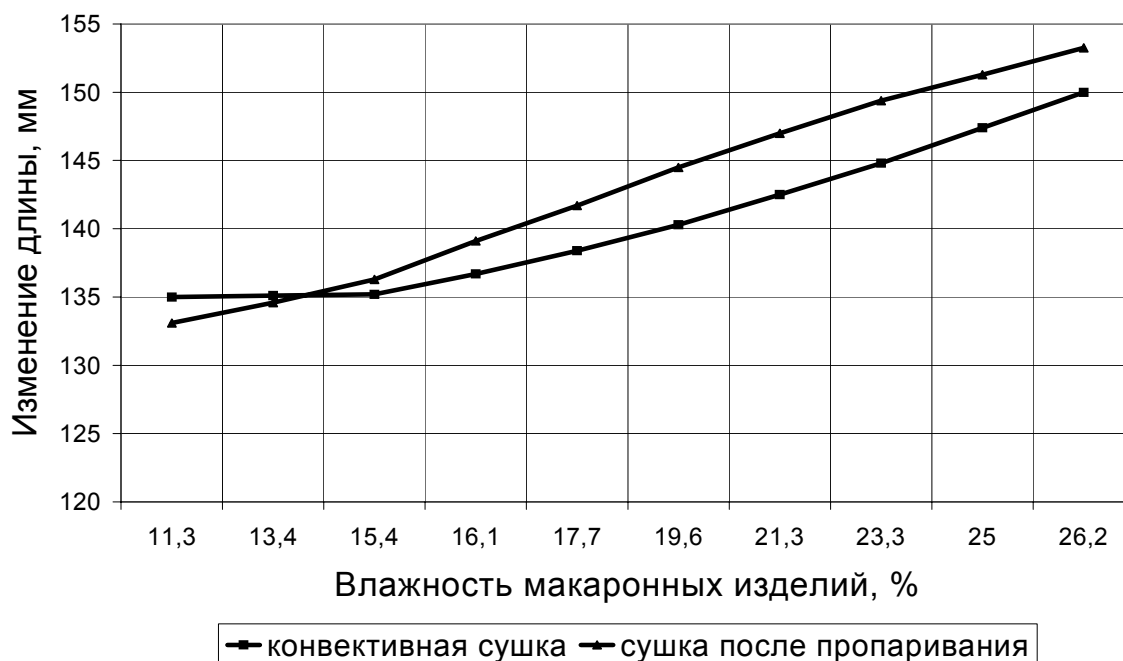


Рисунок 3.1 – Графики изменения длины при сушке

Анализируя графики изменения длины изделий в процессе сушки можно сделать вывод, что коэффициент линейной усадки остается практически постоянным на всем протяжении сушки. Сушка различных слоев изделий происходит неравномерно. Поэтому линейная деформация определяется

$$\varepsilon = \delta - \xi, \quad (3.5)$$

где  $\xi$  - фактическая относительная усадка, причем её величина связана с возникающими в материале в данных слоях изделий напряжениями.

Как указывалось выше, слой высушиваемых макаронных изделий соответствует неограниченной пластине толщиной  $2R$ . Будем считать, что испарение происходит с двух противоположных поверхностей.

Распределение влажности можно принять за параболическое

$$U = U_{ц} - \left(\frac{X}{R}\right)^2 \cdot (U_{ц} - U_{п}), \quad (3.6)$$

где  $U$  – влажность в точке с координатой  $X$ , %;

$U_{ц}$  – влажность центральных слоев, %;

$U_{п}$  – влажность поверхностных слоев, %.

Для определения деформаций и напряжений в слое представим, что слой состоит из тонких (бесконечно тонких) полосок (стержней). Если бы они сжимались при сушке самостоятельно, независимо друг от друга, то относительное сокращение их (относительная усадка к первоначальной длине  $l_0$ ) будет равна

$$\delta = \frac{l_0 - l}{l_0}, \quad (3.7)$$

или подставив уравнения (3.1) и (3.2)

$$\delta = \frac{\alpha}{1 + \alpha U_H} \left[ (U_H - U_{ц}) + \left( \frac{X}{R} \right)^2 \cdot (U_{ц} - U_{п}) \right], \quad (3.8)$$

где  $U_H$  – начальная влажность (до сушки) пластины, %;

$\alpha$  – коэффициент интенсивности усадки.

Подвесную сушку макаронных изделий стремятся проводить при толщине слоя равном толщине одного изделия. Следовательно, в этом случае, когда каждые полоски слоя сокращались бы самостоятельно, относительное сокращение  $|\delta|$  их отображалось бы параболической кривой  $\delta = f(x)$  (см. рисунок 3.2)

Однако, действительные сокращения будут одинаковы и отобразятся прямой  $|\xi_c|$  параллельной оси абсцисс.

Вследствие несовпадения кривой  $\delta$  и прямой  $\xi_c$  в пластине возникают напряжения  $|\sigma|$ , зависящие от разности между той деформацией  $\delta$ , которую имела бы данная полоска, если бы её свобода сокращения ничем не была бы ограничена и деформацией  $\xi_c$ , которую получила полоска в действительности. Причем центральные слои будут испытывать деформацию сжатия  $\varepsilon' = \xi_c - \delta$ ,  $\xi_c > \delta$ , а поверхностные  $\varepsilon' = \delta - \xi_c$  - деформацию растяжения.

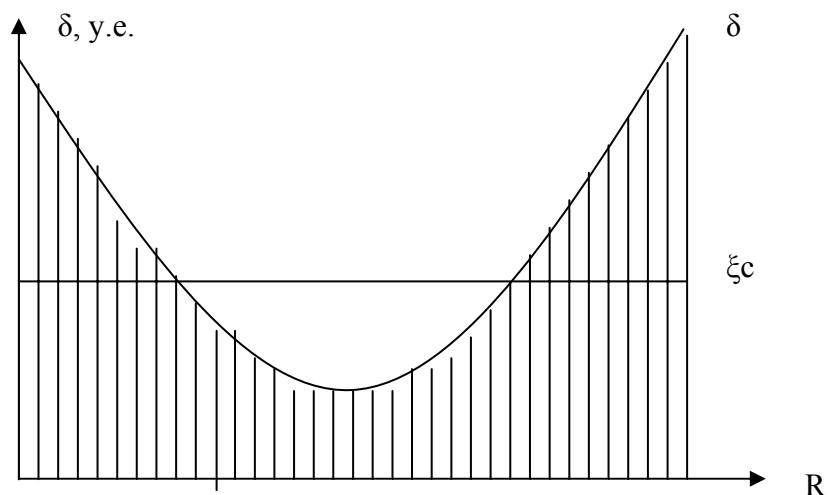


Рисунок 3.2 – Послойное сокращение макаронных изделий

Положение прямой  $\xi_c$  определяется следующими условиями: все внутренние перемещения находятся в равновесии  $\int_0^R (\xi_c - \delta) \cdot dx = 0$ .

Если подставить вместо  $\delta$  его выражение (3.8), то получим

$$\xi_c = \frac{\alpha}{1 + \alpha \cdot U_H} \left[ (U_H - U_{II}) + \frac{1}{3} (U_{II} - U_{II}) \right] \quad (3.9)$$

Деформации же поверхностных и центральных слоев соответственно будут

$$\varepsilon_{II} = \delta_{II} - \xi_c = \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{\alpha}{1 + \alpha \cdot U_H} \right) \cdot \Delta U ; \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{II} = \xi_c - \delta_{II} = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{\alpha}{1 + \alpha \cdot U_H} \right) \cdot \Delta U , \quad (3.11)$$

где  $\Delta U = U_{II} - U_{II}$ .

Разница  $\Delta U$  прямо пропорциональна градиенту влажности у поверхностного слоя  $|\nabla U|_{II}$ , так как

$$|\nabla U|_{II} = \left( \frac{dU}{dn} \right)_{II} = \frac{2}{R} \Delta U \quad (3.12)$$

Появление трещин на поверхности обусловлено предельным напряжением  $\sigma_n = \sigma_m$ , причем деформации не приводящие к разрушению изделий могут быть только упругими, т.к. все остальные виды деформаций приведут к разрушению изделий.

Поэтому справедливо

$$\sigma_m = E \cdot \varepsilon_{II} , \quad (3.13)$$

где  $\varepsilon_n$  – линейная относительная деформация;

$E$  – модуль упругости при линейной деформации, Па.

Причем для первого этапа действует дополнительное ограничение  $\sigma_m \leq \sigma_T$ ,

где  $\sigma_T$  – предел текучести при растяжении, Па

Отсюда

$$\sigma_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha \cdot E}{(1 + \alpha \cdot U_H)} \cdot \Delta U_{MAX} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\alpha \cdot E \cdot R}{(1 + \alpha \cdot U_H)} \cdot (\nabla U_{II})_{MAX} \quad (3.14)$$

Следует отметить, что  $E$  является функцией от влажности и температуры поверхностного слоя макаронных изделий.

При любом (не параболическом) законе распределения влажности, т.е. при толщине слоя высушиваемых макаронных изделий не равном толщине одного изделия, предельное напряжение для поверхностных слоев будет равно

$$\sigma_m = \frac{\alpha \cdot E}{(1 + \alpha \cdot U_H)} \cdot (W - U_H) \quad (3.15)$$

Выше было отмечено, что образование трещин всегда можно приписать действию растягивающего напряжения.

Однако в объемно-напряженном состоянии, когда наряду с растягивающим и сжимающим напряжениями действуют также опасные касательные напряжения, линейная деформация сопровождается сдвигом.

Из общей теории упругости известно, что для твердых тел при наличии линейной деформации, сопровождающейся сдвигом, наибольшие касательные напряжения возникают в плоскостях, составляющих угол в  $45^\circ$  с направлением линейной деформации. В этих условиях максимальное скалывающее напряжение достигает по величине половины максимальных нормальных напряжений.

В соответствии с этим деформацию сдвига выражают через деформацию растяжения на основании связи, существующей между модулем и коэффициентом упругости. Так, например, величина угла сдвига  $\varphi$ , сопровождающего линейную деформацию  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ , связана с нею равенством

$$\varphi = (1 + \mu) \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

Здесь 
$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S} = \frac{1}{E} \cdot \sigma_m \quad (3.16)$$

Сдвиг на угол  $\varphi$  вызывается скалывающим напряжением  $\sigma_t = K_1 \sigma_m$ , с которым он связан равенством

$$\varphi = \frac{\sigma_t}{E_{сдв}} = \frac{\sigma_m}{K_1 E_{сдв}} \quad (3.17)$$

После подстановки этих выражений для  $\varphi$  и  $\frac{\Delta l}{l}$  в связывающее их равенство и сокращая на  $\sigma_m$  получим:

$$\frac{1}{K_1 \cdot E_{сдв}} = \frac{1 + \mu}{E}$$

или 
$$E_{сдв} = \frac{E}{K_1(1 + \mu)} \quad (3.18)$$

Подставим теперь в формулу (3.14) значение величины  $E$ , выраженное через модуль сдвига, коэффициент  $K_1$  и коэффициент Пуассона  $\mu$ .

$$|\nabla U|_{\Pi} = \frac{3 \cdot (1 + \alpha \cdot U_{\Pi}) \cdot \sigma_m \cdot K_1}{\alpha \cdot E_{сдв} \cdot (1 + \mu) \cdot R}. \quad (3.19)$$

По формуле (3.19), зная механические характеристики макаронных изделий, можно вычислить максимально допустимый градиент влажности на поверхности макарон  $|\nabla U|_{\Pi}$ . В эту формулу входит величина ( $\sigma_m$  - предельное нормальное напряжение, соответствующее началу процесса трещинообразования), которую трудно определить из опыта, т.к. она сильно зависит от скорости нагружения.

В опытах фактически наблюдается не момент начала образования трещин, а уже их развитие. В связи с этим, наблюдаемые значения предельного напряжения растяжения  $\sigma'_m$  существенно превышает величину  $\sigma_m$ , входящую в расчетную формулу. Для того, чтобы при определении истинного значения  $\sigma_m$  можно было пользоваться любым прибором, и в частности, прибором ПМ (прибор Медведева, разработанный в лаборатории макаронного производства московского технологического института пищевых производств), имеющим достаточно большую скорость нагружения, целесообразно ввести относительный коэффициент, который находится из соотношения

$$\frac{\sigma_m}{\sigma'_m} = K_2, \quad (3.20)$$

где  $\sigma_m$  – истинное значение предельных нормальных напряжений.

Коэффициент  $K_2$  учитывает конструктивные особенности прибора и свойства испытываемого тела.

Тогда формула (3.19) примет вид

$$|\nabla U|_{\Pi} = \frac{3 \cdot (1 + \alpha \cdot U_{\Pi}) \cdot \sigma'_m \cdot K_1 \cdot K_2}{\alpha \cdot E_{сдв} \cdot (1 + \mu) \cdot R} \quad (3.21)$$

В связи с тем, что слой макаронных изделий, состоящий из единичных изделий различного поперечного сечения имеет неровные поверхности влагоотдачи и может иметь пустоты внутри (для трубчатых изделий), реальный градиент влажности должен быть несколько ниже, чем рассчитываемый по формуле (3.21).

Для учета вышесказанного, введем коэффициент  $\xi_l$ , учитывающий форму поперечного сечения входящих в слой изделий и форму поверхности слоя.

Тогда уравнение (3.15) переписется в виде

$$|\nabla U|_{II} = \frac{3 \cdot (1 + \alpha \cdot U_{II}) \cdot \sigma_m' \cdot K_1 \cdot K_2}{\alpha \cdot E_{сдв} \cdot (1 + \mu) \cdot R \cdot \xi_1} \quad (3.22)$$

Коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$  и  $\xi_1$  можно объединить в общий коэффициент  $K$ , учитывающий реологические свойства материала, конструктивные особенности прибора, форму единичных изделий, образующих макаронный слой и кривизну поверхности слоя изделий.

Тогда формула для определения максимально возможного градиента влажности, с которым можно высушивать изделия примет вид

$$|\nabla U|_{II} = \frac{3 \cdot (1 + \alpha \cdot U_{II}) \cdot \sigma_m' \cdot K}{\alpha \cdot E_{сдв} \cdot (1 + \mu) \cdot R} \quad (3.23)$$

В данной формуле коэффициент  $K$  остается неизменным на всем протяжении сушки, модуль сдвига  $E$  и коэффициент Пуассона  $\mu$  являются функциями от влажности  $U_n$  и температуры поверхности  $t_n$ , которые в свою очередь являются функциями от параметров сушки.

### 3.2 Методика построения математической модели процесса сушки макаронных изделий на основе теории трещинообразования

Анализ зависимостей удлинения от прилагаемой нагрузки, относительного удлинения при растяжении и удельной прочности, полученных от различных влажностей, позволил выделить 3 периода с различными реологическими свойствами макаронных изделий:

- в первом периоде, продолжительностью около 20 мин данная зависимость наиболее точно описывается реологической моделью Бингама (рисунок 3.3).

Эта модель математически описывается зависимостью

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{(\sigma - \sigma_T)}{\eta_T}, \quad (3.24)$$

где  $\dot{\varepsilon}$  - скорость продольного течения, с<sup>-1</sup>;

Па/с;

$\dot{\sigma}$  - скорость изменения нормального напряжения,

$\sigma$  - нормальное напряжение, Па;

$\sigma_T$  - предел текучести при растяжении, Па;

Па;

$\eta_T$  - вязкость при продольном течении, с<sup>-1</sup>;

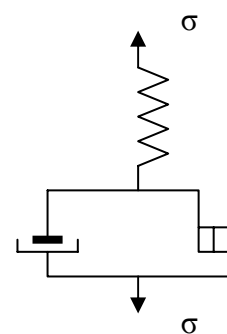


Рисунок 3.3

- во втором периоде, от 20 до 30 мин, вышеуказанные зависимости достаточно точно описываются моделью Максвелла (рисунок 3.4).

Для этой модели справедливо уравнение

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta_T} ; \quad (3.25)$$

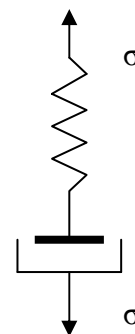


Рисунок 3.4

- в третьем периоде, после 30 мин сушки: зависимости удлинения от прилагаемой нагрузки имеют линейный характер и описываются моделью Гука (рисунок 3.5).

$$\sigma = \varepsilon \cdot E , \quad (3.26)$$

где  $\varepsilon$  - это относительная деформация.

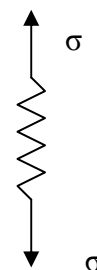


Рисунок 3.5

При выборе параметров сушки возникает необходимость определения внутренних напряжений, которые могут выдержать изделия. Автоматизированное определение данных напряжений вызывает значительные трудности в виду того, что напряжение зависит от поперечного сечения изделий, а как следствие от его вида. Поэтому является целесообразным измерение линейной деформации с последующим расчетом возникающих при этом напряжений. Эти расчетные зависимости можно получить из уравнений (3.24), (3.25), (3.26) при условии, что измерительное устройство растягивает образец с постоянной скоростью, таким образом  $\dot{\varepsilon} = const$ , причем в дальнейшем  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\%$  - названо относительным удлинением при растяжении. Тогда для первого этапа изменения реологических свойств макаронных изделий в процессе сушки уравнение (3.24) запишем в виде

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\sigma}{E \cdot dt} + \frac{(\sigma - \sigma_T)}{\eta_T} \quad (3.27)$$

После преобразования получим дифференциальное уравнение с разделяемыми переменными

$$\frac{d\sigma}{\sigma - \sigma_T - \dot{\varepsilon} \cdot \eta_T} = -\frac{E}{\eta_T} dt$$

Проинтегрировав его, получим:

$$\text{или } \sigma - \sigma_T - \dot{\varepsilon} \eta_T = \left( e^{-\frac{E}{\eta_T} t} \right) \cdot C', \quad \text{где } C' = e^C$$

$$\text{или } \sigma = \dot{\varepsilon} \eta_T + \left( e^{-\frac{E}{\eta_T} t} \right) \cdot C' + \sigma_T$$

Учитывая, что в начале растяжения  $t_0=0$  и  $\sigma_0 = 0$ , имеем:

$$0 = \dot{\varepsilon} \eta_T + e^0 C' + \sigma_T, \text{ откуда } C' = -\sigma_T - \dot{\varepsilon} \eta_T$$

Окончательное уравнение примет вид

$$\sigma = (\dot{\varepsilon} \eta_T + \sigma_T) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{E}{\eta_T} t} \right) \quad (3.28)$$

При постоянной скорости сушки, учитывая, что  $\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\Delta t}$ , где  $\Delta t = t - t_0 = t$ ,

т.к.  $t_0 = 0$ , получим

$$\sigma = \left( \varepsilon \eta_T + \sigma_T \right) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T}} \right). \quad (3.29)$$

Таким образом, согласно формуле (3.29) существует четкая связь между относительным удлинением при растяжении и нормальным напряжением.

В выражении (3.29)  $\dot{\varepsilon} = const$ , а  $\eta_T, \sigma_T, E$  определяются по зависимостям нормального напряжения от удлинения, полученным на приборе ПМ. Методика описана в следующей главе.

Для второго периода изменения реологических свойств макаронных изделий в процессе сушки из уравнения (3.25) получим математическую зависимость вида

$$\sigma = \varepsilon \eta_T \left( 1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}} \right). \quad (3.30)$$



Для третьего периода изменения реологических свойств макаронных изделий в процессе сушки из уравнения (3.26) получим выражение вида

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (3.31)$$

Подставив в выражение (3.23) выражения (3.29), (3.30), (3.31) получаем

$$|\nabla U|_{II} = \frac{3 \cdot (1 + \alpha \cdot U_{II}) \cdot K \cdot (\dot{\varepsilon} \eta_T + \sigma_T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}}\right)}{\alpha \cdot E_{СДВ} \cdot (1 + \mu) \cdot R} \quad (\text{для первого периода}),$$

$$|\nabla U|_{II} = \frac{3 \cdot (1 + \alpha \cdot U_{II}) \cdot K \cdot (\dot{\varepsilon} \eta_T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}}\right)}{\alpha \cdot E_{СДВ} \cdot (1 + \mu) \cdot R} \quad (\text{для второго периода}), \quad (3.32)$$

$$|\nabla U|_{II} = \frac{3 \cdot (1 + \alpha \cdot U_{II}) \cdot K \cdot E \cdot \varepsilon}{\alpha \cdot E_{СДВ} \cdot (1 + \mu) \cdot R} \quad (\text{для третьего периода}),$$

где коэффициенты  $\alpha$ ,  $K$  постоянны на всем протяжении сушки;

$E$ ,  $E_{СДВ}$ ,  $\eta_T$ ,  $\sigma_T$  – являются реологическими параметрами поверхностных слоев макаронных изделий, а также функциями от влажности и температуры поверхностных слоев;

$\dot{\varepsilon}$  – скорость растягивания образца изделий, мм/с, является постоянной величиной, которую можно регулировать;

$U_{II}$  – является функцией от влажности и температуры окружающего воздуха.

Таким образом, в любой момент времени определяя относительное удлинение  $\varepsilon$  можно судить о нормальных напряжениях  $\sigma$ , возникающих в макаронных изделиях, а по ним определять параметры сушки.

При параболическом распределении влаги выполняется условие

$$U_{II} - W_{СР.ВЗВ.} = 2(W_{СР.ВЗВ.} - U_{II}), \quad (3.33)$$

отсюда

$$U_{II} = 3W_{СР.ВЗВ.} - 2U_{II},$$

т.е.

$$|\nabla U|_{II} = \frac{2}{R}(U_{II} - U_{II}) = \frac{2}{R}(3W_{СР.ВЗВ.} - 3U_{II}) = \frac{6}{R}(W_{СР.ВЗВ.} - U_{II}), \quad (3.34)$$

где  $W_{СР.ВЗВ.}$  – средневзвешенная влажность макаронных изделий (определяется из кривой сушки), %;

$U_{II}$  – влажность поверхностных слоев макаронных изделий, (является практически равновесной влажностью, соответствующей параметрам сушильного агента), %.

Подставив уравнение (3.34) в уравнения (3.32) получим

$$U_{II} = \frac{2 \cdot W_{CP.B3B} \cdot \alpha \cdot E_{CDB} \cdot (1 + \mu) - K \cdot (\dot{\varepsilon} \cdot \eta_T + \sigma_T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}}\right)}{2 \cdot \alpha \cdot E_{CDB} \cdot (1 + \mu) + \alpha \cdot K \cdot (\dot{\varepsilon} \cdot \eta_T + \sigma_T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}}\right)} \quad (\text{для первого периода}),$$

$$U_{II} = \frac{2 \cdot W_{CP.B3B} \cdot \alpha \cdot E_{CDB} \cdot (1 + \mu) - K \cdot (\dot{\varepsilon} \cdot \eta_T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}}\right)}{2 \cdot \alpha \cdot E_{CDB} \cdot (1 + \mu) + \alpha \cdot K \cdot (\dot{\varepsilon} \cdot \eta_T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}}\right)} \quad (\text{для второго периода}), (3.35)$$

$$U_{II} = \frac{2 \cdot W_{CP.B3B} \cdot \alpha \cdot E_{CDB} \cdot (1 + \mu) - K \cdot E \cdot \varepsilon}{2 \cdot \alpha \cdot E_{CDB} \cdot (1 + \mu) + \alpha \cdot K \cdot E \cdot \varepsilon} \quad (\text{для третьего периода})$$

или

$$U_{II} = \frac{\frac{2 \cdot W_{CP.B3B} \cdot E \cdot \alpha}{K_1} - K \cdot (\dot{\varepsilon} \cdot \eta_T + \sigma_T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}}\right)}{\frac{2 \cdot E \cdot \alpha}{K_1} + \alpha \cdot K \cdot (\dot{\varepsilon} \cdot \eta_T + \sigma_T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}}\right)} \quad (\text{для первого периода}),$$

$$U_{II} = \frac{\frac{2 \cdot W_{CP.B3B} \cdot E \cdot \alpha}{K_1} - K \cdot (\dot{\varepsilon} \cdot \eta_T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}}\right)}{\frac{2 \cdot E \cdot \alpha}{K_1} + \alpha \cdot K \cdot (\dot{\varepsilon} \cdot \eta_T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}}\right)} \quad (\text{для второго периода}), (3.36)$$

$$U_{II} = \frac{\frac{2 \cdot W_{CP.B3B} \cdot \alpha}{K_1} - K \cdot \varepsilon}{\frac{2 \cdot \alpha}{K_1} + \alpha \cdot K \cdot \varepsilon} \quad (\text{для третьего периода}).$$

Для определения влияния возмущающих воздействий на объект управления проводились исследования на различном сырье, коэффициенты рассчитаны по приведенным в приложении А методикам, затем получены зависимости каждого коэффициента от исходного относительного удлинения при растяжении макаронных изделий.

Для нахождения зависимостей реологических характеристик макаронного полуфабриката от его влажности, температуры и исходного относительного удлинения при растяжении был проведен трехфакторный эксперимент на основе композиционного ортогонального плана ПФЭ 2<sup>3</sup>. По результатам

эксперимента получены уравнения регрессии второго порядка, адекватно описывающие изменение  $E$ ,  $\eta_T$ ,  $\sigma_T$  от относительного удлинения при растяжении материала  $\varepsilon_M$ , влажности материала  $U_M$  и его температуры  $t_M$ , при их изменениях в пределах

$$5 \leq \varepsilon_M \leq 26$$

$$15 \leq U_M \leq 36$$

$$10 \leq t_M \leq 120$$

Для каждой точки эксперимента исследования проводились в трех повторностях. Получены уравнения регрессии для определения предела текучести при растяжении при разных скоростях растягивания образцов

$$\sigma_T = 39 + 48,4 \cdot U_M - 8,6 \cdot t_M - 1,4 \cdot \delta_M \cdot U_M \cdot t_M - 8,3 \cdot \varepsilon_M^2 + 8,0 \cdot U_M^2 + 12,3 t_M^2, \quad (3.37)$$

где величины  $\varepsilon_M, U_M, t_M$  даны в безразмерном выражении, т.к. при расчете коэффициентов уравнения при проведении трехфакторного эксперимента они меняются на двух уровнях – верхнем и нижнем.

Для удобства пользования полученными данными результаты расчетов эксперимента переведены в натуральную размерность

$$\varepsilon'_M = 10,5 \cdot \varepsilon_M + 15,5;$$

$$U'_M = 10,5 \cdot U_M + 25,5;$$

$$t'_M = 55 \cdot t_M + 65.$$

Величины со штрихом - в натуральной размерности.

Получены уравнения регрессии для определения вязкости при продольном течении при разных скоростях растягивания образцов

$$\eta_T = 73910 - 880 \cdot \varepsilon_M - 48760 \cdot U_M - 790 \cdot U_M \cdot t_M - 63920 \cdot \varepsilon_M^2 + 70080 \cdot U_M - 63350 \cdot t_M \quad (3.38)$$

$$\text{для } \dot{\varepsilon} = 0,167 \text{ с}^{-1}$$

$$\eta_T = 57280 - 440 \cdot \varepsilon_M - 35890 \cdot U_M + 1000 \cdot t_M - 380 \cdot U_M \cdot t_M - 50170 \cdot \varepsilon_M^2 + 51040 \cdot U_M - 47060 \cdot t_M \quad (3.39)$$

$$\text{для } \dot{\varepsilon} = 0,333 \text{ с}^{-1}$$

Получены уравнения регрессии для определения модуля упругости при линейной деформации при разных скоростях растягивания образцов

$$E = 149 - 129 \cdot \varepsilon_M - 177 \cdot U_M + 181 \cdot U_M \cdot t_M - 240 \cdot \varepsilon_M \cdot t_M + 135 \cdot \varepsilon_M^2 + 180 \cdot U_M^2 + 116 \cdot t_M^2 \quad (3.40)$$

$$\text{для } \dot{\varepsilon} = 0,167 \text{ с}^{-1}$$

$$E = 159 - 21 \cdot \varepsilon_M - 394 \cdot U_M + 29 \cdot t_M - 53 \cdot U_M \cdot t_M + 60 \cdot \varepsilon_M^2 + 259 \cdot U_M^2 + 130 \cdot t_M^2 \quad (3.41)$$

для  $\dot{\varepsilon} = 0,333 \text{ с}^{-1}$

Начальные условия для теплообмена в слое макаронных изделий задаются уравнениями влагосодержания поверхностного слоя и значениями гигротермического состояния воздуха.

Получено уравнение регрессии для определения зависимости  $U_{II}$  от параметров сушильного воздуха и относительного удлинения при растяжении на всех этапах

$$U_{II} = 8,3 - 4,9 \cdot \varphi + 7,5 \cdot t_B - 2,7 \cdot \varphi \cdot t_B + 1,1 \cdot \varepsilon_{ИСХ}^2 + 2,5 \cdot \varphi^2 + 3,4 \cdot t_B^2, \quad (3.42)$$

где  $t_B$  - температура сушильного воздуха, в безразмерном выражении;  
 $\varphi$  - его относительная влажность, в безразмерном выражении.

Для перевода в натуральную размерность используются уравнения

$$\begin{aligned} t_B' &= 45 \cdot t_B + 55; \\ \varphi' &= 30 \cdot \varphi + 65; \\ \varepsilon_{ИСХ}' &= 4 \cdot \varepsilon_{ИСХ} + 9 \end{aligned} \quad (3.43)$$

На первом этапе сушки наблюдается некоторое увлажнение поверхности и, как следствие, центра материала под воздействием пара. При этом  $U_{II}$  является функцией от давления и температуры пара. Температура пара находится из уравнения (3.33) при величине достоверности аппроксимации 0,9927

$$t_{II} = t_B = 0,2664 \cdot P_{II} + 72,35 \quad (3.44)$$

Для перевода значения температуры пара в натуральную размерность ( $^{\circ}\text{C}$ ) используется выражение

$$t_{II}' = 11 \cdot t_{II} + 110. \quad (3.45)$$

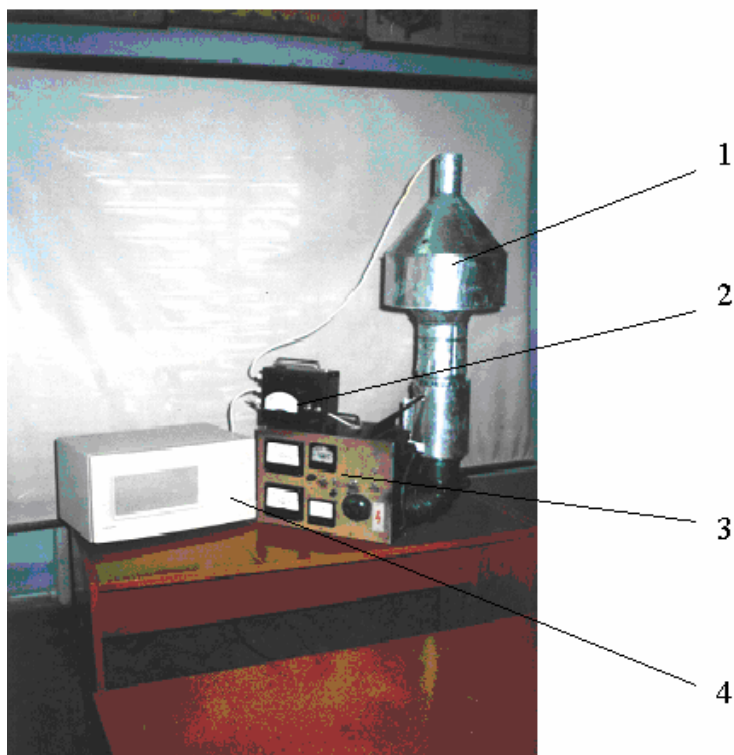
Таким образом, представляется возможным управлять режимами сушки макаронных изделий посредством изменения влажности поверхностных слоев материала (при известных его: относительному удлинению при растяжении, измеряемому путем растяжения, и средневзвешенной влажности, измеряемой путем взвешивания). Следует отметить, что влажность поверхности материала, а также скорости изменения относительного удлинения при растяжении и влажности средневзвешенной материала на разных этапах сушки зависят от различных факторов, поэтому является целесообразным установить их оптимальное сочетание.

## 4 Эмпирическое исследование процесса сушки макаронных изделий

### 4.1 Методики исследований свойств полуфабрикатов и готовых изделий

Для исследований можно использовать различные макаронные изделия групп А,Б и В из смесей различной муки: из твердой пшеницы (дурум) ГОСТ Р 52668-06 и из пшеничной хлебопекарной муки ГОСТ Р 52189-03.

Сушку макаронных изделий проводят в специально разработанной на кафедре МАХПП ОГУ лабораторной установке, представленной на рисунке 4.1, которая позволяет определять параметры, по которым строятся зависимости влажности изделий от продолжительности сушки (кривые сушки), а также зависимости изменения температуры, относительной влажности воздуха и температуры поверхности высушиваемых изделий от продолжительности сушки, а также измерять потребляемую энергетическую мощность на проведение процесса.

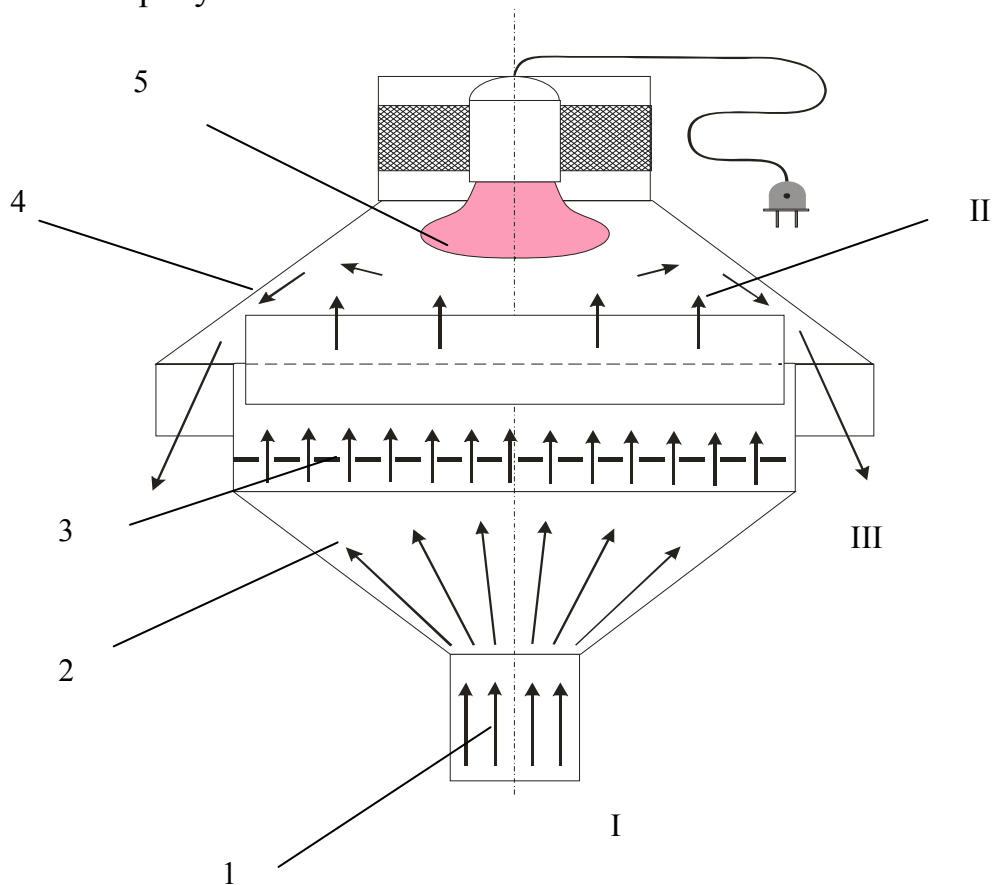


- 1 – модуль инфракрасной сушки с одновременной подачей пара;
- 2 – блок регулирования и измерения мощности процесса;
- 3 – модуль конвективной сушки;
- 4 - модуль сверхвысокочастотной сушки.

Рисунок 4.1 – Лабораторная сушильная установка

Установка укомплектована модулями конвективного энергоподвода, инфракрасного энергоподвода с совместной подачей пара и модулем СВЧ.

Схема устройства для проведения процесса инфракрасной сушки представлена на рисунке 4.2.



- 1 – воздуховод;
- 2 – конический металлический раструб;
- 3 – решетка для помещения продукта;
- 4 – подвижный зонтик;
- 5 – нагревательный элемент;
- I – III – зоны измерения температуры.

Рисунок 4.2 – Схема устройства для инфракрасной сушки макаронных изделий

Устройство для инфракрасной сушки представляет собой воздуховод, выполненный из жести, на конце которого имеется конический раструб с решеткой для помещения высушиваемого продукта. Сверху конический раструб закрывается подвижным зонтом, в верхней части которого расположена лампа инфракрасного излучения Д-215, мощностью 200 Вт.

Лампа с патроном жестко закреплена во втулке, способной перемещаться по направляющей в верхней части зонта. Перемещая втулку вверх или вниз, можно регулировать интенсивность свечения лампы, так как внутренняя поверхность зонта является дефлектором, концентрирующим лучи лампы на решетку. Степень терморadiационного воздействия на продукт регулируется перемещением зонта относительно раструба. При проведении процесса инфракрасной сушки данное устройство механически жестко соединяется с блоком конвективной сушки, служащим источником воздушного потока, при этом нагревательный элемент конвективной сушилки обесточивается.

Измерение температуры производится в трех зонах:

- в I зоне – измеряется температура окружающего воздуха;
- во II зоне – температура воздуха около излучающего элемента;
- в III зоне – установлено два температурных датчика (сухой и «мокрый») измерения температуры и влажности сушильного воздуха.

Датчики помещены в кольцевое сечение, образованное коническим раструбом и помещенным сверху зонтом.

Устройство для конвективной сушки представляет собой металлический корпус, внутри которого расположен центробежный вентилятор, калорифер и электронные блоки питания и управления ими. Элементы управления работой устройства выведены на панель управления, где также размещены стрелочные индикаторы контроля температуры по рабочим зонам сушильной камеры. Воздух, нагреваемый в калорифере, жестко закрепленном в трубе, подается наверх с помощью вентилятора. На прямолинейном участке трубы для подвода нагретого воздуха установлена диафрагма для измерения расхода сушильного агента. Перепад давлений на диафрагме измеряется микроманометром ММН-240. Для автоматизации процесса измерений в установке предусмотрены разъемы для соединения термодатчиков с аналого-цифровым преобразователем.

Имеется возможность вывода показаний аналого-цифрового преобразователя с последующей передачей сигнала на монитор компьютера.

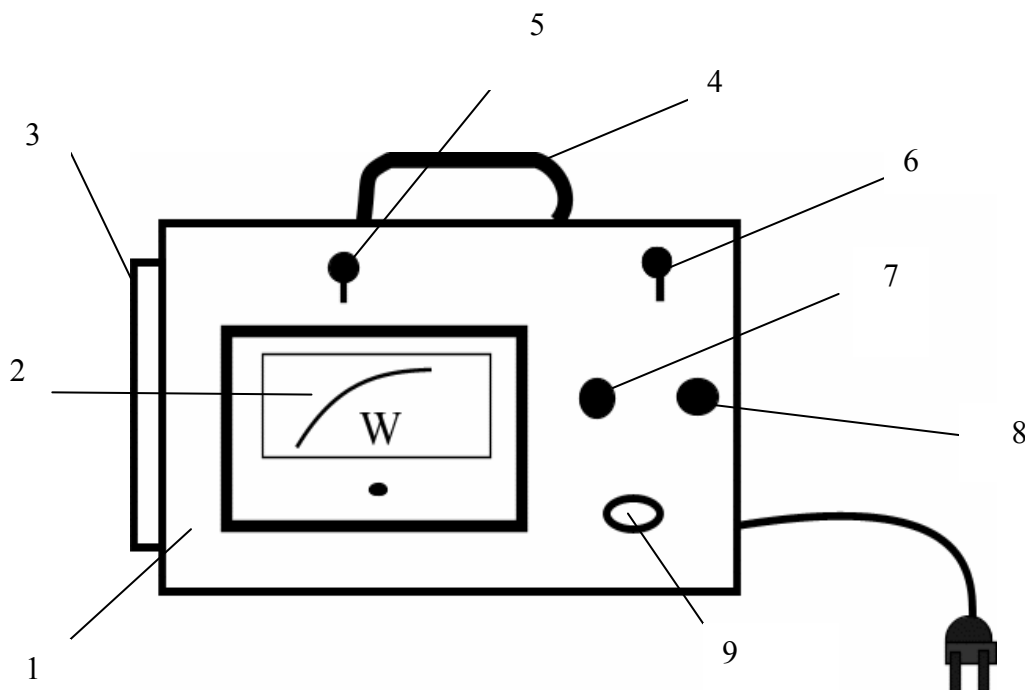
Измерение температуры производят по схеме уравновешенного моста, в плечо которого установлен чувствительный элемент – терморезистор. Также как и при инфракрасной сушке, измерение температуры производится по зонам:

- температуру окружающего воздуха измеряют датчиком, установленным на входе воздушного потока в вентилятор (I зона);
- следующий датчик установлен непосредственно в калорифере после нагревательного элемента – он служит для измерения температуры нагретого воздуха (II зона);
- в зоне сушки установлено два температурных датчика сухой и «мокрый» (III зона).

Тумблером «Сеть», находящемся на передней панели, включают устройство для конвективной сушки. С помощью перемещения ручек регулятора частоты вращения вентилятора и мощности нагревательного элемента, выбирают требуемые параметры сушки.

Место размещения макаронных изделий не имеет особого значения, так как или они подвешиваются над решеткой или непосредственно лежат на ней – результаты остаются идентичными.

Блок регулирования и измерения мощности процесса сушки, представлен на рисунке 4.3.



- 1 – закрытый металлический корпус;
- 2 – стрелочный индикатор потребляемой мощности;
- 3 – гнезда для подключения нагрузки;
- 4 – ручка;
- 5 – ручка выбора диапазона;
- 6 – регулятор потребляемой мощности;
- 7 – регулятор изменения величины потребляемой мощности;
- 8 – тумблер отключения стрелочного индикатора мощности;
- 9 – тумблер выключения устройства.

Рисунок 4.3 - Устройство для регулирования и измерения мощности процесса сушки

Блок регулирования и измерения мощности процесса сушки совмещен с устройством для конвективной сушки и представляет собой электронную схему, выполненную в закрытом металлическом корпусе. На переднюю панель блока выведены регулировочные устройства и стрелочный индикатор потребляемой мощности. На боковой поверхности корпуса имеются гнезда для подключения активной нагрузки. Для удобства работы и перемещения блок снабжен ручкой. Устройство позволяет измерять мощность в трех диапазонах:

- от 0 до 300 Вт,
- от 0 до 500 Вт,



- от 0 до 1000 Вт.

Для этого в верхней части панели имеется ручка выбора диапазона, при измерениях первоначально задают диапазон от 0 до 1000 Вт, и если точность измерений недостаточна, переходят на нижний диапазон при условии не превышения максимальной мощности данного диапазона. Также регулируется величина потребляемой мощности от 0 до 1000 Вт. Устройство позволяет отключать стрелочный индикатор мощности при длительных измерениях с помощью тумблера, при этом блок сохраняет свои функциональные возможности. Питание устройства происходит от сети переменного тока напряжением 220 В с частотой 50 Гц. Для предотвращения выхода его из строя, при перепадах напряжения питающей сети, имеется плавкий предохранитель.

Блок сверхвысокочастотного воздействия представляет микроволновую печь МВ-3724W, имеющую следующие технические характеристики:

- выходная мощность (по стандарту IEC60705) - 700 Вт;
- частота микроволн - 2,450 МГц;
- габаритные размеры (ШхВхГ, мм) – 455х260х320;
- потребляемая мощность 1,000 Вт.

Внешний вид макаронных изделий, характеризующийся цветом, степенью шероховатости поверхности, состоянием излома и правильностью формы определяется органолептическим способом.

Влажность макаронных изделий определяется методом высушивания до постоянной массы в сушильном шкафу СЭШ-3 по ГОСТ 27492-87. В предварительно просушенные и взвешенные с точностью до 0,01 г металлические бюксы отвешивают 5 г измельченной массы макаронных изделий и высушивают в течение 40 минут при температуре 130 °С. Затем бюксы с продуктом охлаждают и взвешивают и по разности между массой навесок до высушивания и после высушивания определяют количество испарившейся влаги.

Кислотность макаронных изделий определяется методом водной болтушки. При определении кислотности этим методом 5 г измельченных макаронных изделий переносят в коническую колбу вместимостью 100-150 мл, в которую предварительно влили 30 - 40 мл дистиллированной воды. Содержимое колбы взбалтывают в течение 3 мин. Приставшие к стенкам колбы частицы смывают дистиллированной водой. Затем добавляют 5 капель 1%-ного раствора фенолфталеина и титруют 0,1 н раствором щелочи до получения розового окрашивания, не исчезающего в течение 1 минуты при спокойном положении колбы. Кислотность  $X$  в градусах вычисляют по формуле

$$X = B \cdot K \cdot 2 \quad (4.1)$$

где  $B$  - количество 0,1 н раствора щелочи, пошедшего на титрование, мл;

$K$  – поправочный коэффициент к титру 0,1н раствора щелочи.

Конечный результат представляет собой среднее арифметическое двух параллельных определений, расхождения между которыми не должно

превышать 0,2 град. Кислотность макаронных изделий хорошего качества не должна превышать 4 град.

Прочность макаронных изделий определяется на приборе Строганова по стандартным методикам. В приборе Строганова на стойки, прикрепленные к площадке циферблатных весов, помещают макаронную трубку, а затем плавно при помощи вращения рукоятки винта на трубку повышают нагрузку до момента её излома. Величину нагрузки при этом определяют по показанию стрелки на циферблате весов в момент излома.

Время варки до готовности фиксируется в момент исчезновения мучнистого непроваренного слоя. Для определения этого момента при варке периодически (первый раз через 4-5 мин после начала варки, а затем через каждую минуту) вынимают из кастрюли небольшой отрезок изделия, помещают его между двумя стеклышками и сдавливают. Количество поглощенной изделиями во время варки воды характеризуется коэффициентом увеличения их массы, который подсчитывается по формуле

$$K = \frac{M_2 - M_1}{M_1}, \quad (4.2)$$

где  $K$  - коэффициент увеличения массы изделий после варки;

$M_1$  - масса сухих изделий, г;

$M_2$  - масса сваренных изделий, г (определяется после сливания варочной воды).

Количество сухих веществ, перешедших в варочную воду определяется ускоренным методом. Ускоренный метод определения потери сухих веществ состоит в следующем: навеску макаронных изделий массой 30 г помещают в кастрюлю с 10-кратным количеством кипящей воды (длинные изделия предварительно распиливают на отрезки 2-4 см) и варят до готовности. По окончании варки изделия вместе с жидкостью опрокидывают на сито и дают стечь жидкости в течение 2 - 3 мин. Затем варочную жидкость сливают в мерный цилиндр и измеряют ее объем. В предварительно высушенные и взвешенные на лабораторных весах чашки Петри отбирают по 50 мл варочной жидкости. Перед каждым отбором проб варочную жидкость тщательно перемешивают. Чашки ставят в водяную баню и после полного выпаривания из них жидкости чашки с остатком высушивают в сушильном шкафу при температуре 130-135 °С в течение 20 минут. После охлаждения в эксикаторе чашки с сухим остатком взвешивают. Процент сухих веществ, перешедших в варочную воду ( $\Pi$ , %) определяют по формуле

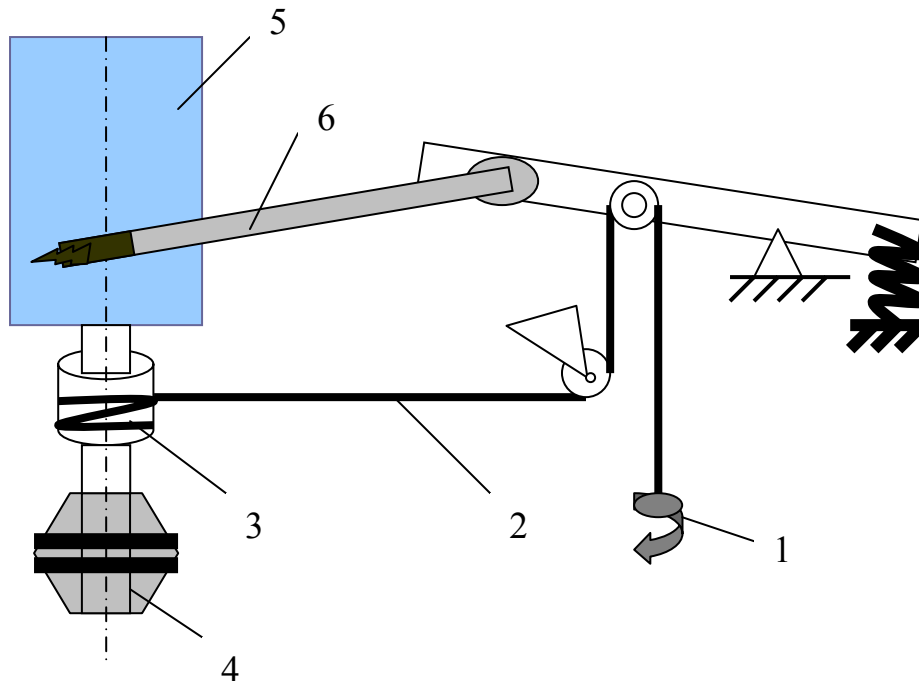
$$\Pi = \left( \frac{(b - a) \cdot B}{M \cdot 50} \right) \cdot 100, \quad (4.3)$$

где  $b$  - масса чашки Петри с сухим остатком, г;

$a$  - масса пустой чашки Петри, г;

$B$  – общий объем варочной жидкости (после варки), мл;  
 $M$  – масса сухих изделий, взятых на варку, г.

Прочность сырых макаронных изделий на срез может быть определена при помощи прибора ПМ, схема которого приведена на рисунке 4.4.



- 1 – крючок;
- 2 – нить;
- 3 – барабан;
- 4 – электродвигатель;
- 5 – измерительный цилиндр;
- 6 – стрелка.

Рисунок 4.4 – Схема прибора ПМ (прибора Медведева)

Прибор работает следующим образом: при включении двигателя 4 прибора нить 2 наматывается на барабан 3 и поднимает планку с прищепкой. Макароны полуфабрикаты сначала растягиваются, затем рвутся, и усилие, необходимое для этого, отмечается стрелкой 6 на шкале, нанесенной на измерительный цилиндр 5.

Опыт повторяют не менее трех раз, и за окончательный результат принимают среднее арифметическое (грубые промахи при этом выбраковывают). Для удобства сравнения результатов измерения прочности сырых макарон разного вида определяют предельное напряжение сдвига  $\tau_n$

$$\tau_n = \frac{F}{S}, \quad (4.4)$$

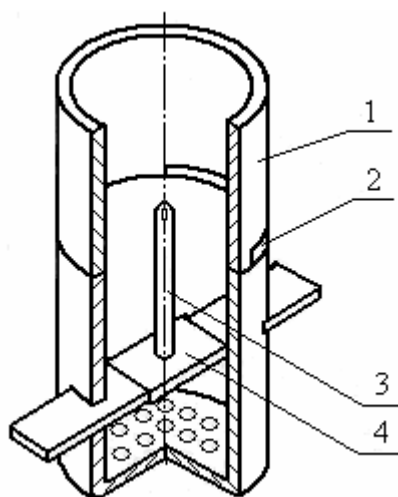
где  $F$  – срезывающее усилие, Н;

$S$  – площадь поперечного сечения пробы сухих изделий, см<sup>2</sup>;

Степень слипаемости массы сырых макаронных изделий можно определить на приборе ПМ при помощи специального приспособления, изображенного на рисунке 4.5.

Навеску массой 40 г сырых макаронных изделий длиной от 20 до 30 мм высыпают в цилиндрический корпус 1 приспособления (жидкая фаза при этом выводится из приспособления через перфорированное дно).

После выстаивания макаронных изделий в течение 10 мин в боковую прорезь 2 вставляют лезвие ножа и проворачивают верхнюю часть корпуса на 360°, срезая таким образом верхнюю часть массы сырых макаронных изделий. Не вынимая лезвие ножа из прорези, снимают верхнюю часть корпуса вместе с отрезанной верхней частью сырых макаронных изделий.



1 – корпус;

2 – прорезь в корпусе;

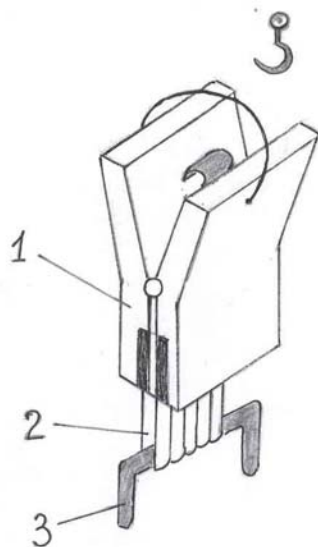
3 – стержень;

4 – планка.

Рисунок 4.5 – Приспособление для определения слипаемости макарон

В отверстие стержня 3 вставляют крючок прибора ПМ и определяют усилие, необходимое для вырывания стержня с укрепленной на нем планкой 4 из массы макарон. Это усилие характеризует степень слипаемости сырых макаронных изделий.

Относительное удлинение при растяжении определяется с помощью специально изготовленной насадки, которая представляет собой прищепку с прорезиненными захватами (рисунок 4.6). Прищепка крепится к крючку прибора ПМ.



- 1 - активный захват;
- 2 – образец макаронных полуфабрикатов;
- 3 - пассивный захват.

Рисунок 4.6 - Схема насадки для определения относительного удлинения при растяжении

При включении двигателя прибора нить наматывается на барабан и поднимает прищепку с захваченными сырыми полуфабрикатами. Макароны изделия сначала растягиваются, затем рвутся, при этом усилие, необходимое для этого фиксируется на шкале прибора. Опыты проводятся в многократных повторностях с макаронными изделиями определенной длины. При этом берутся различные навески от 100 до 2000 г, причем для уменьшения погрешности прибор тарируется каждый раз на каждую серию экспериментов.

Определение структурно-механических характеристик полуфабрикатов осуществляется по зависимостям относительного удлинения при растяжении от прилагаемой нагрузки, получаемым на приборе ПМ.

В связи с наличием в макаронном производстве большого количества качественных показателей авторами был разработан комплексный показатель физико-химических свойств макаронных изделий  $K_{ПК}$ . Данный показатель рассчитывается по формуле

$$K_{ПК} = \sum_{i=1}^n K_{3Н_i} \cdot B_{K_i}, \quad (4.5)$$

где  $K_{3Н}$  – коэффициент значимости показателя качества;  
 $B_{K_i}$  - присваиваемый балл качества.

Шкала перевода отдельных показателей в баллы комплексного показателя качества, представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Шкала перевода значений показателей качества макаронных изделий в баллы качества

Наименование показателя качества	Значение показателя в натуральном выражении	Присваиваемый балл качества, Бк	Коэффициент значимости показателя, Кзн	Произведение Бк · Кзн
Влажность, %	Ниже 12,1	1	1	1
	12,1 – 12,3	2		2
	12,4 – 12,6	3		3
	12,7 – 12,9	4		4
	13	5		5
	13,1 - 15	4		4
	15,1 – 20	3		3
	20,1 – 28	2		2
Свыше 28,0	1	1		
Кислотность, град	Свыше 4,1	1	5	5
	4,1	2		10
	4	3		15
	3,5 – 3,9	4		20
	Ниже 3,5	5		25
Прочность, г	Свыше 700	5	5	25
	700 – 601	4		20
	600 – 501	3		15
	500 – 401	2		10
	Ниже 400	1		5
Время варки до готовности, мин	Меньше 10	5	1	5
	10 – 12	4		4
	12,5 – 14,5	3		3
	15 – 17	2		2
	Свыше 17	1		1
Количество поглощенной воды	Свыше 2,5	5	3	15
	2,3 – 2,5	4		12
	2,0 – 2,2	3		9
	1,9	2		6
	Ниже 1,9	1		3

Продолжение таблицы 4.1

Наименование показателя качества	Значение показателя в натуральном выражении	Присваиваемый балл качества, Бк	Коэффициент значимости показателя, Кзн	Произведение Бк · Кзн
Количество СВ перешедших в варочную воду, %	0 – 8	5	7	35
	8,1 – 9	4		28
	9,1 – 10	3		21
	10,1 – 10,5	2		14
	Свыше 10,5	1		7
Удельная прочность после варки, г/мм <sup>2</sup>	5 и более	5	3	15
	4,5 – 4,9	4		12
	4,0 – 4,4	3		9
	3,5 – 3,9	2		6
	Менее 3,5	1		3
Слипаемость, г	Менее 200	5	3	15
	201 – 230	4		12
	231 – 260	3		9
	261 – 300	2		6
	Свыше 300	1		3

Для оценки органолептических свойств макаронных изделий была отобрана группа экспертов из пяти человек. На основе традиционных методик была разработана 15-бальная шкала органолептической оценки изделий по четырем показателям качества: внешнему виду, запаху изделий по мере их высушивания, а также внешнему виду и вкусу готовых изделий. Внешний вид оценивают по следующим показателям: цвет изделий (белый, желтый или кремовый с различными оттенками), отмечается равномерность цвета, наличие следов непромеса, темных частиц на поверхности изделий; поверхность изделий должна быть гладкая, допускается незначительная шероховатость; излом изделий должен быть стекловидным; форма изделий должна соответствовать данному виду изделия. Отмечается равномерность толщины стенок у трубчатых изделий, кривизна длинных изделий (допускаются небольшие изгибы и искривления). Правильные формы изделий удобны при варке, хотя для пищевых достоинств этот показатель не играет никакой роли. Наиболее важное значение этот показатель имеет для самого макаронного производства. Искривленные изделия плохо заполняют тару, снижают

пропускную способность сушильных установок, являются причиной появления лома и крошки.

Коэффициенты весомости каждого показателя определяли путем опроса группы экспертов, являющихся специалистами в области макаронного производства, хорошо знающими продукт и его технологии. Эксперты оценивали 15 различных образцов макаронных изделий и результаты сравнения (ранжирования) выражали в баллах. Пример ранжирования представлен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты ранжирования внешнего вида сухих макаронных изделий (коэффициент значимости  $K=3$ )

№ образца	Эксперт					Сумма рангов, Ср	Ср · К
	1-ый	2-ой	3-й	4-ый	5-ый		
1	7	8	8	7	8	38	114
2	9	9	9	8	7	42	126
2	14	13	14	14	15	70	210
4	11	12	11	11	11	56	168
5	8	7	7	9	9	40	120
6	10	10	10	12	12	54	162
7	13	15	13	13	13	67	201
8	12	11	12	10	10	55	165
9	6	6	6	6	6	30	90
10	5	5	5	5	5	25	75
11	3	2	2	1	1	9	27
12	2	1	1	2	2	8	24
13	4	3	4	3	3	17	51
14	1	4	3	4	4	16	48
15	15	14	15	15	14	73	219

За показатель качества берется самый большой балл, полученный как сумма рангов для каждого вида изделий с учетом коэффициента их значимости. Далее аналогичным образом определяется запах макаронных изделий. Запах продукта обусловлен в основном наличием в нем летучих веществ – альдегидов. Запах может быть связан также с хранением и транспортированием продукта вместе с неприятно пахнущими веществами, а также, с распадом его на составные части, что связано с хранением в неблагоприятных условиях. При этом также могут начаться процессы плесневения и гниения, при которых



образуются специфичные запахи, вырабатываемые микроорганизмами, плесенями, грибами.

После определения внешнего вида и вкуса готовых изделий в готовых макаронных изделиях определяют также содержание лома, крошки и деформированных изделий. При этом анализируемую пробу рассматривают на светлой поверхности и отбирают из нее деформированные изделия, лом и крошку, которые затем взвешивают и выражают в процентах от общей массы пробы.

## 4.2 Модернизация метода изучения структуры макаронных изделий

Перспективным направлением, хорошо зарекомендовавшим себя в пищевой промышленности, является изучение структуры пищевого продукта. В тех случаях, когда исследуемый материал обладает упруго-вязко-пластичными свойствами, целесообразно определять его структурно-механические свойства при растяжении. Определение структурно-механических свойств продукта может быть произведено путем установления аналитических зависимостей между изменением этих свойств и линейной деформацией продукта при растяжении.

В качестве объекта исследования были использованы макаронные полуфабрикаты группы В первого класса, внешний диаметр 8 мм, длина 150 мм, растяжение которых производилось при помощи специально разработанного устройства для растяжения, позволяющего растягивать изделия до их разрыва и фиксировать разрушающую силу.

Диаграммы растяжения макаронных полуфабрикатов представляют собой типичные диаграммы для упруго-вязко-пластичных материалов: наблюдается нелинейная зависимость между напряжением и деформацией, процесс растяжения заканчивается при достижении максимального напряжения. По этим зависимостям можно определить прочностные и упругие свойства продукта, а затем установить дальнейшую степень механического и температурного воздействия.

Например, на рисунке 4.7 представлена зависимость нормального напряжения от удлинения при влажности макаронных изделий 22 % и их температуре 75 °С, полученная при постоянной скорости растягивания образцов  $\dot{\varepsilon} = 0,167 \text{ с}^{-1}$ .

Из рисунка 4.7 видно, что кривая, символизирующая экспериментальную зависимость, пересекает ось ординат при значении 30 кПа, что соответствует пределу текучести материала и определяется реологической моделью Бингама. При её продолжении в сторону увеличения удлинения кривая стремится к достижению предельного (максимально возможного) напряжения  $\sigma_{\text{п}} = 525,47 \text{ кПа}$ .

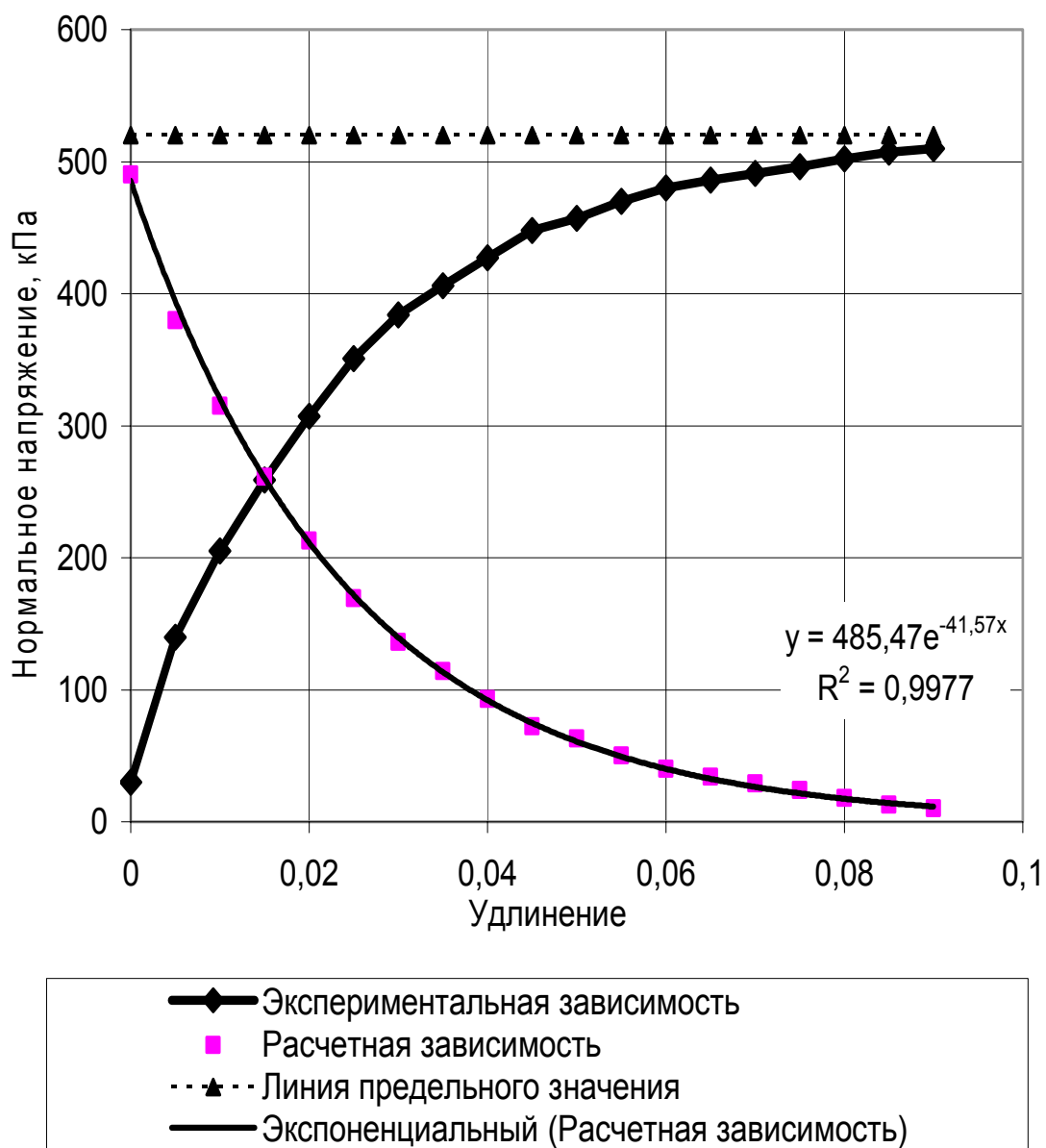


Рисунок 4.7 – Зависимость нормального напряжения от удлинения при влажности высушиваемого образца 22 % и температуре 75 °С

Ординаты кривой расчетной зависимости получены по формуле

$$y_i = y_{1_i} - y_{2_i} - \sigma_T, \quad (4.6)$$

где  $y_{1_i}$  - ординаты линии предельного напряжения ( $\sigma_{\Pi} = 525,47$  кПа);

$y_{2_i}$  - ординаты экспериментальной зависимости.

Расчетная зависимость обработана путем построения линии тренда, получена экспоненциальная зависимость вида  $y = A \cdot e^{-B \cdot x}$ . В данном случае,  $A = 485,75$ ;  $B = 41,57$ . Учитывая, что реологические свойства макаронного полуфабриката описываются уравнением (3.29) имеем:  $A = \dot{\epsilon} \cdot \eta_T$ , отсюда

получаем вязкость при продольном течении  $\eta_T = \frac{A}{\dot{\varepsilon}} = \frac{485,47}{0,167} = 2907 \text{ кПа} \cdot \text{с}$ , а модуль упругости при линейной деформации получаем исходя из того, что  $B = \frac{E}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}$ , поэтому  $E = B \cdot \eta_T \cdot \dot{\varepsilon} = 41,57 \cdot 2907 \cdot 0,167 = 194,41 \text{ кПа}$ .

Аналогично, для второго периода изменения реологических свойств макаронных изделий в процессе сушки из уравнения (3.25) получают математическую зависимость вида  $\sigma = \varepsilon \eta_T \left( 1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}} \right)$ .

По вышеуказанному примеру определяются реологические характеристики полуфабриката из зависимостей нормального напряжения от удлинения при влажности изделий 16 % и их температуре 75 °С. Зависимости представлены на рисунке 4.8.

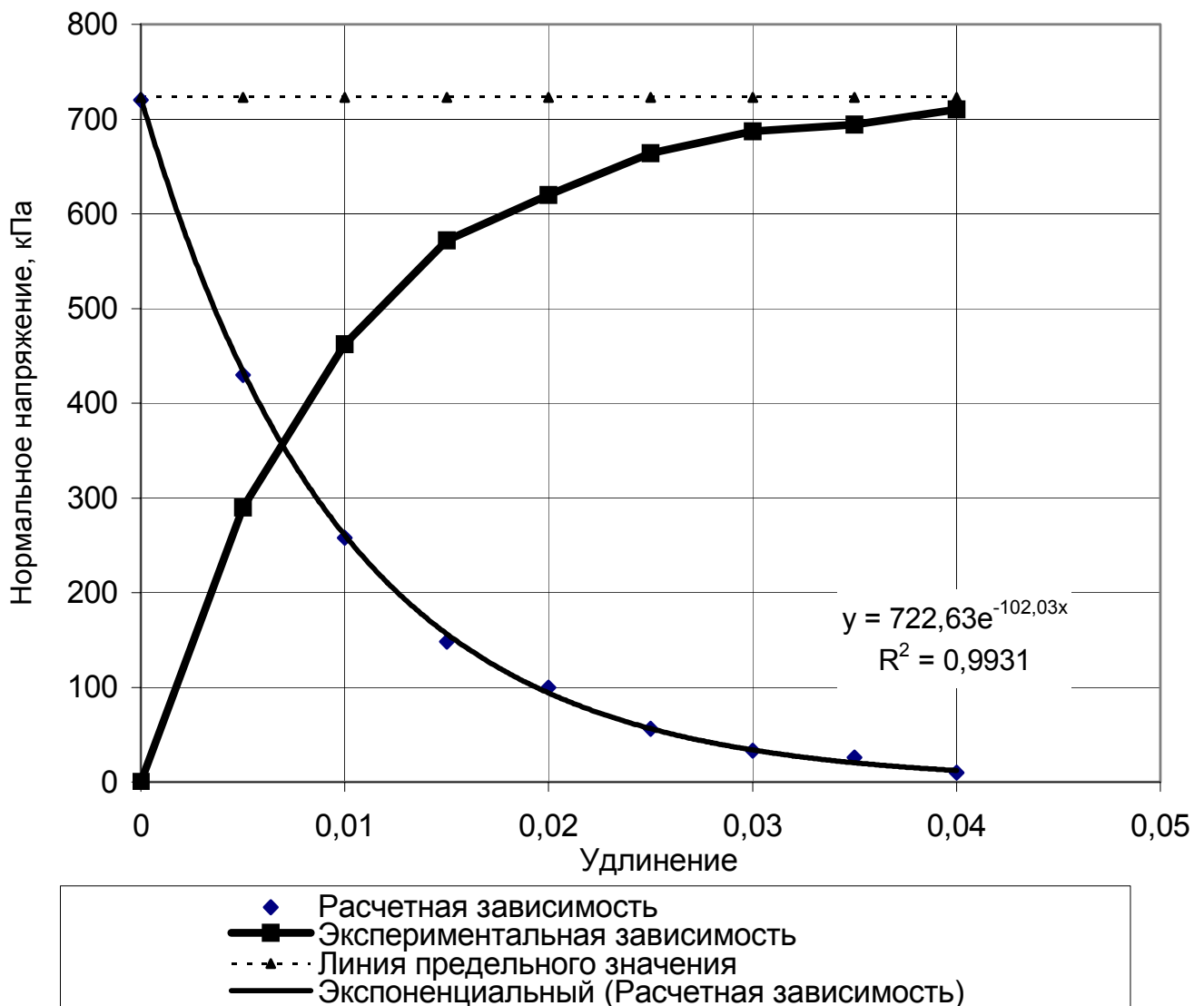


Рисунок 4.8 – Зависимость нормального напряжения от удлинения при влажности высушиваемого образца 16 % и температуре 75 °С

Из рисунка 4.8 видно, что линия предельного (максимально возможного) напряжения не зависит от увеличения удлинения,  $\sigma_{II} = 722,63$  кПа. По экспоненциальной зависимости  $A = 722,63$ ;  $B = 1,0203$ . Отсюда, учитывая, что реологические свойства макаронного полуфабриката описываются формулой (3.30) получаем вязкость при продольном течении  $\eta_T = \frac{A}{\dot{\epsilon}} = \frac{722,63}{0,167} = 4327 \text{ кПа} \cdot \text{с}$  и модуль упругости при линейной деформации  $E = B \cdot \eta_T \cdot \dot{\epsilon} = 1,0203 \cdot 4327 \cdot 0,167 = 737,2 \text{ кПа}$ .

Таким образом, путем измерения линейной деформации при растяжении коллоидных капиллярно-пористых пищевых материалов можно определять их реологические характеристики. Результаты методики графоаналитического расчета реологических характеристик пищевых продуктов, основанной на экспериментальном исследовании структурно-механических свойств макаронных полуфабрикатов при растяжении, могут быть использованы при контроле, управлении, совершенствовании и интенсификации технологических процессов пищевых производств, разработке научно-обоснованных методов расчета и создании принципиально нового оборудования.

### 4.3 Математические методы обработки результатов экспериментов

Для обработки экспериментальных данных и получения предложенной модели используется разработанное на основе трехфакторного эксперимента программное средство «Обработка результатов многофакторного эксперимента на основе композиционного ортогонального плана ПФЭ  $2^3$ » (свидетельство № 54 о регистрации в УФАП ОГУ на <http://www.osu.ru>). Программное средство предназначено для составления композиционного ортогонального плана второго порядка на основе полнофакторного эксперимента ПФЭ  $2^3$ , уравнений регрессии по результатам данного эксперимента, проверке адекватности полученных уравнений экспериментальным данным, а также построения поверхностей отклика для нахождения оптимальной области.

Используемые технические средства: ПК IBM PC – совместимый, не ниже Pentium II-233, база компьютера должна быть снабжена программным средством MS Excel /2000/XP. Блок-схема алгоритма обработки экспериментальных данных с помощью ПС представлена на рисунке 4.9.

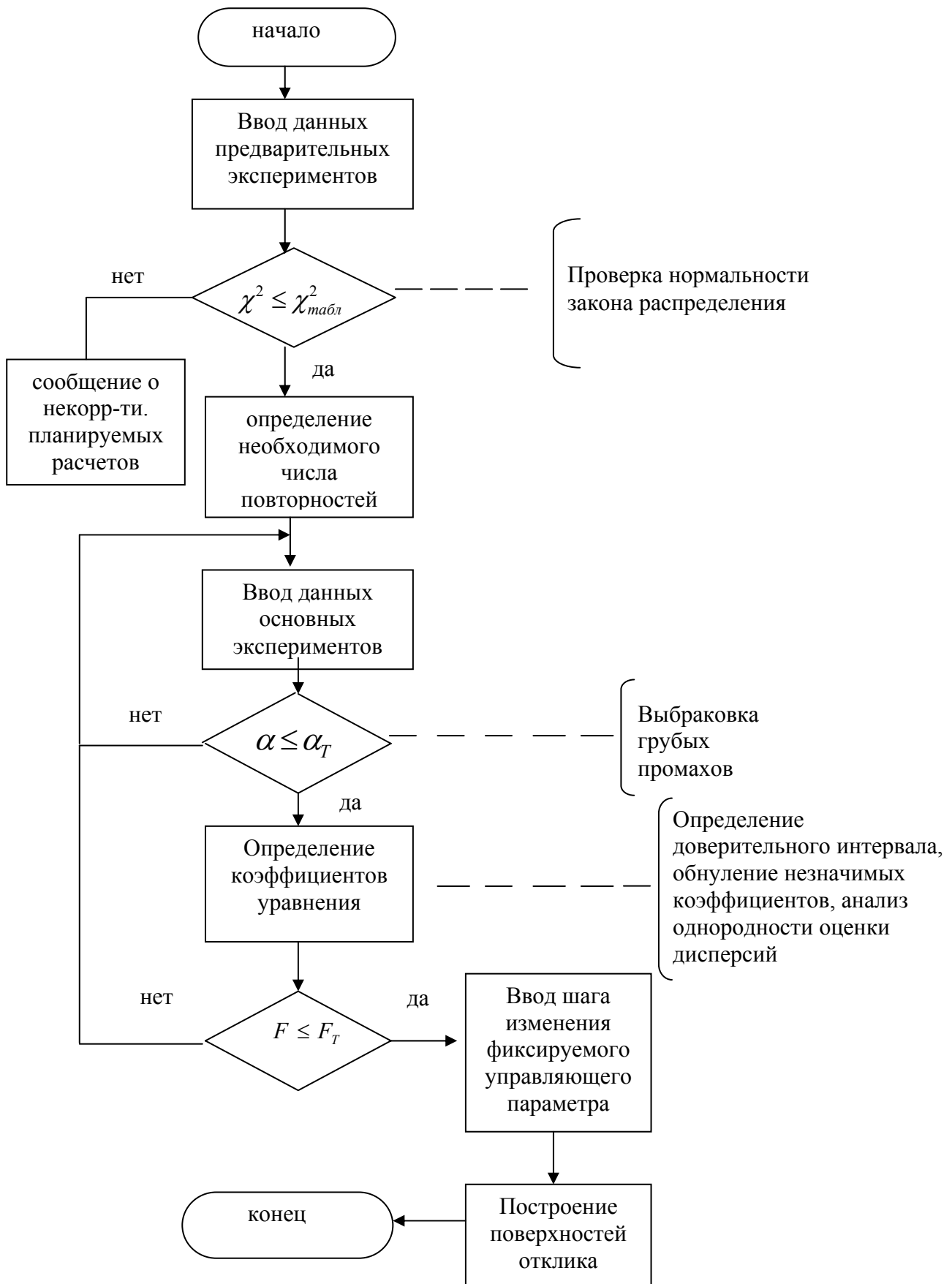


Рисунок 4.9 – Блок- схема алгоритма ПС

С помощью программного средства производится проверка нормальности закона распределения случайной величины, выбраковка грубых ошибок, определение доверительного интервала оценок измеряемых величин, обнуление незначимых коэффициентов, анализ однородности оценки дисперсий, определение значимости коэффициентов уравнения по критерию Стьюдента, проверка адекватности полученного уравнения экспериментальным данным по критерию Фишера. После получения уравнения вводится шаг изменения фиксируемой величины, и программное средство строит поверхность отклика. Схема заполнения электронных таблиц Excel приведена в таблицах 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3 – Пример расчета в электронных таблицах Excel

u	x0	x1	x2	x3	x1x2	x2x3	x1x3
1	1	-1	-1	-1	1	1	1
2	1	-1	1	-1	-1	-1	1
3	1	1	-1	-1	-1	1	-1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1
6	1	-1	1	1	-1	1	-1
7	1	1	-1	1	-1	-1	1
8	1	1	1	1	1	1	1
9	1	-1,215	0	0	0	0	0
10	1	1,215	0	0	0	0	0
11	1	0	-1,215	0	0	0	0
12	1	0	1,215	0	0	0	0
13	1	0	0	-1,215	0	0	0
14	1	0	0	1,215	0	0	0
15	1	0	0	0	0	0	0
u	x0	x1^2	x2^2	x3^2	x1x2)^2	x2x3)^2	x1x3)^2
	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1
	1	1,476225	0	0	0	0	0
	1	1,476225	0	0	0	0	0
	1	0	1,476225	0	0	0	0
	1	0	1,476225	0	0	0	0
	1	0	0	1,47623	0	0	0
	1	0	0	1,47623	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0
		10,95245	10,95245	10,9525	8	8	8
коэф-ты ур-я	a0	a1	a2	a3	a12	a23	a13
	458,6004	55,37346	11,6744	-51,39	-17,91667	-4,25	-43,66667
	x1	x2	x3				
Уравнение	1	1	1				

Таблица 4.4 - Пример расчета в электронных таблицах Excel (продолжение)

коэф-ты ур-я	a0	a1	a2	a3	a12	a23	a13
	458,6004	55,37346	11,6744	-51,38972	-17,91667	-4,25	-43,66667
	x1	x2	x3				
Уравнение	0	0	0				
y=	458,6004						
a=	0,730163						
<b>458,600447</b>	<b>-1</b>	<b>-0,9</b>	<b>-0,8</b>	<b>-0,7</b>	<b>-0,6</b>	<b>-0,5</b>	<b>-0,4</b>
<b>-1</b>	282,2482	287,53	293,0272	298,74	304,6682	310,812	317,1713
<b>-0,9</b>	304,6182	309,7208	315,0389	320,5725	326,3216	332,2862	338,4663
<b>-0,8</b>	324,945	329,8684	335,0073	340,3618	345,9317	351,7171	357,7181
<b>-0,7</b>	343,2285	347,9728	352,9325	358,1078	363,4986	369,1048	374,9266
<b>-0,6</b>	359,4688	364,0339	368,8145	373,8106	379,0222	384,4492	390,0918
<b>-0,5</b>	373,6658	378,0517	382,6531	387,4701	392,5025	397,7504	403,2138
<b>-0,4</b>	385,8195	390,0263	394,4486	399,0863	403,9396	409,0083	414,2926
<b>-0,3</b>	395,93	399,9576	404,2007	408,6593	413,3334	418,223	423,3281
<b>-0,2</b>	403,9973	407,8457	411,9096	416,1891	420,684	425,3944	430,3203
<b>-0,1</b>	410,0213	413,6905	417,5753	421,6756	425,9913	430,5226	435,2693
<b>0</b>	414,002	417,4921	421,1977	425,1188	429,2554	433,6075	438,1751
<b>0,1</b>	415,9395	419,2504	422,7768	426,5188	430,4762	434,6491	439,0375
<b>0,2</b>	415,8337	418,9655	422,3127	425,8755	429,6538	433,6475	437,8568
<b>0,3</b>	413,6847	416,6373	419,8054	423,189	426,7881	430,6026	434,6327
<b>0,4</b>	409,4924	412,2658	415,2548	418,4592	421,8791	425,5145	429,3655
<b>0,5</b>	403,2569	405,8511	408,6609	411,6861	414,9269	418,3832	422,0549
<b>0,6</b>	394,9781	397,3932	400,0237	402,8698	405,9314	409,2085	412,7011
<b>0,7</b>	384,656	386,8919	389,3434	392,0103	394,8927	397,9906	401,3041
<b>0,8</b>	372,2907	374,3475	376,6197	379,1075	381,8108	384,7295	387,8638
<b>0,9</b>	357,8822	359,7597	361,8528	364,1614	366,6855	369,4251	372,3802

Пример полученной с помощью программного средства поверхности отклика представлен на рисунке 4.10. При этом нижняя плоскость получается в безразмерном выражении, в условных единицах (у.е.) от -1 до 1, а результаты уравнения представлены по оси Y – в данном случае это экспертная оценка органолептических свойств макаронных изделий в баллах.

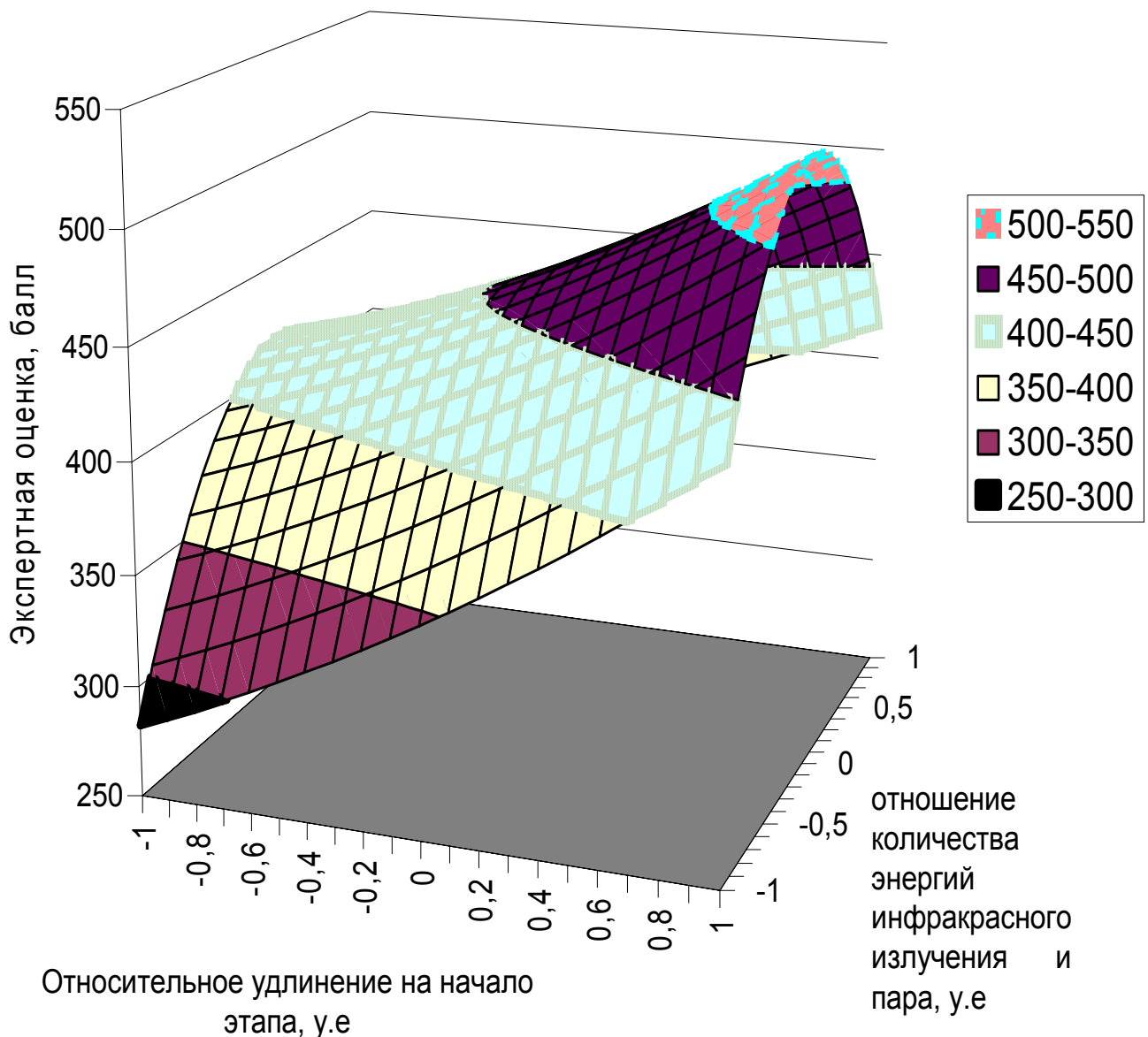


Рисунок 4.10 – Пример поверхности отклика, полученной с помощью ПС

#### 4.4 Анализ процесса сушки макаронных изделий

Целью проводимых экспериментов являлось изучение технологических режимов сушки макаронных изделий при различном сочетании управляющих воздействий и коррекция режимов в зависимости от изменения структурно-механических свойств полуфабрикатов.

На основании предварительных экспериментов был разработан оптимальный способ сушки макаронных изделий, включающий стадию разогрева, сушку в жестком и мягком режимах и стадию охлаждения. Способ защищен патентом РФ № 2240709.

На стадии разогрева наилучшие результаты получены при обработке изделий паром в сочетании с воздействием инфракрасных лучей.



Сначала исследовали процесс терморadiационной сушки макарон. В качестве объекта исследования использовали макаронные изделия группы В первого класса, внешний диаметр 6 мм, с добавлением морковного красителя «Ветерон-К». По мере высушивания макаронных изделий через каждые 10 минут определяли температуру и влажность сушильного воздуха. Параметры процесса сушки представлены на рисунках 4.11 и 4.12. Влажность образцов определяли методом высушивания до постоянной массы в сушильном шкафу СЭШ – 3 (температура 105 °С).

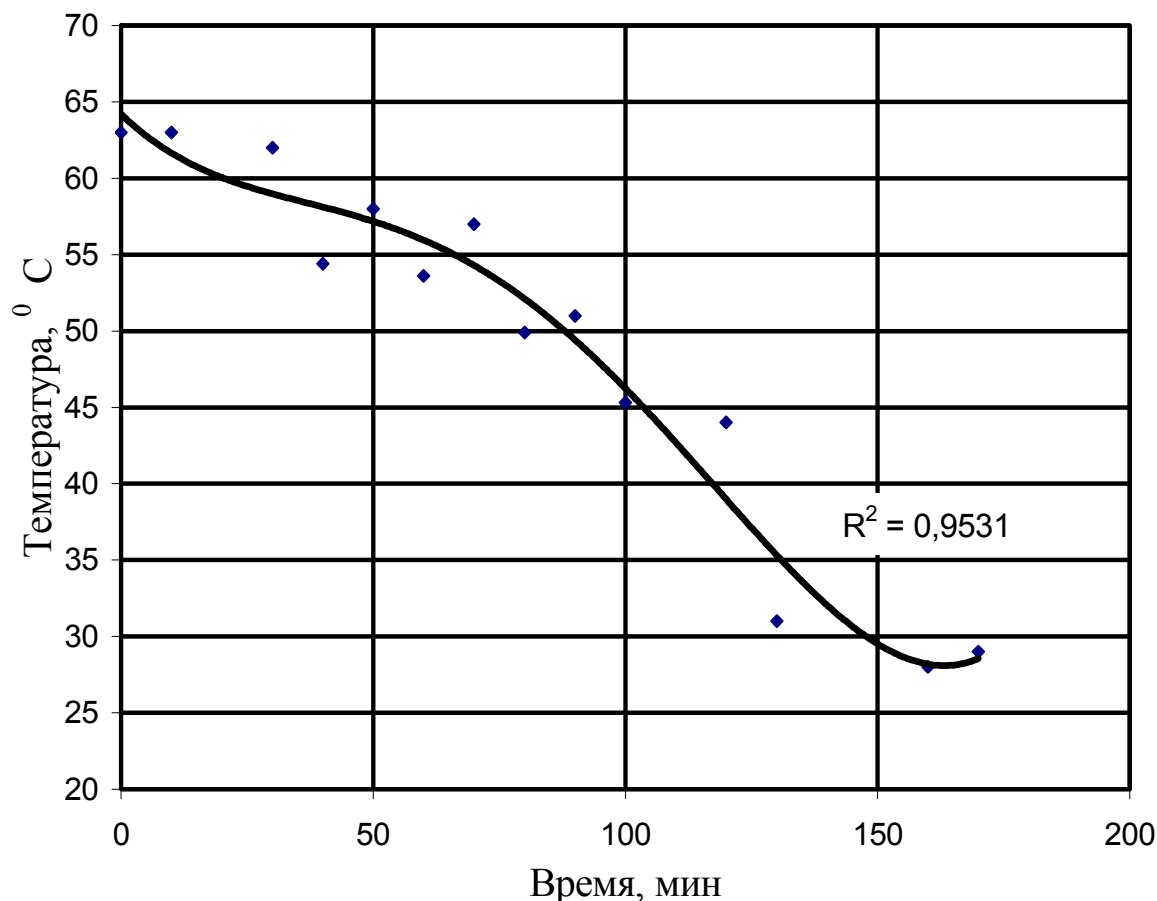


Рисунок 4.11 – Изменение температуры сушильного воздуха в процессе сушки

Из рисунка 4.11 видно, что изменение температуры в процессе сушки носит скачкообразный характер. Наиболее точно изменение температуры описывается полиномом четвертой степени с величиной достоверности аппроксимации 0,9531

$$T = 3 \cdot 10^{-7} \cdot \tau^4 - 8 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^3 + 7,1 \cdot 10^{-3} \cdot \tau^2 - 0,317 \cdot \tau + 64,194$$

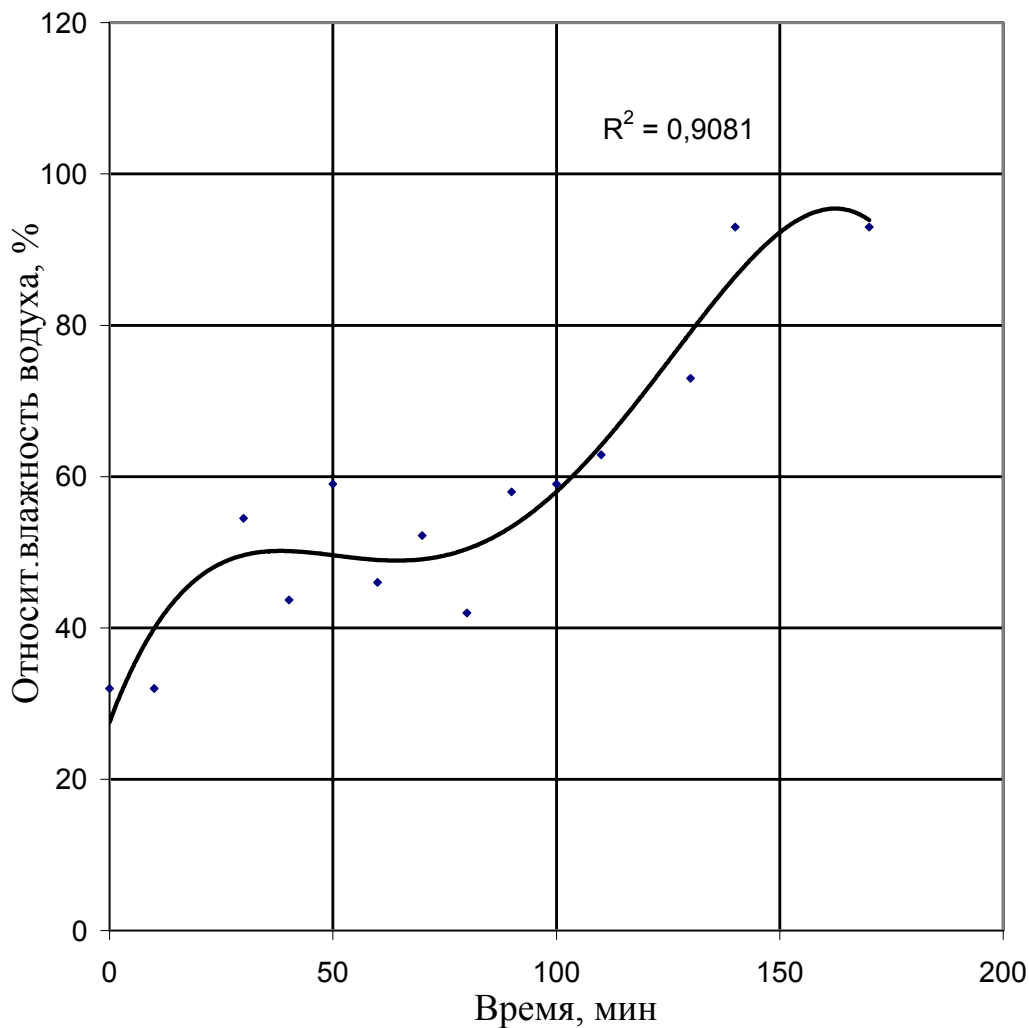


Рисунок 4.12 - Изменение относительной влажности сушильного воздуха в процессе сушки

По психрометрической разности сухого и мокрого термометров определяли относительную влажность сушильного воздуха. Для коррекции показаний мокрого термометра использовали формулу

$$t_M = t_M^{\Pi} - \frac{\Delta \cdot (t_C - t_M^{\Pi})}{100}, \quad (4.7)$$

где  $t_M^{\Pi}$  - показания смоченного термометра в психрометре;

$\Delta$  - поправка, найденная по диаграмме, разработанной Гинзбургом А.С., в зависимости от показания смоченного термометра  $t_M^{\Pi}$  и скорости воздуха, %.

Изменение относительной влажности воздуха, также как и изменение температуры носит скачкообразный характер. Наиболее точно изменение

влажности описывается полиномом четвертой степени с величиной достоверности аппроксимации 0,9081

$$\varphi = -1 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^4 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot \tau^3 - 3,78 \cdot 10^{-2} \cdot \tau^2 + 1,571 \cdot \tau + 27,584$$

Относительная влажность воздуха в конце сушки слишком высокая. Это вероятно вызвано тем, что, во-первых, на данном этапе используется воздух помещения, имеющий большое влагосодержание и как следствие большую относительную влажность при низких температурах, во-вторых, температура изделий на данном этапе значительно выше температуры воздуха, возникает градиент температуры, влага стремится от внутренних слоев к внешним и испаряется в окружающий воздух.

Кривая терморрадиационной сушки представлена на рисунке 4.13.

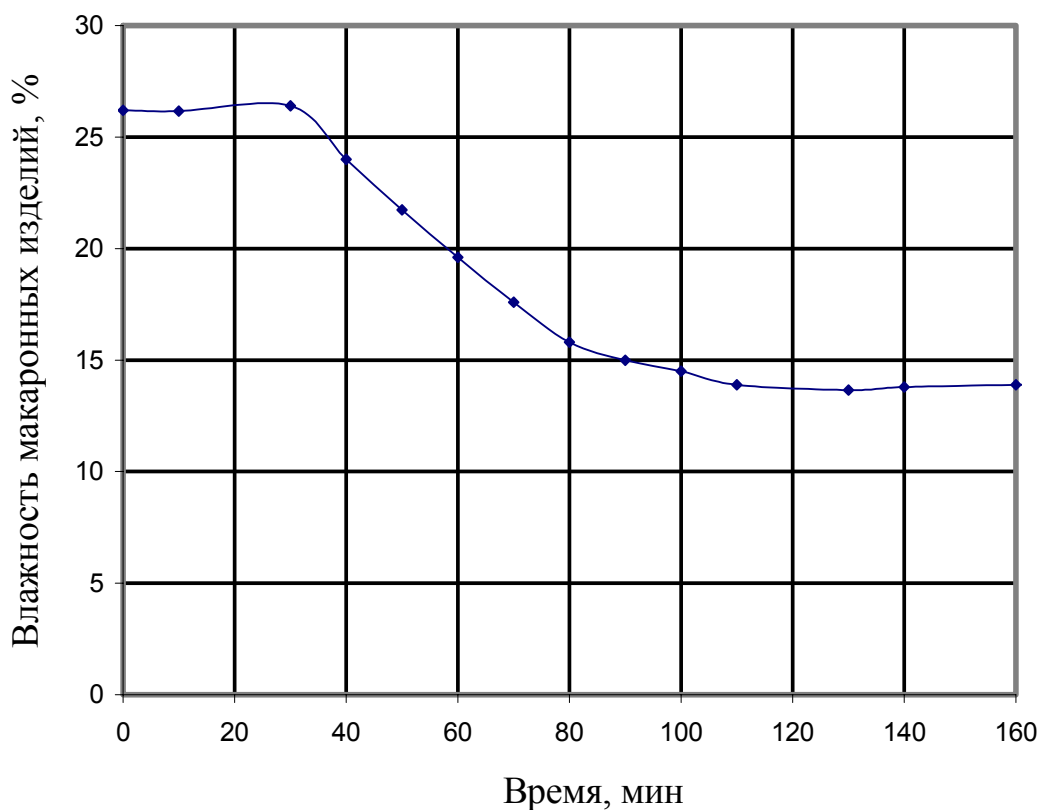


Рисунок 4.13 – Кривая сушки

Анализируя кривую сушки можно выделить 4 ярко выраженных этапа:

- на I этапе на протяжении первых 30 мин наблюдается увеличение влажности изделий, что может быть связано со следующими процессами: температура наружных слоев значительно больше, чем температура внутренних, под действием данного градиента температуры влага перемещается от внешних слоев к внутренним, внешние слои поглощают воду из окружающего воздуха;

- на II этапе, от 30 до 80 мин, который называют периодом постоянной скорости сушки, влажность линейно убывает от 26,4 до 15,8 %. При этом градиент температуры становится практически равным нулю, происходит интенсивное испарение менее прочносвязанной осмотической влаги;

- на III этапе, так называемом периоде падающей скорости сушки, от 80 до 130 мин, влажность изделий убывает от 15,8 до 13,7 %, при этом удаляется влага микрокапилляров и адсорбционно связанная влага, процесс лимитируется малой интенсивностью внутреннего переноса влаги, поверхность испарения интенсивно углубляется внутрь материала, а образующийся на его поверхности сухой слой имеет значительное гигротермическое сопротивление;

- на IV этапе от 130 до 180 мин наблюдается некоторое нарастание влажности от 13,7 до 14 %. На данном этапе на предприятиях производится стадия охлаждения, а увеличение влажности вызвано высокой влажностью применяемого на охлаждение воздуха.

По кривой сушки методом графического дифференцирования строили кривую скорости сушки, представленную на рисунке 4.14.

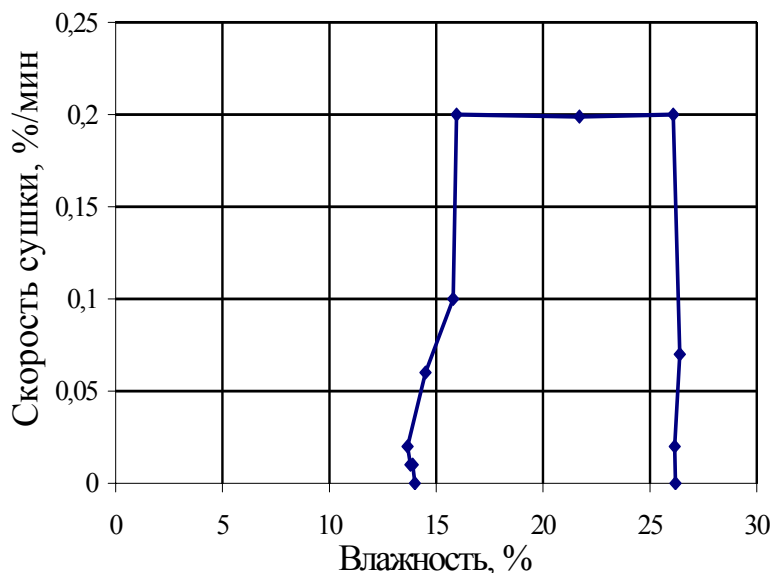


Рисунок 4.14 - Кривая скорости сушки

Из рисунка видно, что при влажности изделий 26 % скорость сушки возрастает от нуля до 0,2 % /мин, затем при изменении влажности от 26 до 15,8 % находится в периоде постоянной скорости сушки, а начиная с влажности 15,8 % и менее скорость сушки постепенно падает от 0,2 до 0 %/мин.

Из структурно-механических свойств определяли изменение относительного удлинения и прочности на излом.

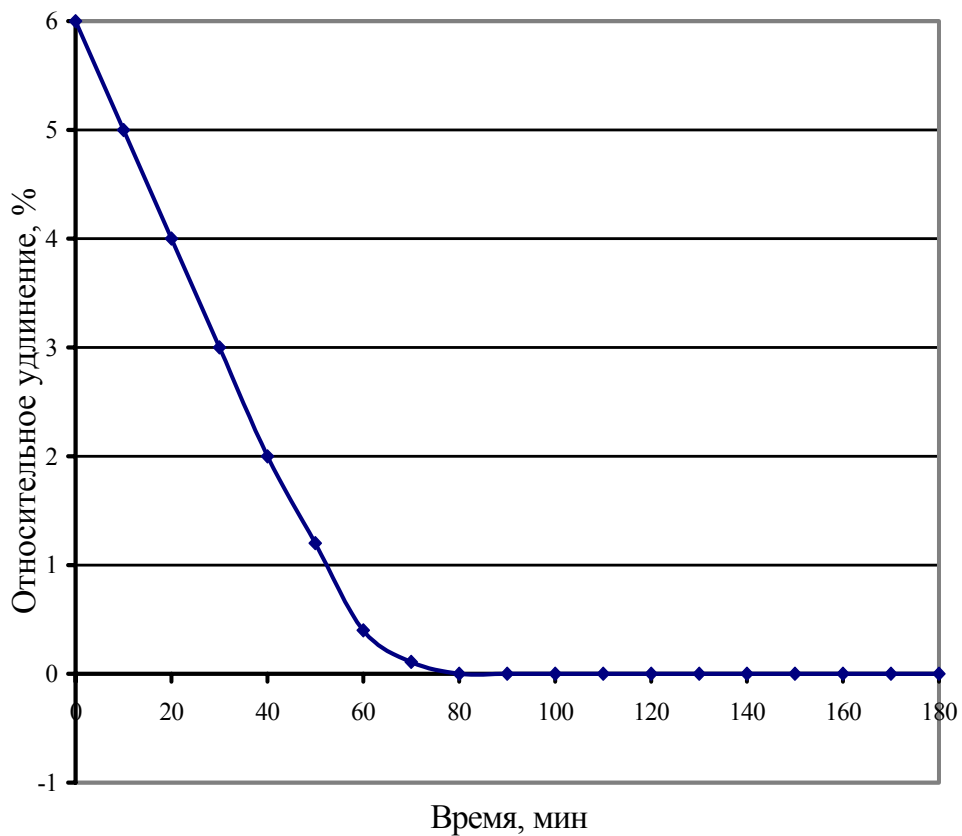


Рисунок 4.15 – Изменение относительного удлинения при растяжении в процессе сушки

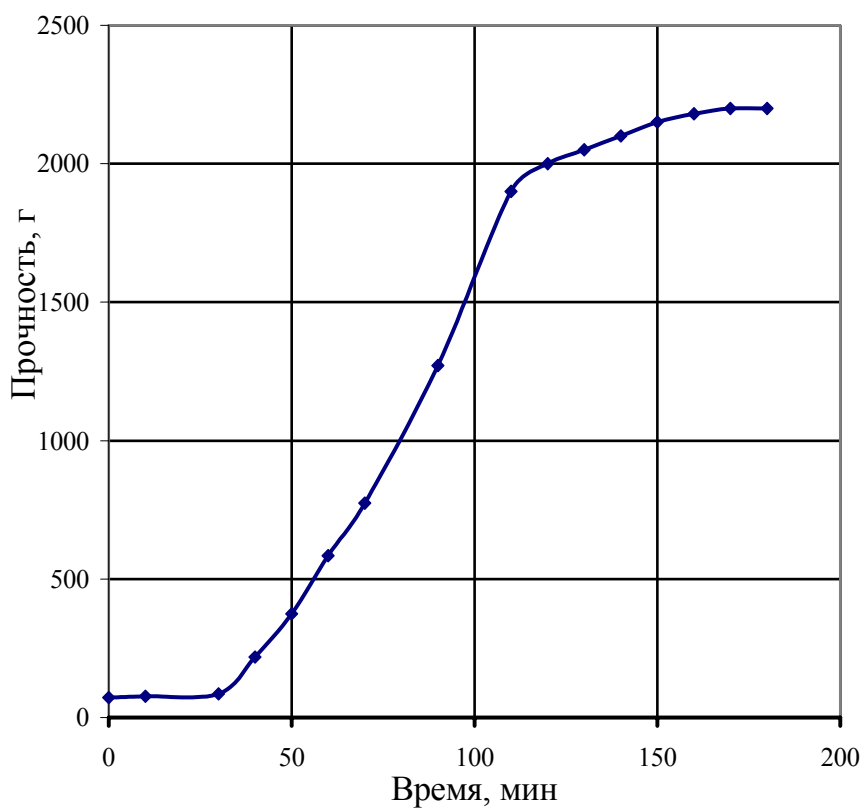


Рисунок 4.16 – Зависимость прочности изделий от продолжительности сушки

Из рисунка 4.15 видно, что в течение первых 60 мин сушки до достижения влажности 20 % наблюдается монотонное изменение максимального относительного удлинения при растяжении с 6 до 0,5 %, что соответствует сохранению в продукте пластичных свойств. В дальнейшем наблюдается более медленное уменьшение относительного удлинения изделий при растяжении, а после 70 мин сушки при влажности изделий 18 % и менее, изделия утрачивают свои пластические свойства.

Макаронные изделия сушили конвективным способом, периодически измеряя их температуру, влажность, изменение длины в процессе сушки, и определяя относительное удлинение при растяжении и их удельную прочность. Затем такие же макаронные изделия обрабатывали паром в течении 2 мин, при температуре 100-110 ° С и влажности близкой к насыщению (95-98 %) и сушили конвективным способом, анализируя высушиваемые изделия по тем же параметрам. Зависимости влажности макаронных изделий от продолжительности сушки на рисунке 4.17.

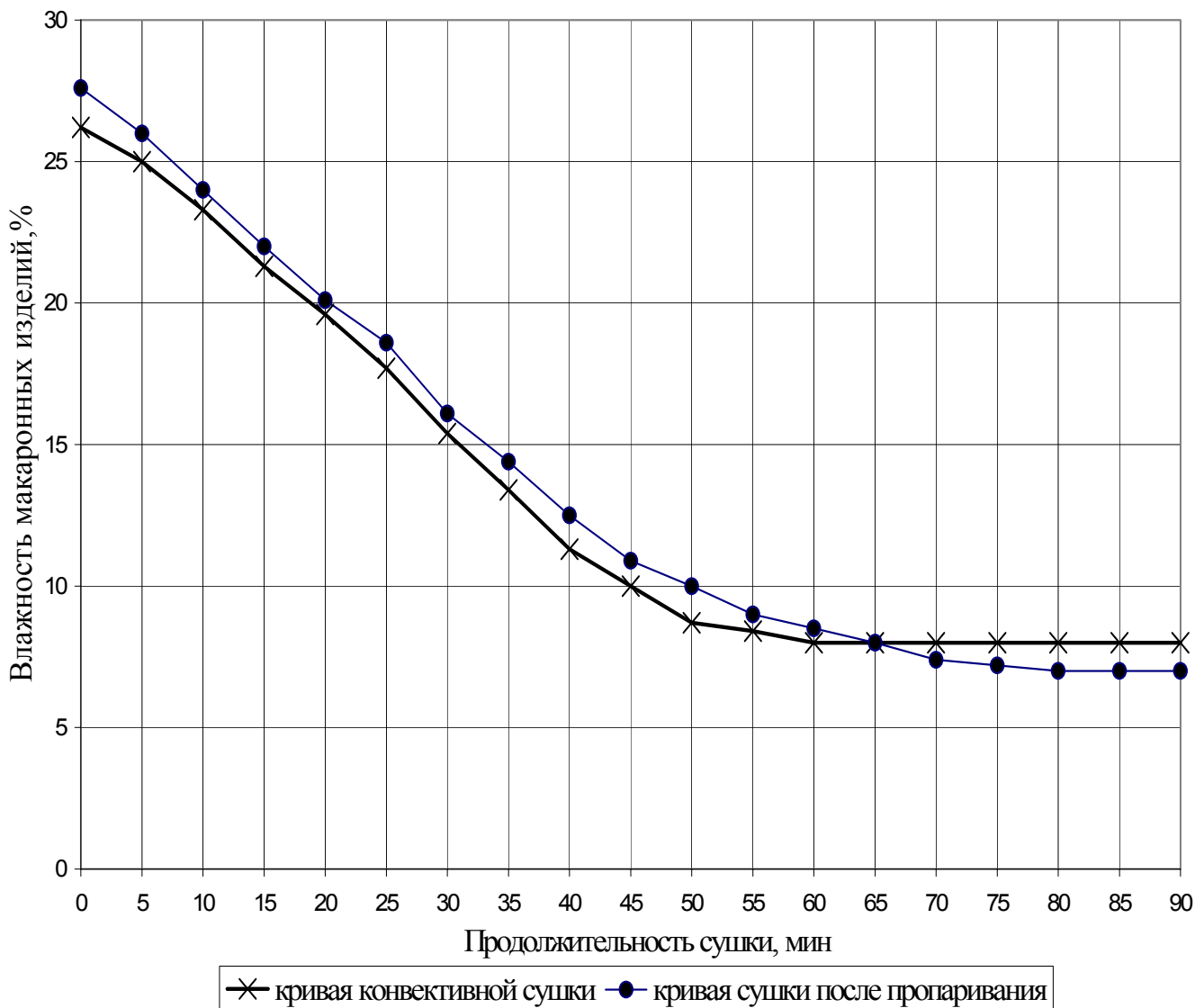


Рисунок 4.17 – Кривые конвективной сушки макаронных изделий и сушки после пропаривания

Анализируя кривую сушки без пропаривания можно выделить 4 этапа сушки:

- на первом этапе, на протяжении первых 5 мин наблюдается незначительное уменьшение влажности изделий, т.к. происходит процесс разогревания изделий, влага из внутренних слоев устремляется к наружным;

- на втором этапе, от 5 до 30 мин, влажность линейно убывает от 25 до 15,4 %. При этом градиент температуры становится практически равным нулю, происходит интенсивное испарение менее прочносвязанной осмотической влаги;

- на третьем этапе, от 30 до 75 мин, влажность изделий убывает от 15,4 до 8 %, при этом удаляется влага микрокапилляров и адсорбционно связанная влага, процесс лимитируется малой интенсивностью внутреннего переноса влаги, поверхность испарения интенсивно углубляется внутрь материала;

- на четвертом этапе, от 75 до 90 мин влажность изделий не изменяется и равна 8 %.

Сравнивая эту кривую с кривой сушки после пропаривания необходимо отметить, что после гидротермической обработки отсутствует период разогревания, т.к. макаронные изделия уже разогреты паром. Начальная влажность изделий повышается при пропаривании, а сам процесс несколько замедляется.

Относительное удлинение при растяжении с пропариванием и без него показано на рисунке 4.18.

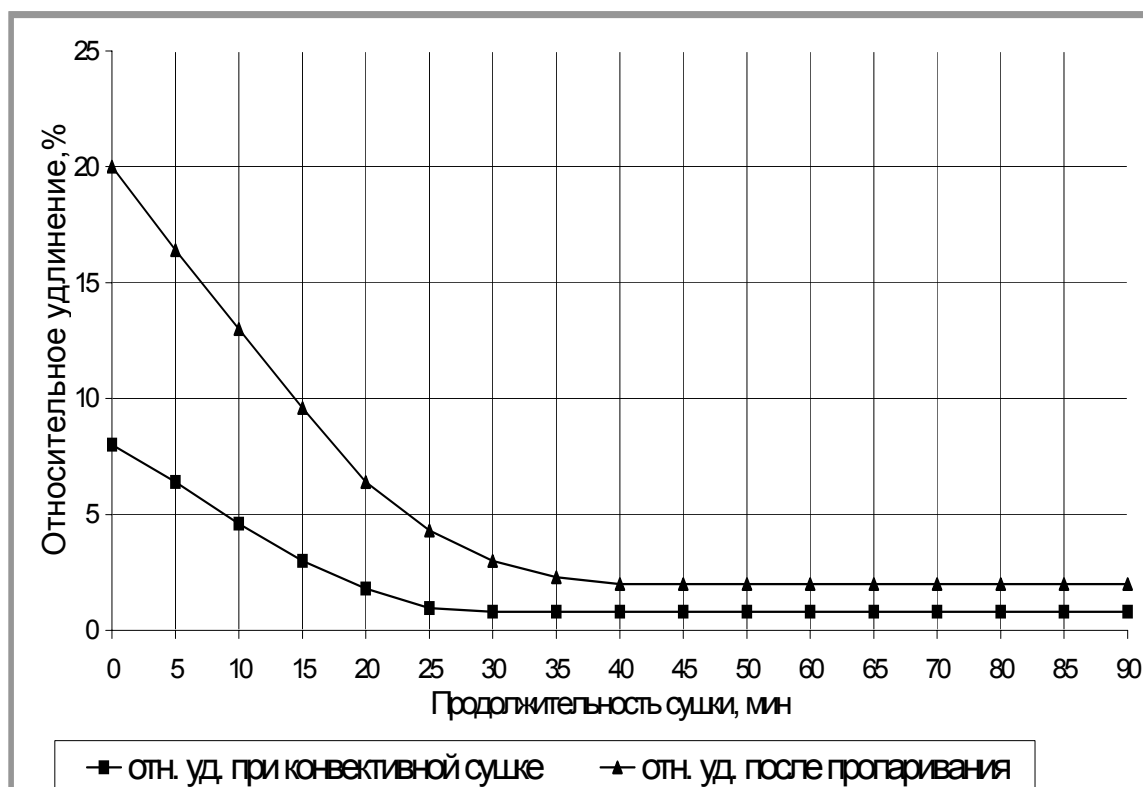


Рисунок 4.18 - Кривые зависимости относительного удлинения при растяжении от продолжительности сушки

Изменение удельной прочности макаронных изделий в процессе сушки показано на рисунке 4.19.

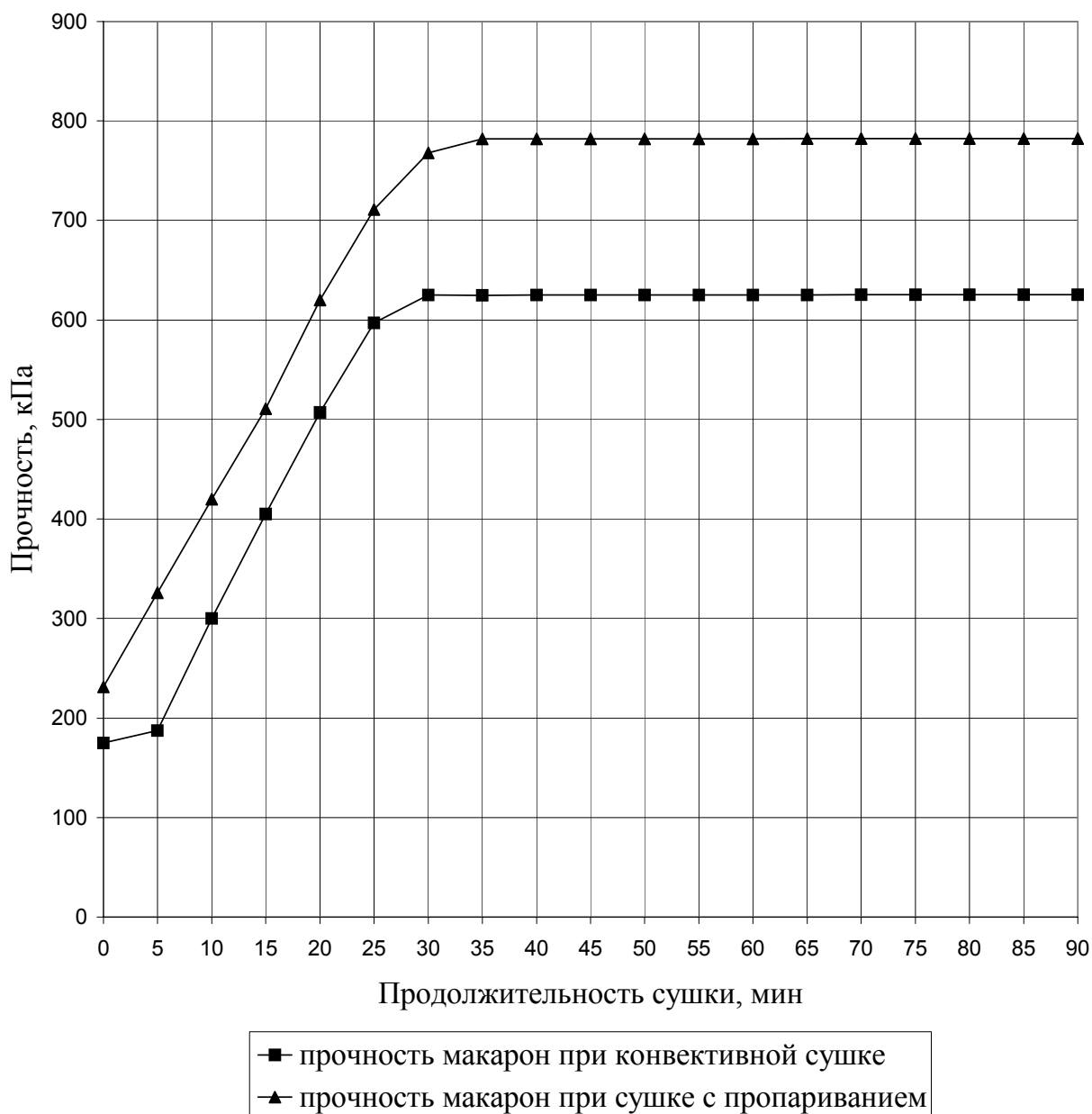


Рисунок 4.19 - Кривые зависимости удельной прочности от времени сушки

Изменение длины макаронных изделий в процессе сушки, так называемая усушка, представлено на рисунке 3.1.

Анализ зависимостей изменения длины макаронных изделий, относительного удлинения и удельной прочности от продолжительности сушки показывает, что для вышеуказанных периодов изменения структурно-механических свойств данные зависимости имеют разный характер:

- в первом периоде, продолжительностью 20 мин, при влажности изделий от 26 до 19,6 % для изделий без пропаривания, от 27,6 до 20 % для



изделий после пропаривания, когда макаронные изделия являются упруго-вязко-пластичным телом, длина изделий и относительное удлинение линейно убывают, а удельная прочность линейно возрастает;

- во втором периоде, продолжительностью от 20 до 30 мин для конвективной сушки (влажность изделий от 19,6 до 15,4 %), от 20 до 35 мин для сушки с пропариванием (влажность изделий от 20 до 16 %), макаронные изделия являются упруго-вязким телом, наблюдается более медленное уменьшение длины и относительного удлинения изделий и более медленное увеличение их удельной прочности;

- в третьем периоде, после 30 минут сушки при влажности изделий 15,4 % и менее для конвективной сушки и после 35 минут для сушки после пропаривания при влажности изделий 16 % и менее, когда макаронные изделия становятся упругим телом, их длина, относительное удлинение и удельная прочность постоянны.

Анализ качества готовых изделий показал, что изделия, обработанные паром в сравнении с изделиями, высушенными без обработки, имеют глянцевую поверхность без трещин и более светлый цвет.

Наименьшей энергоемкостью характеризуется процесс сушки макаронных изделий в жестких режимах, осуществляемый конвективным способом. Но эта сушка допускает возникновение больших внутренних напряжений, поэтому её целесообразно вести до потери продуктом пластичных свойств.

Изделия, сушка в мягких режимах которых производилась под воздействием сверхвысокочастотного нагрева, обладали наилучшими показателями качества и наименьшей степенью разрушения.

По данным экспериментов можно сделать вывод, что оптимальным является соединение стадии охлаждения со стадией стабилизации, причем охлаждать лучше всего воздухом с постепенно снижающейся температурой.

Таким образом, анализ процесса потери влаги макаронными изделиями показал, что применение комплексного энергоподвода позволит получить более высококачественный продукт, а по изменению его структурно-механических свойств можно судить о необходимой продолжительности процесса до максимально возможных границ.

## 5 Методология оптимизации параметров процесса сушки и сушильного оборудования

### 5.1 Структурная схема управления процессом сушки макаронных изделий

Запатентованный способ сушки макаронных изделий содержит 4 этапа. Согласно данному способу для оптимизации и дальнейшей автоматизации технологического процесса сушки была составлена схема управления процессом с поэтапной зависимостью выходных параметров (целевых функций) от управляющих воздействий (рисунок 5.1).

На всех этапах в качестве контролируемых параметров целесообразно использовать экспертную оценку органолептических свойств (ЭОц) макаронных изделий, комплексный показатель качества (Кпк) и удельные затраты энергии (УЗЭ) на проведение этапа. Причем для каждого этапа необходимо получить низкие удельные затраты и высокую экспертную оценку органолептических свойств. Комплексный показатель качества должен увеличиваться от этапа к этапу таким образом, чтобы после завершения последнего достигнуть максимального значения. С целью создания оптимальных условий для проведения последующих этапов контролируется также исходное относительное удлинение изделий при растяжении.

На первом этапе – этапе пропаривания и разогрева наблюдается некоторое увеличение влажности изделий, идет их разогрев, при этом возникает градиент влажности, вызванный разницей влагосодержания наружных и внутренних слоев. Цель этапа – как можно более быстрое разогревание изделий с параллельным упрочнением их клейковинного и крахмального каркаса за счет пропаривания всех слоев. В качестве управляемого параметра целесообразно использовать изменение относительного удлинения при растяжении ( $\varepsilon$ ) в процессе, об окончании этапа можно судить по достижению относительного удлинения при растяжении максимального значения. Отношение количества энергии, вносимой с инфракрасным излучением к количеству энергии, вносимой с паром ( $\frac{Q_{и.к.}}{Q_{п}}$ ) и интенсивность подвода энергии ( $P_{o}$ ) следует принять за управляющие воздействия.

На втором этапе – этапе конвективной сушки, происходит высушивание изделий до влажности, соответствующей их переходу из упруго-вязкопластичного состояния в упруго-вязкое. Цель этапа – максимально быстрое снижение влажности с одновременным упрочнением их структуры.

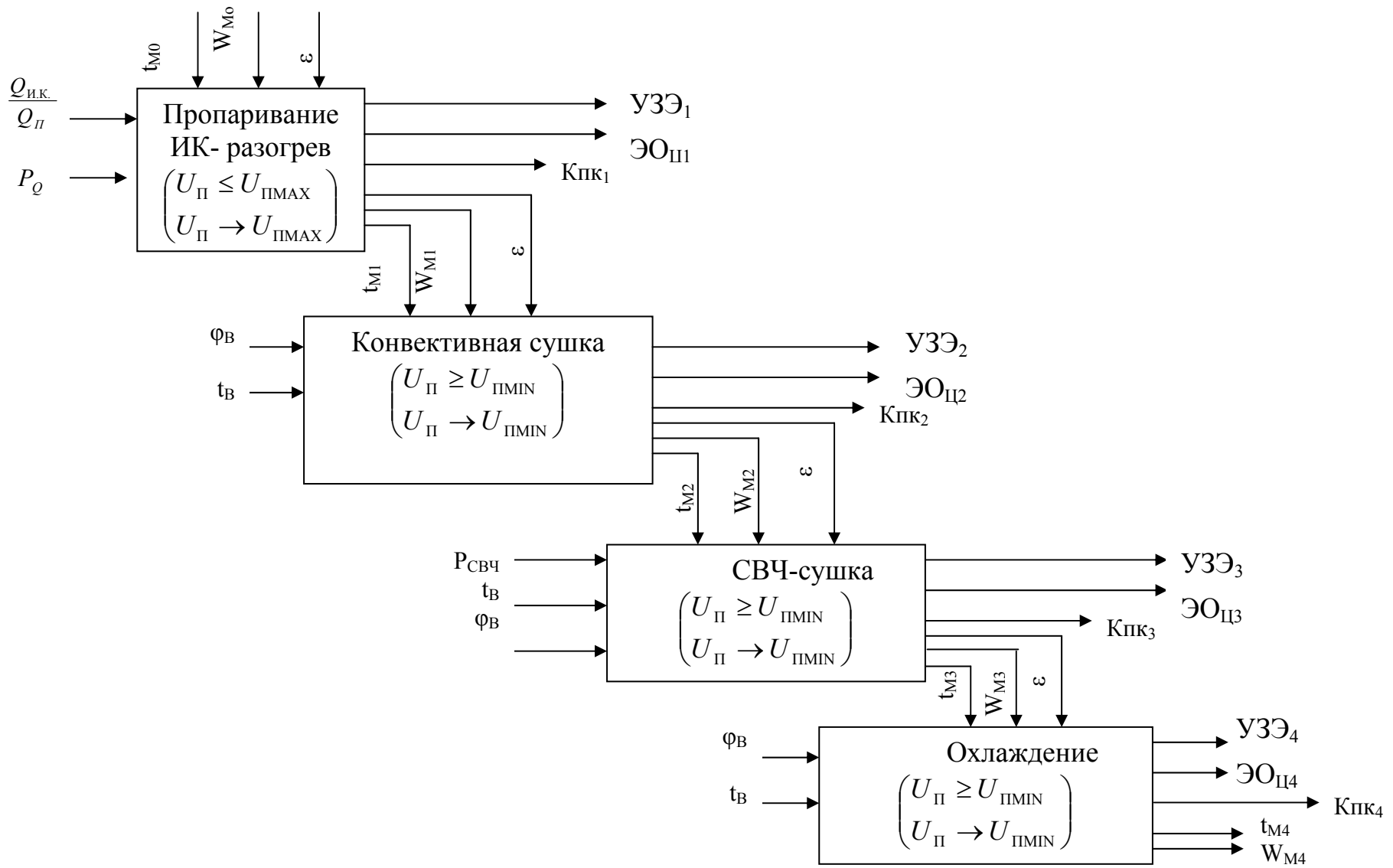


Рисунок 5.1 – Схема управления процессом сушки

В качестве управляющих воздействий целесообразно использовать температуру ( $t_B$ ) и относительную влажность сушильного воздуха ( $\varphi$ ), а в качестве управляемого параметра целесообразно использовать изменение относительного удлинения при растяжении. Об окончании этапа можно судить по началу отклонения уменьшения относительного удлинения при растяжении. Интенсивность сушки определяется разницей между средневзвешенной влажностью изделий и влажностью поверхностных слоев:  $W_{\text{ср.взв.}} - U_{\text{п}}$  и определяется также, как и в первом этапе, из условия возникновения внутренних напряжений ( $U_{\text{п}}$  - является функцией от температуры и влажности сушильного воздуха).

На третьем этапе – этапе сверхвысокочастотной сушки наблюдается высушивание макаронных изделий до превращения их в упругий материал. Цель этапа - быстрое удаление влаги из изделий с одновременным предупреждением возникновения больших касательных напряжений, вызванных смещением слоев. В качестве управляемого параметра также можно использовать относительное удлинение при растяжении. В качестве управляющих воздействий – интенсивность сверхвысокочастотного воздействия ( $P_{\text{свч}}$ ) и изменение влажности поверхности изделий ( $U_{\text{п}}$ ), определяющейся параметрами теплоносителя. Об окончании этапа можно судить по прекращению изменения относительного удлинения. Интенсивность сушки определяется мощностью СВЧ - воздействия, а также, как при конвективной сушке, относительной влажностью и температурой сушильного воздуха.

На четвертом этапе – этапе охлаждения происходит доведение макаронных изделий до стандартной влажности. Цель этапа – как можно более быстрое доведение продукта до кондиционной влажности с одновременным охлаждением. Об окончании этапа следует судить по достижению изделиями требуемой влажности и температуры. В качестве управляемых параметров целесообразно использовать изменение температуры и влажности макаронных изделий. Температура изделий на этапе охлаждения практически равна температуре сушильного воздуха, влажность изделий определяется изменением средневзвешенной влажности. В качестве управляющих воздействий целесообразно использовать температуру ( $t_B$ ) и относительную влажность охлаждающего воздуха ( $\varphi$ ).

## 5.2 Определение оптимальных параметров процесса сушки

Для выявления оптимальных значений параметров технологических режимов сушки макаронных изделий были проведены трехфакторные эксперименты на основе композиционного ортогонального плана ПФЭ  $2^3$  с использованием исходных факторов (управляющих воздействий и возмущений) различных для каждого периода сушки:

- относительное удлинение при растяжении в начале каждого периода сушки;
- отношение количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара;
- интенсивность подвода энергии для разных периодов;
- относительная влажность сушильного воздуха;
- влажность поверхности макаронных изделий;
- температура сушильного и охлаждающего воздуха.

В качестве параметров эффекта (управляемых и регулируемых параметров) взяты:

- изменение относительного удлинения при растяжении в процессе каждого этапа сушки;
- комплексный показатель качества макаронных изделий;
- экспертная оценка свойств сырых и готовых макаронных изделий;
- удельные затраты энергии на проведение каждого этапа сушки.

По результатам эксперимента получены уравнения регрессии, адекватно описывающие экспериментальные данные при уровне значимости  $P = 0,95$ .

Для каждого этапа сушки получены уравнения регрессии для определения качественных показателей и удельных затрат энергии. Все составляющие в уравнениях – в безразмерном выражении.

1. Для этапа инфракрасной сушки с пропариванием получены уравнения регрессии для определения:

- экспертной оценки свойств макаронных изделий

$$\begin{aligned} \text{ЭОц} = & 458,6 + 55,4 \cdot \varepsilon_{исх} + 11,67 \left( \frac{Q_{и.к.}}{Q_{п}} \right) - 51,4 \cdot P_Q - 17,9 \cdot \varepsilon_{исх} \left( \frac{Q_{и.к.}}{Q_{п}} \right) - 4,2 \left( \frac{Q_{и.к.}}{Q_{п}} \right) \cdot P_Q - \\ & - 43,7 \cdot \varepsilon_{исх} \cdot P_Q + 10,8 \cdot \varepsilon_{исх}^2 - 102 \cdot \left( \frac{Q_{и.к.}}{Q_{п}} \right)^2 - 43 \cdot P_Q^2 \end{aligned} \quad (5.1)$$

- комплексного показателя качества макаронных изделий

$$\begin{aligned} \text{Кпк} = & 46,5 + 1,44 \cdot \varepsilon_{исх} - 3,2 \cdot P_Q - 4,1 \cdot \left( \frac{Q_{и.к.}}{Q_{п}} \right) \cdot P_Q - 0,6 \cdot \varepsilon_{исх} \cdot \left( \frac{Q_{и.к.}}{Q_{п}} \right) \cdot P_Q - 4,5 \cdot \varepsilon_{исх}^2 - \\ & - 8,5 \cdot \left( \frac{Q_{и.к.}}{Q_{п}} \right)^2 - 8,3 \cdot P_Q^2 \end{aligned} \quad (5.2)$$

- удельных затрат энергии на проведение этого этапа сушки

$$\text{УЗЭ} = 49,5 + 7,3 \cdot \varepsilon_{исх} + 2,3 \cdot P_Q + 1,2 \cdot \left( \frac{Q_{и.к.}}{Q_{п}} \right) \cdot P_Q - 1,4 \cdot \varepsilon_{исх} \cdot P_Q - 1,9 \cdot \varepsilon_{исх}^2, \quad (5.3)$$

где  $\varepsilon_{исх}$  - исходное относительное удлинение при растяжении;

$\left(\frac{Q_{и.к.}}{Q_{п}}\right)$  - отношение количества энергии, подводимой с инфракрасным

излучением, к количеству энергии, подводимой с паром;

$P_Q$  - интенсивность подвода энергии.

2. Для этапа конвективной сушки получены уравнения регрессии для определения:

- экспертной оценки свойств макаронных изделий

$$\begin{aligned} \text{ЭОц} = & 463,5 + 5,7 \cdot t_B + 10,3 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot t_B + 72,1 \cdot t_B \cdot \varphi - 9,5 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot \varphi - 14,57 \cdot \varepsilon_{ИСХ}^2 - \\ & - 59,9 \cdot t_B^2 - 66,9 \cdot \varphi^2 \end{aligned} \quad (5.4)$$

- комплексного показателя качества макаронных изделий

$$\begin{aligned} \text{Кпк} = & 90,2 + 1,9 \cdot t_B + 7,6 \cdot \varphi + 1,62 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot t_B + 15,7 \cdot t_B \cdot \varphi - 2,3 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot \varphi - 1,7 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot t_B \cdot \varphi - \\ & - 14,1 \cdot t_B^2 - 30,47 \cdot \varphi^2 \end{aligned} \quad (5.5)$$

- удельных затрат энергии на проведение этого этапа сушки

$$\text{УЗЭ} = 86,7 + 15,8 \cdot \varepsilon_{ИСХ} - 1,3 \cdot t_B + 5,7 \cdot \varphi + 0,5 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot t_B + 0,5 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot \varphi - 1,3 \cdot \varepsilon_{ИСХ}^2, \quad (5.6)$$

где  $\varepsilon_{ИСХ}$  - исходное относительное удлинение при растяжении;

$t_B$  - температура сушильного воздуха;

$\varphi$  - относительная влажность сушильного воздуха.

3. Для этапа сверхвысокочастотной сушки получены уравнения регрессии для определения:

- экспертной оценки свойств макаронных изделий

$$\begin{aligned} \text{ЭОц} = & 452,3 + 20,6 \cdot P_{СВЧ} + 38,9 \cdot U_{п} - 9,2 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot P_{СВЧ} + 50,6 \cdot P_{СВЧ} \cdot U_{п} + 19,1 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot U_{п} - \\ & - 46,1 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot P_{СВЧ} \cdot U_{п} - 27,1 \cdot \varepsilon_{ИСХ}^2 - 64,5 \cdot P_{СВЧ}^2 - 2,5 \cdot U_{п}^2 \end{aligned} \quad (5.7)$$

- комплексного показателя качества макаронных изделий

$$\begin{aligned} \text{Кпк} = & 131,3 + 5,9 \cdot \varepsilon_{ИСХ} + 2,4 \cdot P_{СВЧ} - 4,6 \cdot U_{п} - 12,7 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot P_{СВЧ} + 16,87 \cdot P_{СВЧ} \cdot U_{п} + \\ & + 3,3 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot U_{п} + 3,2 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot P_{СВЧ} \cdot U_{п} - 18,9 \cdot \varepsilon_{ИСХ}^2 - 7,2 \cdot P_{СВЧ}^2 - 10,2 U_{п}^2 \end{aligned} \quad (5.8)$$

- удельных затрат энергии на проведение этого этапа сушки

$$\begin{aligned} \text{УЗЭ} = & 61,3 + 6,1 \cdot \varepsilon_{ИСХ} - 2,6 \cdot P_{СВЧ} + 0,5 \cdot U_{п} - 3,7 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot P_{СВЧ} - 4,1 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot U_{п} - \\ & - 3,9 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot P_{СВЧ} \cdot U_{п} - 1,1 \cdot \varepsilon_{ИСХ}^2 + 0,6 \cdot P_{СВЧ}^2, \end{aligned} \quad (5.9)$$

где  $\varepsilon_{ИСХ}$  - исходное относительное удлинение при растяжении;

$P_{СВЧ}$  - интенсивность СВЧ - воздействия;

$U_{II}$  - влажность поверхности макаронных изделий.

4. Для этапа охлаждения получены уравнения регрессии для определения:

- экспертной оценки свойств макаронных изделий

$$\begin{aligned} \text{ЭОц} = & 447,7 + 5,1 \cdot \varepsilon_{ИСХ} + 9,8 \cdot t_B + 12,9 \cdot \varphi + 7,3 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot t_B + 51,3 \cdot t_B \cdot \varphi + 2,5 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot \varphi - \\ & - 5,5 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot t_B \cdot \varphi - 28,8 \cdot \varepsilon_{ИСХ}^2 - 45,5 \cdot t_B^2 - 45,9 \cdot \varphi^2 \end{aligned} \quad (5.10)$$

- комплексного показателя качества макаронных изделий

$$\begin{aligned} \text{Кпк} = & 140,1 + 21,1 \cdot \varepsilon_{ИСХ} + 11,5 \cdot t_B + 5,1 \cdot \varphi + 4,5 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot t_B - 4,1 \cdot t_B \cdot \varphi - 3,1 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot \varphi - \\ & - 16,1 \cdot \varepsilon_{ИСХ}^2 - 19,6 \cdot t_B^2 - 13,1 \cdot \varphi^2 \end{aligned} \quad (5.11)$$

- удельных затрат энергии на проведение этого этапа сушки

$$\text{УЗЭ} = 22,6 + 4,8 \cdot t_B + 3,4 \cdot \varphi + 0,6 \cdot t_B \cdot \varphi + 0,1 \cdot \varepsilon_{ИСХ} \cdot t_B \cdot \varphi + 0,6 \cdot \varepsilon_{ИСХ}^2, \quad (5.12)$$

где  $\varepsilon_{ИСХ}$  - исходное относительное удлинение при растяжении;

$t_B$  - температура охлаждающего воздуха;

$\varphi$  - относительная влажность охлаждающего воздуха.

Для перевода величин, входящих в уравнения, в натуральную размерность, можно воспользоваться нижеприведенными выражениями.

1. Для этапа инфракрасной сушки с пропариванием:

- исходное относительное удлинение при растяжении  $\varepsilon'_{ИСХ}$  (%)

$$\varepsilon'_{ИСХ} = 4 \cdot \varepsilon_{ИСХ} + 9; \quad (5.13)$$

- отношение энергии, подводимой с инфракрасным излучением к

количеству энергии, подводимой с паром  $\left( \frac{Q_{И.К.}}{Q_{II}} \right)'$

$$\left( \frac{Q_{И.К.}}{Q_{II}} \right)' = \frac{Q_{И.К.}}{Q_{II}} + 2; \quad (5.14)$$

- интенсивность подвода энергии  $P'_Q \left( \frac{кВт}{кг \cdot ч} \right)$

$$P'_Q = 2 \cdot P_Q + 5. \quad (5.15)$$

2. Для этапа конвективной сушки:

- исходное относительное удлинение при растяжении  $\varepsilon'_{исх}$  (%)

$$\varepsilon'_{исх} = 6 \cdot \varepsilon_{исх} + 20; \quad (5.16)$$

- температура сушильного воздуха  $t'_B$  ( $^{\circ}C$ )

$$t'_B = 30 \cdot t_B + 70; \quad (5.17)$$

- относительная влажность сушильного воздуха  $\varphi'$  (%)

$$\varphi' = 15 \cdot \varphi + 80. \quad (5.18)$$

### 3. Для этапа СВЧ – сушки:

- исходное относительное удлинение при растяжении  $\varepsilon'_{исх}$  (%)

$$\varepsilon'_{исх} = 3 \cdot \varepsilon_{исх} + 6; \quad (5.19)$$

- интенсивность сверхвысокочастотного воздействия  $P'_{СВЧ}$  ( $\frac{кВт}{кг \cdot ч}$ )

$$P'_{СВЧ} = 149 \cdot P_{СВЧ} + 447; \quad (5.20)$$

- влажность поверхности  $U'_п$  (%)

$$U'_п = 3 \cdot U_п + 11. \quad (5.21)$$

### 4. Для этапа охлаждения:

- исходное относительное удлинение при растяжении  $\varepsilon'_{исх}$  (%)

$$\varepsilon'_{исх} = 1,5 \cdot \varepsilon_{исх} + 2,5; \quad (5.22)$$

- температура охлаждающего воздуха  $t'_B$  ( $^{\circ}C$ )

$$t'_B = 7 \cdot t_B + 18; \quad (5.23)$$

- относительная влажность охлаждающего воздуха  $\varphi'$  (%)

$$\varphi' = 25 \cdot \varphi + 70. \quad (5.24)$$



В применяемом способе, при проведении многокритериальной оптимизации производства макаронных изделий строились так называемые поверхности отклика, одна из которых на конкретном примере представлена на рисунке 5.2. Конечная цель построения таких поверхностей заключалась в нахождение экстремума выбранного критерия оптимизации при фиксированном значении одного из факторов, причем другие факторы при этом менялись на двух уровнях – верхнем и нижнем. Изменяющиеся факторы для удобства проведения расчета берутся в безразмерном выражении (далее у.е.).

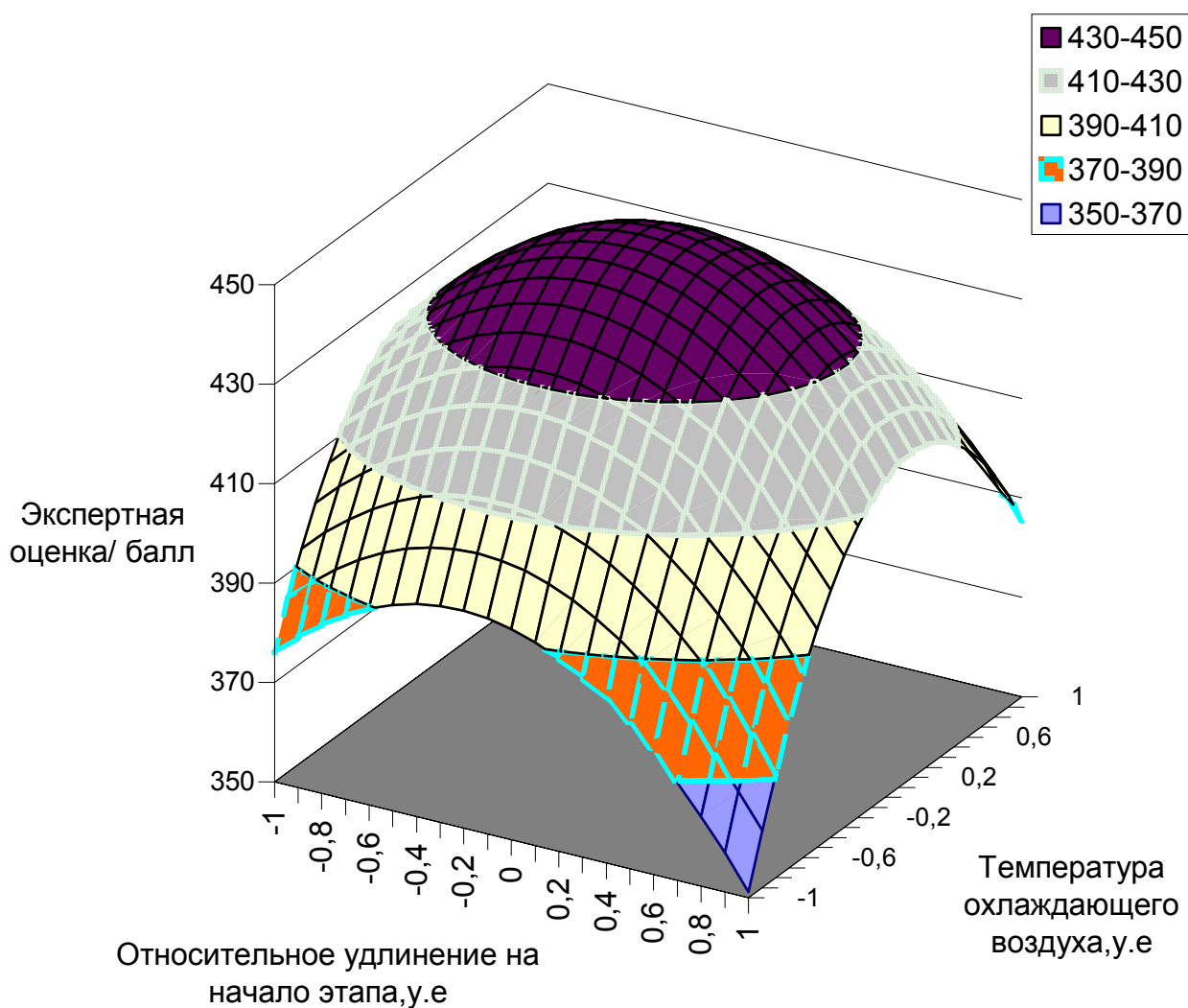


Рисунок 5.2 - Зависимость улучшения качества полуфабрикатов по результатам экспертной оценки органолептических свойств от начального относительного удлинения и температуры охлаждающего воздуха при его влажности 70 %

Графоаналитическую оптимизацию процесса проводили путем построения горизонтальных проекций поверхностей отклика, представленных на рисунках 5.3 - 5.5.

Известно, что конечные показатели качества макарон формируются на этапе охлаждения.

Анализ полученных поверхностей отклика для данного этапа показал, что при относительной влажности охлаждающего воздуха 45 % (см. приложения Б – Г) максимальный комплексный показатель качества (Кпк) недостаточно высокий и составляет 135 баллов, при этом можно получить экспертную оценку органолептических свойств не более 400 баллов. При относительной влажности охлаждающего воздуха 95 % комплексный показатель качества колеблется в пределах от 130 до 140 баллов. Экспертная оценка органолептических свойств менее 400 баллов. Наилучшие значения этого показателя получены при относительной влажности охлаждающего воздуха 70 %: при этом Кпк =140 баллов; экспертная оценка (ЭОц) наиболее оптимальная, ЭОц > 430 баллов (см. рисунки 5.3, 5.4, 5.5).

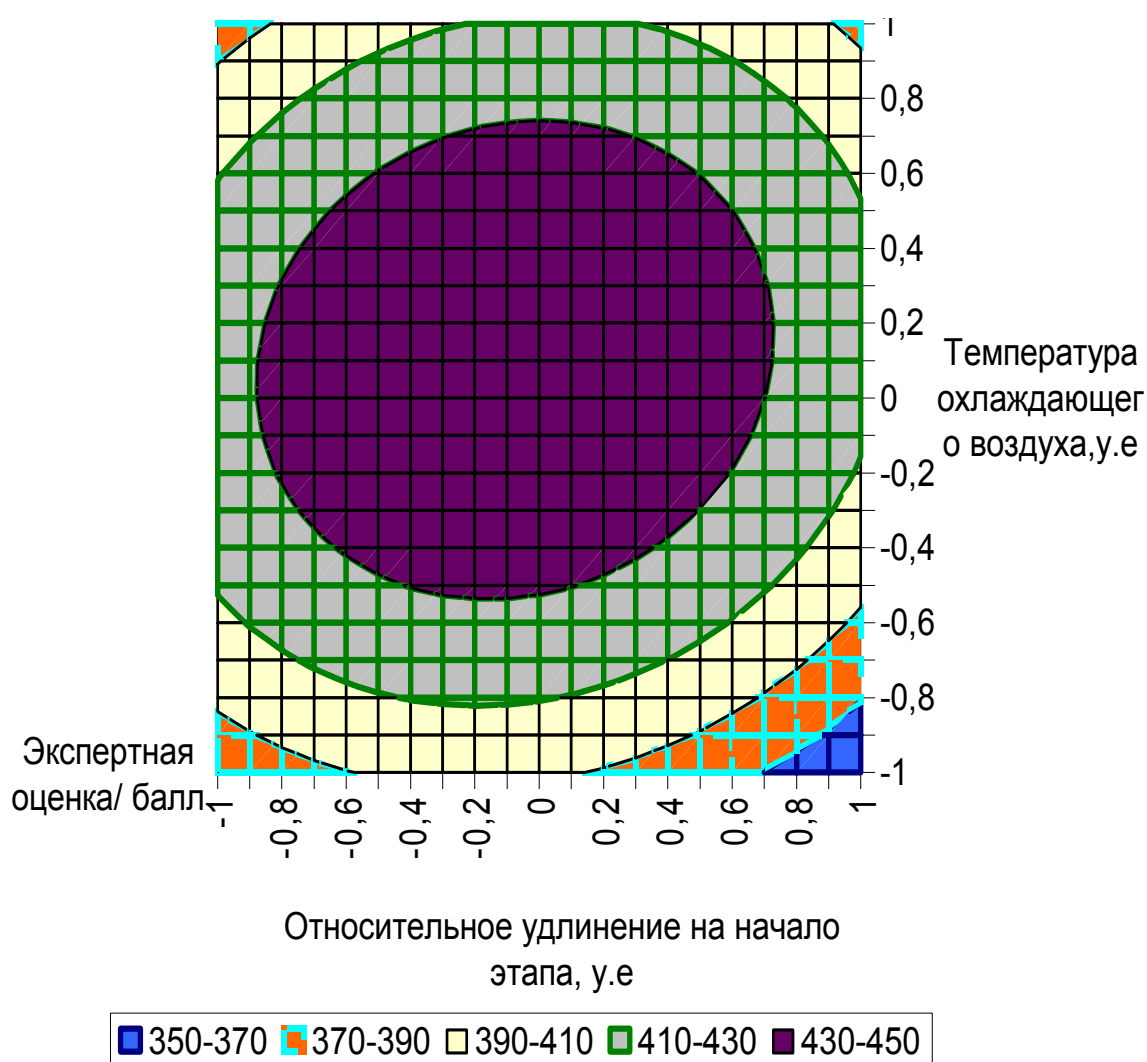


Рисунок 5.3 - Зависимость улучшения качества полуфабрикатов по результатам экспертной оценки органолептических свойств от начального относительного удлинения и температуры охлаждающего воздуха при его влажности 70 %

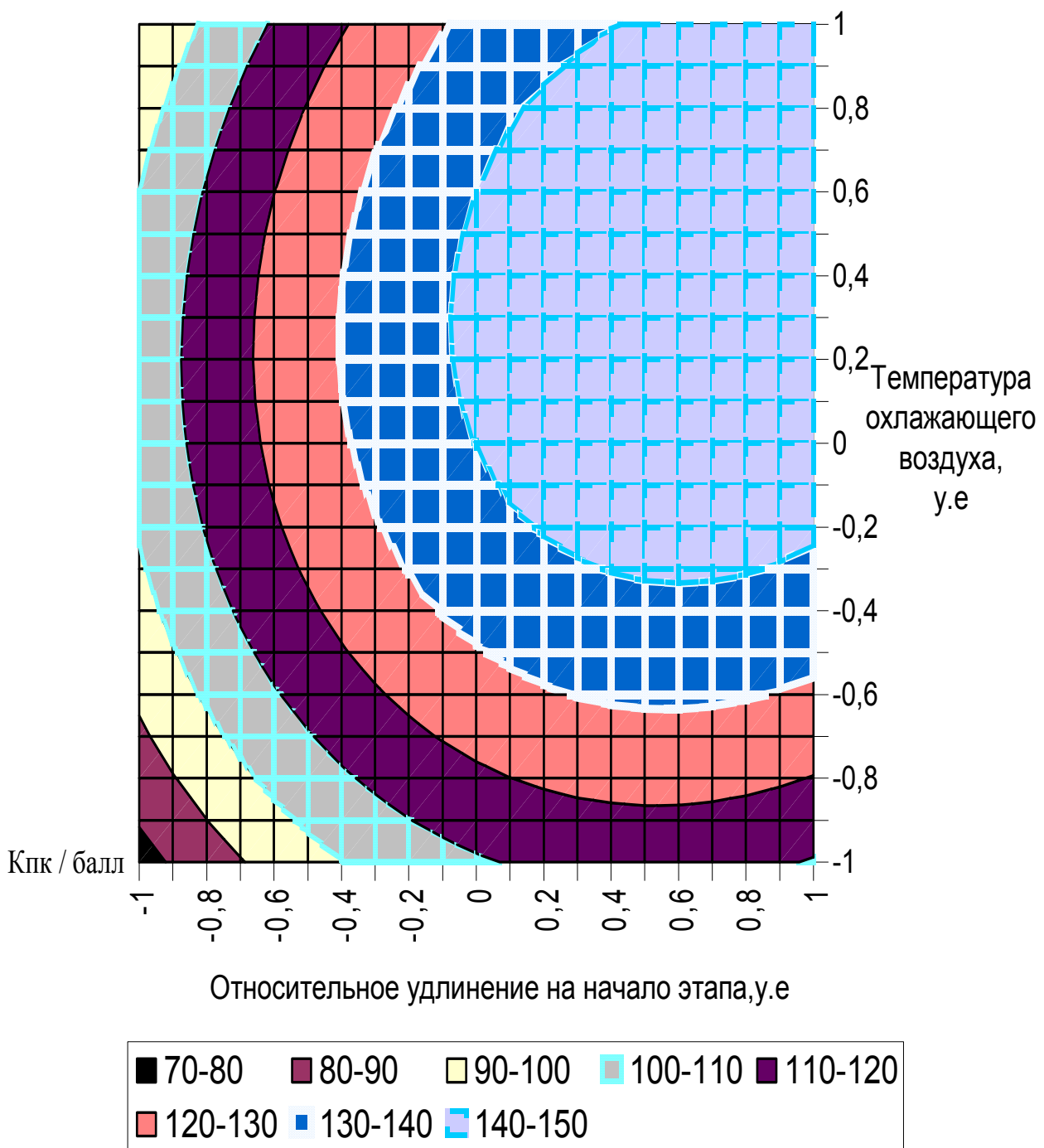


Рисунок 5.4 - Зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 70 %

Также рассматривали как изменяются удельные затраты энергии на проведение каждого этапа сушки при фиксированном значении одного из параметров и изменении двух других на разных уровнях. С результатами этих изменений можно ознакомиться в приложении Г. Для этапа охлаждения полученная зависимость – на рисунке 5.5.

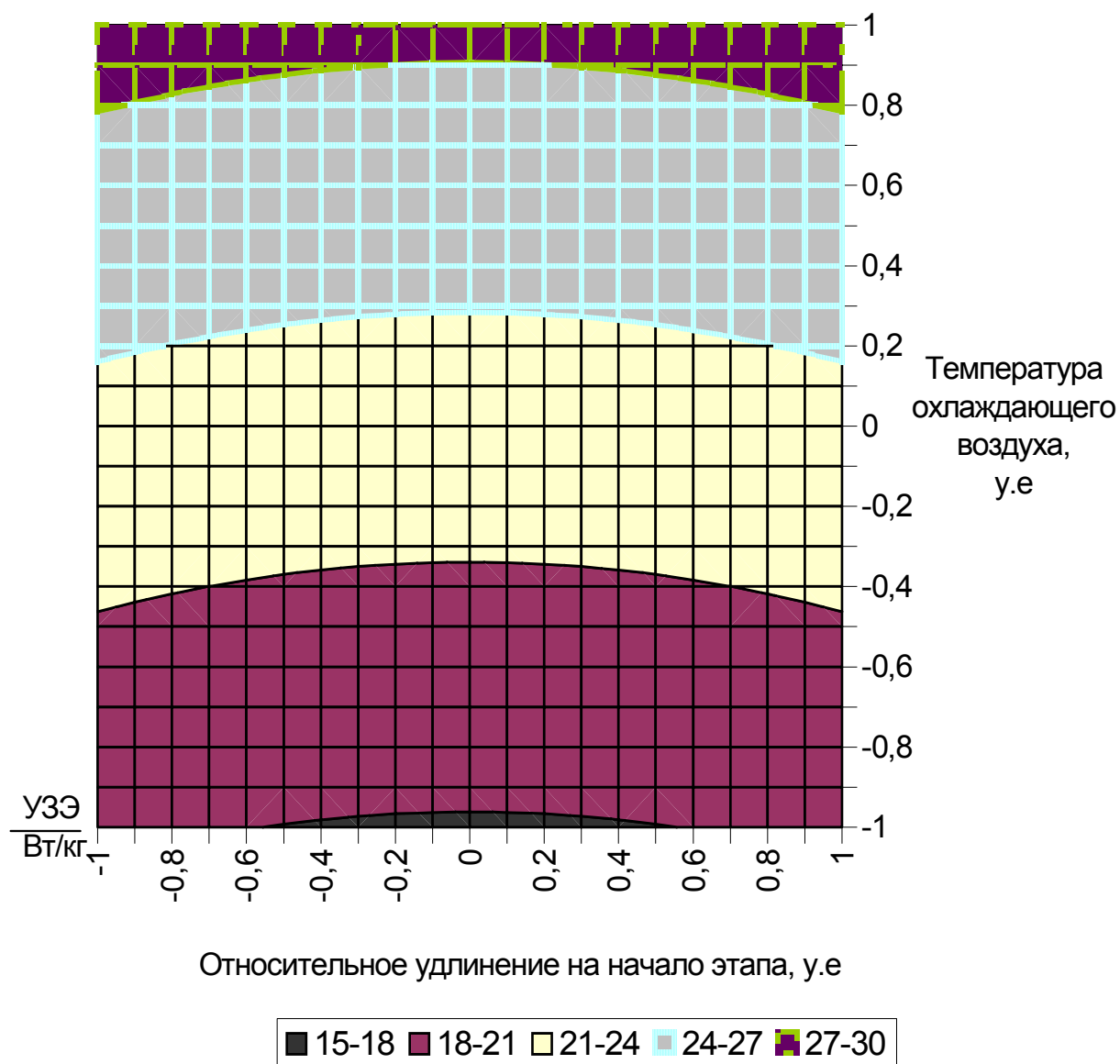


Рисунок 5.5 - Зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 70 %

Таким образом, выделена оптимальная область для данной влажности (см. рисунок 5.6 заштрихованную область), полученная последовательным наложением горизонтальных проекций рисунков 5.3 - 5.5. В данной области максимальный комплексный показатель качества равен 140 баллов, экспертная оценка не менее 430 баллов, удельные затраты энергии на проведение этапа охлаждения не более 24 Вт/кг. При этом относительное удлинение на начало этапа должно составлять от 2,5 до 3,5 % ( $0 \div 0,7$  на рисунке), температура охлаждающего воздуха от 16 до 19 °С ( $-0,3 \div 0,2$  на рисунке).

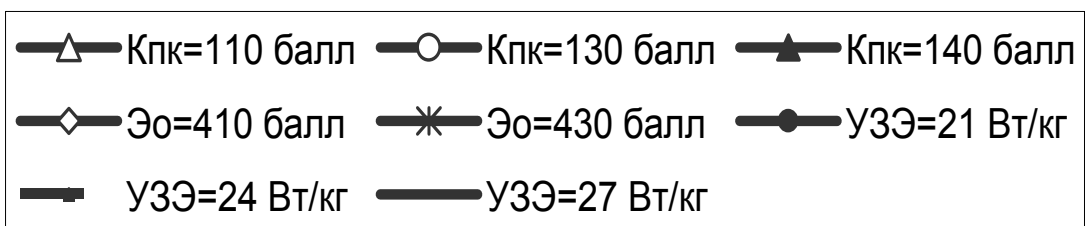
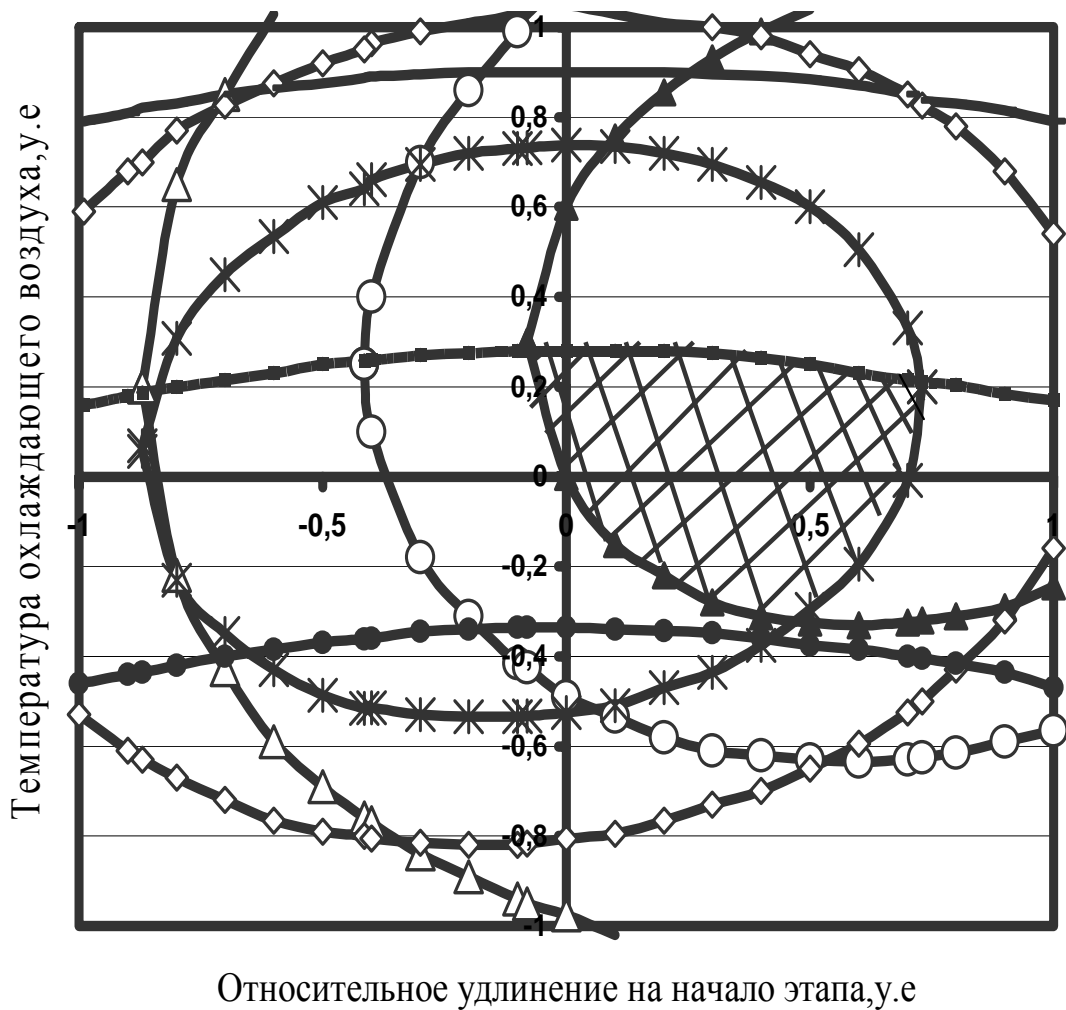


Рисунок 5.6 – Оптимизация режима для этапа охлаждения  
(при влажности охлаждающего воздуха 70 %)

Анализ результатов, полученных в периоде сверхвысокочастотного нагрева (см. приложения Б-Г) показывает, что при поверхностной влажности изделий 8 % можно получить полуфабрикаты с экспертной оценкой не менее 400 баллов и комплексным показателем качества не менее 125 баллов. При влажности поверхности 14 % можно получить полуфабрикат, у которого  $K_{пк} \leq 115$  баллов,  $ЭОц \geq 150$  баллов. Наилучшие результаты получены при влажности поверхности 11 %, при данной влажности выделена оптимальная область, ограниченная линией  $ЭОц = 450$  баллов.

В данной области максимальный комплексный показатель качества более 125 баллов, экспертная оценка не менее 450 баллов, удельные затраты энергии на проведение этапа охлаждения не более 65 Вт/кг. При этом относительное удлинение на начало этапа должно составлять от 5,1 до 7,2 % (-0,3÷0,4 у.е.), интенсивность СВЧ- воздействия от 0,39 до 0,457 кВт/(кг·ч) (-0,4÷0,05 у.е.).

Анализ периода конвективной сушки по поверхностям отклика показал, что при относительной влажности сушильного воздуха 65 % можно получить полуфабрикаты с экспертной оценкой выше 400 баллов, максимальным комплексным показателем качества выше 55 баллов. При относительной влажности 95 % можно получить полуфабрикат с комплексным показателем качества не менее 80 баллов и экспертной оценкой не менее 400 баллов. Наилучшие результаты получены при относительной влажности 80 %. Оптимальная область при данной влажности ограничена линиями ЭОц = 470 баллов, Кпк = 90 баллов и удельные затраты энергии (УЗЭ) равны 90 Вт/кг. При этом экспертная оценка не менее 470 баллов, максимальный комплексный показатель качества не менее 90 баллов, удельные затраты энергии не более 85 Вт/кг. Управляющие воздействия должны быть такими: температура сушильного воздуха от 67 до 76 °С (- 0,1 ÷ 0,2 у.е.), а контролируемое относительное удлинение на начало этапа должно составлять от 15 до 19 % (- 0,85 ÷ - 0,2 у.е.).

Анализ результатов, полученных в периоде инфракрасной сушки полуфабрикатов с пропариванием показывает, что при интенсивности подвода энергии 3 кВт/кг·ч можно для любого исходного относительного удлинения (5-13 %) получить полуфабрикаты с экспертной оценкой не ниже 350 баллов, максимальным комплексным показателем качества выше 35 баллов. При интенсивности подвода энергии 7 кВт/кг·ч для исходного относительного удлинения от 5,5 до 13 % (- 0,9 ÷ 1 у.е.) можно получить полуфабрикаты с экспертной оценкой не менее 350 баллов, с комплексным показателем качества не менее 40 баллов. Наилучшей является интенсивность подвода энергии 5 кВт/кг·ч. Оптимальная область ограничена линиями ЭОц = 400 баллов, Кпк = 40 баллов. При этом экспертная оценка не менее 400 баллов, максимальный комплексный показатель качества не менее 40 баллов, а удельные затраты энергии увеличиваются с увеличением исходного относительного удлинения и составляют не более 55 Вт/кг. Относительное удлинение на начало этапа может меняться от 5 до 13 % (-1÷1 у.е.), отношение количества энергии, подводимого с инфракрасным излучением к количеству энергии, подводимой с паром от 2,4 до 2,6 (0,4÷0,6 у.е.). На каждом этапе оптимизация проводилась последовательным наложением соответствующих приложений, причем кроме последнего этапа охлаждения, для каждого этапа сушки учитывались оптимальные области конечного относительного удлинения для предыдущего этапа (см. приложение Д). Сочетания оптимальных параметров для проведения всего процесса сушки сведены в таблицу 5.1. Их соблюдение обеспечивает получение максимально возможного качества изделий при общих наименьших удельных затратах на сушку не более 219 Вт/кг.

Таблица 5.1 – Оптимальные параметры для проведения сушки макаронных изделий

Период сушки	Относит удлинение на начало периода, %	Отношение количества энергии подводимых с инфракрасным излучением и паром	Интенсивность подвода энергии, кВт/кг·ч	Температура сушильного, охлаждающего воздуха, °С	Относит. влажность сушильного воздуха, %	W поверхности, %
Инфракрасная сушка с пропариванием	5,0-13,0	2,4-2,6	5,00	-	-	-
Конвективная сушка	15,0-19,0	-	-	67,0-76,0	80	-
СВЧ-сушка	5,1-7,2	-	0,39-0,47	-	-	11
Охлаждение	2,5-3,5	-	-	16-19	70	-

Заштрихованная область носит в теории оптимального управления определенное название «области достижимого качества по выбранным критериям». Получая такие области, удается подобрать соответствующие управляющие воздействия и создать новые алгоритмы управления технологическими процессами.

Дальнейшее развитие проведенных исследований возможно в нескольких направлениях. Можно выбрать другие критерии оптимальности и по предложенным авторами зависимостям, представленным в приложениях Б, В, Г, Д, провести собственную оптимизацию процесса сушки макаронных изделий. Или расширить сферу применения предложенной методики многокритериальной оптимизации на все виды высоковлажных пищевых продуктов.

## 6 Автоматизация технологического процесса сушки длинных макаронных изделий

### 6.1 Алгоритм управления процессом сушки в автоматизированных системах производства длинных макаронных изделий

На основе полученных оптимальных значений параметров технологических режимов разработан следующий алгоритм управления процессом сушки, представленный на рисунках 6.1 – 6.4. Алгоритм предусматривает управление процессом сушки на этапах с использованием параметрических коэффициентов уравнений регрессии.

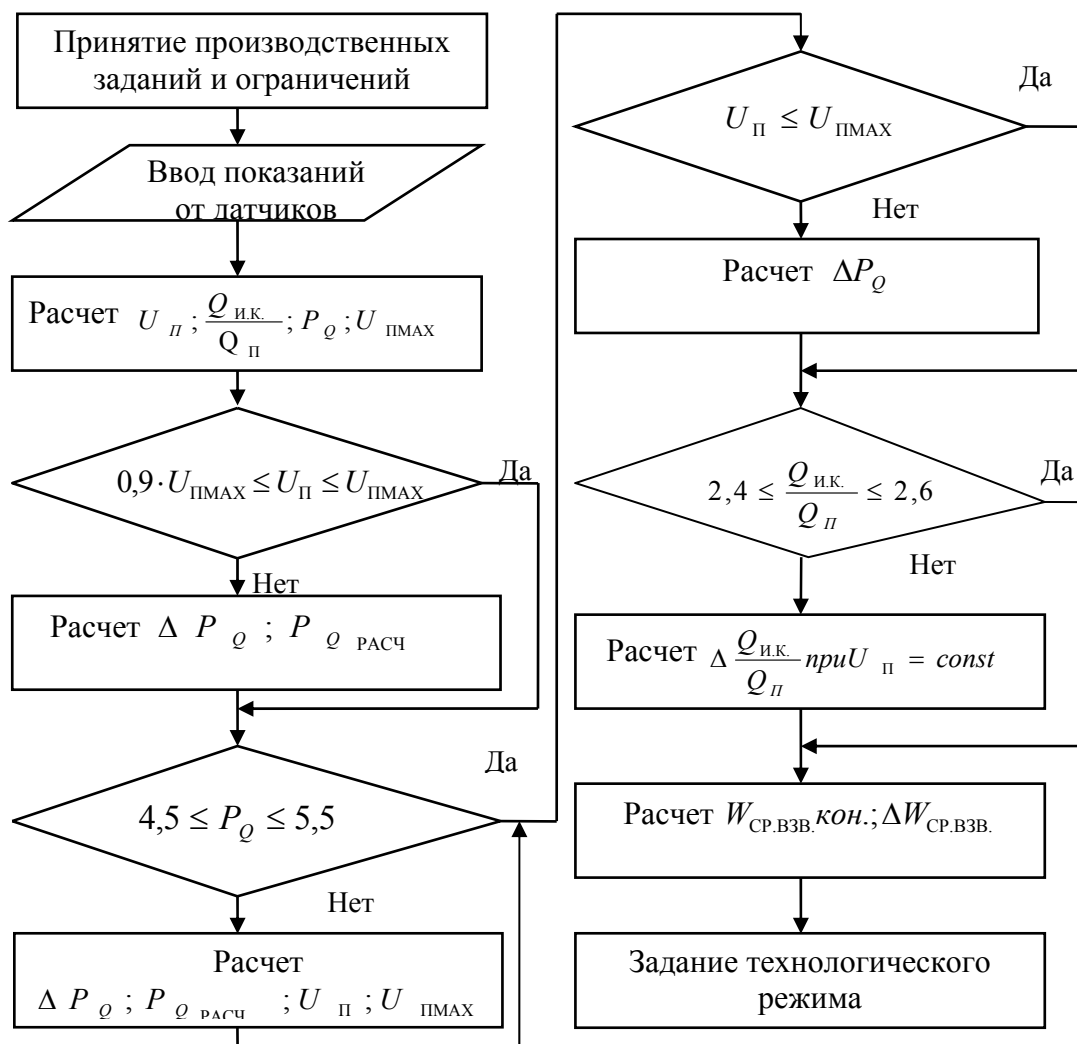


Рисунок 6.1 - Алгоритм управления на этапе инфракрасной сушки с пропариванием



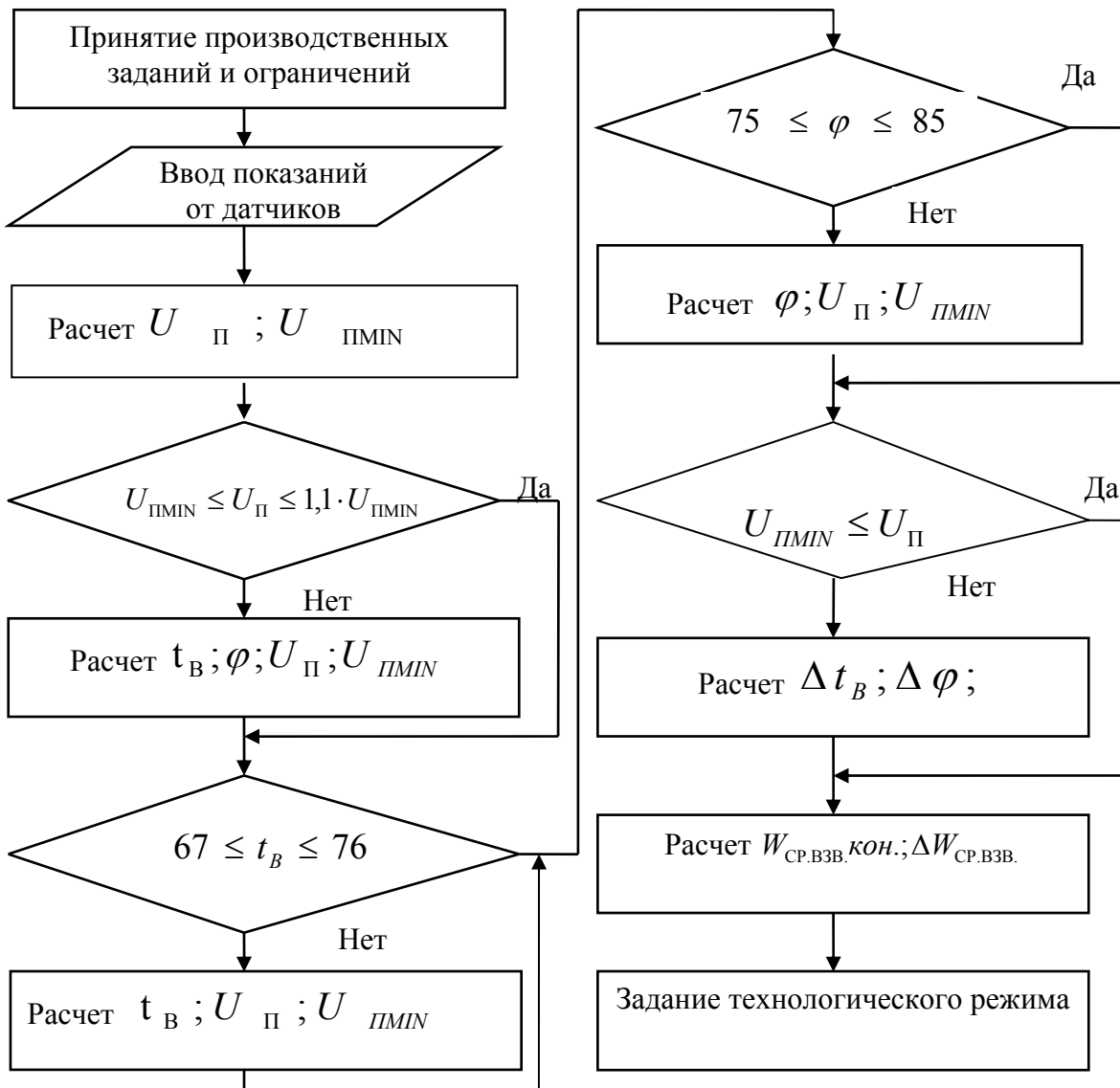


Рисунок 6.2 - Алгоритм управления на этапе конвективной сушки

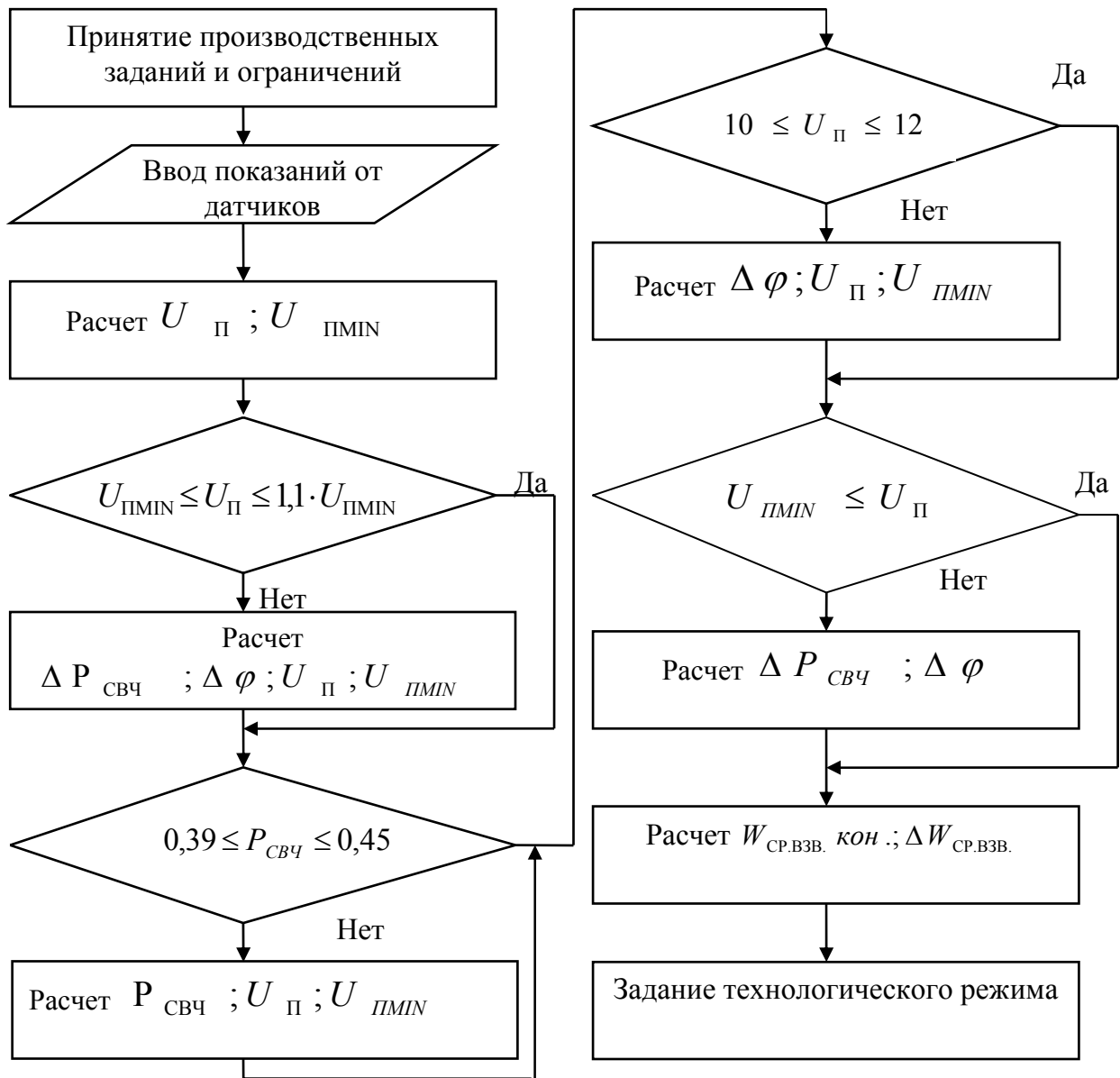


Рисунок 6.3 – Алгоритм управления на этапе сверхвысокочастотной сушки

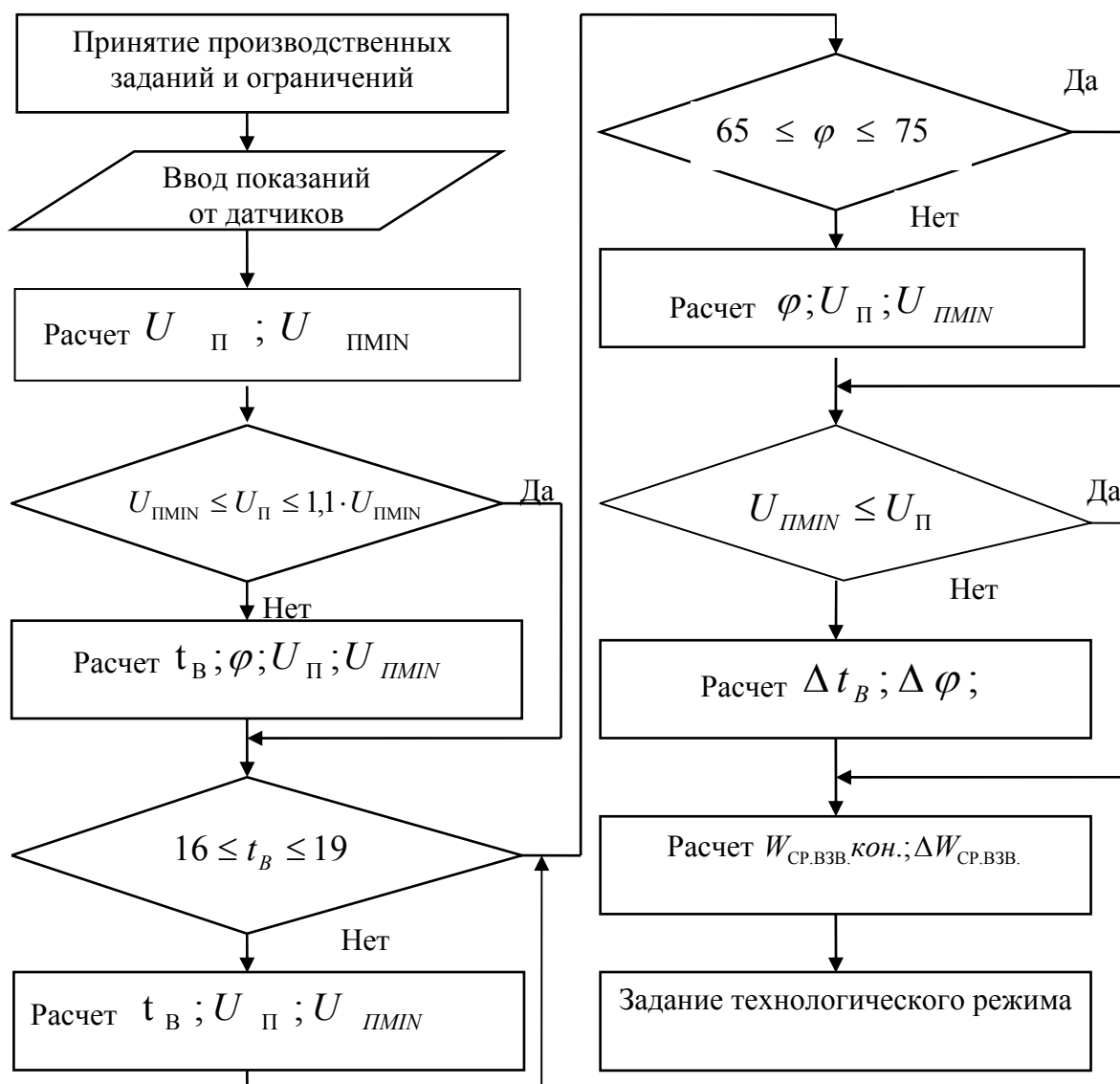


Рисунок 6.4 – Алгоритм управления на этапе охлаждения

Таким образом, управление процессом сушки макаронных изделий носит дискретный характер и осуществляется без учета времени воздействия на продукт, временные изменения улавливаются за счет того, что процесс разделен на этапы. На каждом этапе производится проверка на соответствие оптимальной области значений управляющих параметров. Управление по данному алгоритму производится каждые 5 – 10 мин, что определяется минимальным временем прохождения преобразований в перерабатываемом материале.

Задачу управления процессом сушки макаронных изделий можно рассматривать как задачу поддержания управляющих параметров в оптимальной области. На основании алгоритма управления процессом сушки и

результатов проведенной оптимизации, представленных в главе 5, для управления процессом сушки макаронных изделий предложена следующая структурная схема, показанная на рисунке 6.5. Схема представляет собой адаптивный самонастраивающийся контур управления, предусматривающий поддержание выходных показателей процесса на оптимальном уровне при любых изменениях внешних условий и свойств объекта.

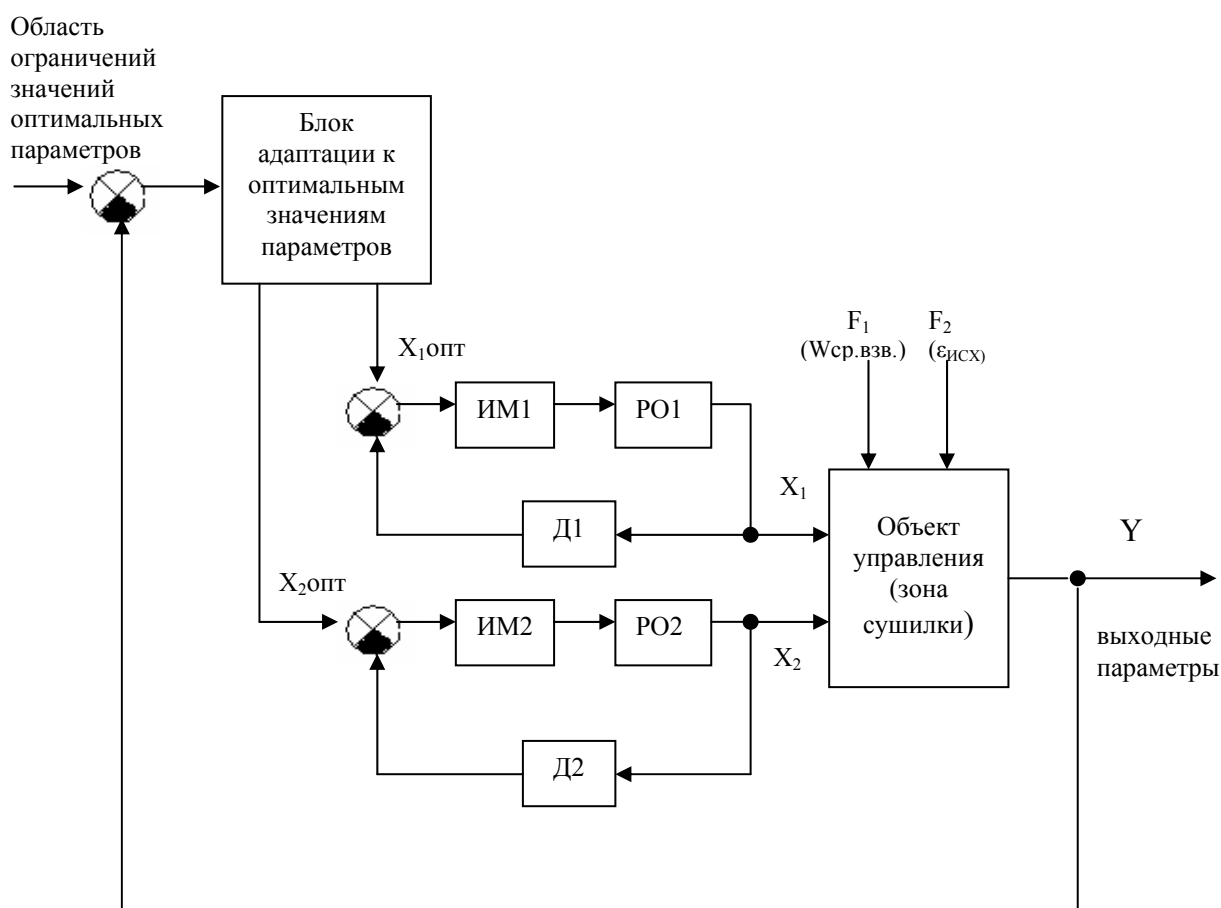


Рисунок 6.5. – Структурная схема управления процессом сушки макаронных изделий

Основными элементами схемы являются: исполнительный механизм 1-го управляющего параметра, различного для каждого этапа сушки (ИМ1), исполнительный механизм 2-го управляющего параметра (ИМ2), регулирующие органы 1-го и 2-го параметров (РО1, РО2), датчики управляющих воздействий для 1-го и 2-го параметров (Д1, Д2), блок адаптации к оптимальным значениям параметров, являющийся системой настройки. Блок адаптации предполагает перевод аналоговых сигналов в цифровой код, вычисление оптимальных значений управляющих воздействий для каждого этапа сушки и перевод их в аналоговый сигнал.

## 6.2 Установка для сушки длинных макаронных изделий подвесным способом

Разработана установка для сушки длинных макаронных изделий подвесным способом по патенту РФ № 2251646 и предложена функциональная схема автоматизации этой установки, представленная на рисунке 6.6. Разработанная установка для сушки представляет из себя герметизированный теплоизолированный тоннель, разделенный перегородками на 4 зоны:

- 1) зона разогрева - представляет из себя инфракрасную сушилку с пропариванием (А);
- 2) зона конвективной сушки (В);
- 3) зона сверхвысокочастотной сушки (С);
- 4) зона охлаждения (D).

Внутри сушилки проходят два параллельно движущихся цепных транспортера I. Между цепями расположены бастуны с высушиваемыми изделиями. Подвод пара, электроэнергии, сушильного воздуха и отвод отработанного воздуха осуществляется известными способами.

В инфракрасном модуле расположены панели инфракрасных излучателей II. Макароны изделия проходят между панелями, облучаясь с обеих сторон. Контроль относительного удлинения при растяжении ( $\varepsilon$ ) производится датчиками 1-1 и 2-1 соответственно в начале и конце зоны. Контроль давления пара осуществляется датчиком 4-1, установленным в верхней части сушилки. Электронные сигналы от датчиков с 1-1 по 4-1 поступают в аналого-цифровой преобразователь АЦП, соединенный с компьютером. Интенсивность инфракрасного излучения регулируется исполнительными механизмами с 5-1 по 10-1 при помощи контролирующе-регулирующих органов с 11-1 по 16-1. Давление пара регулируется управляющим клапаном 17-1 при помощи контролирующего механизма 18-1. Скорость транспортера в этой зоне регулируется исполнительным механизмом 19-1 при помощи контролирующего механизма 20-1.

Во второй зоне установлены датчики массы 1-2 и 2-2 ( $W_{CP.VЗВ}$ ) соответственно в начале и конце сушилки. Датчики относительного удлинения при растяжении 3-2 и 4-2 ( $\varepsilon$ ) в начале и конце зоны, а также датчики температуры сухого и мокрого термометров с 5-2 по 14-2. Все датчики также передают информацию через АЦП в компьютер. Регулирование температуры воздуха осуществляется изменением расхода горячей воды в калориферах III при помощи клапанов 15-2 и контролирующих органов 16-2. Регулирование влажности сушильного воздуха осуществляется изменением расходов воздуха помещения и отработанного воздуха, повторно возвращенного в сушилку. Расход отработанного воздуха регулируется клапаном 17-2 при помощи контролирующего органа 18-2. Регулирование расхода сушильного воздуха осуществляется управляющим клапаном 19-2 при помощи контролирующего механизма 20-2. Регулирование времени пребывания в этой зоне производится исполнительным механизмом 21-2 при помощи контролирующего механизма 22-2.

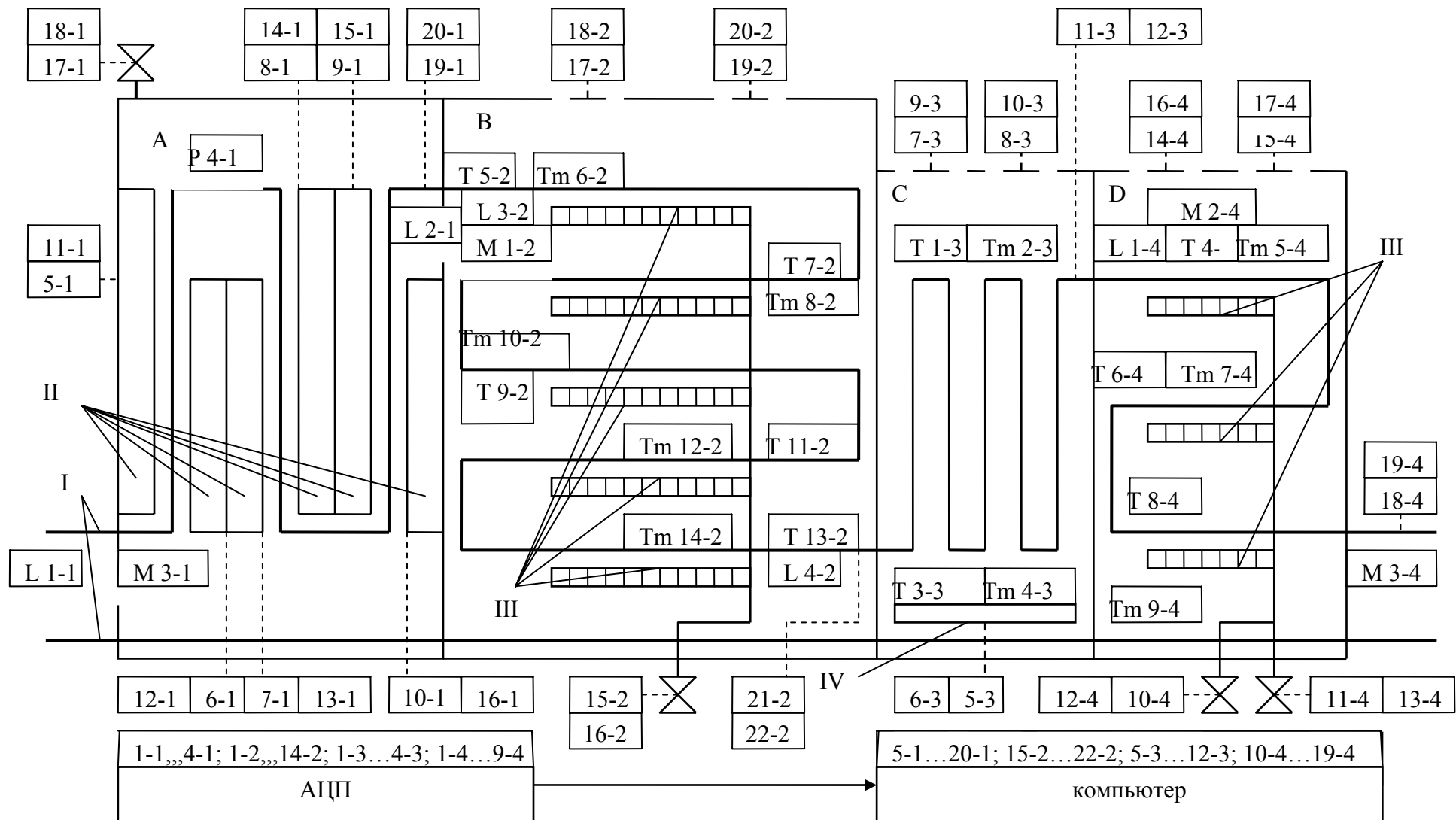


Рисунок 6.6 - Схема автоматизации установки для сушки длинных макаронных изделий подвесным способом

В третьей зоне для измерения температуры используются датчики сухого и мокрого термометров с 1-3 по 4-3. Интенсивность сверхвысокочастотного воздействия ( $P_{СВЧ}$ ) регулируется исполнительным механизмом 5-3 при помощи контролирующего органа 6-3. Регулирование влажности поверхности ( $U_{II}$ ) осуществляется путем изменения расходов отработанного воздуха и воздуха помещения управляющими клапанами 7-3, 8-3 при помощи контролирующе-регулирующих механизмов 9-3, 10-3. Регулирование времени пребывания в зоне осуществляется исполнительным механизмом 11-3 при помощи контролирующего механизма 12-3.

В четвертой зоне установлены датчики относительного удлинения 1-4 и массы 2-4 на входе и датчик массы 3-4 на выходе. Для измерения температуры используются датчики сухого и мокрого термометров с 4-4 по 9-4. Регулирование температуры воздуха осуществляется изменением расхода горячей и холодной воды в калориферах III при помощи клапанов 10-4, 11-4 и контролирующих органов 12-4, 13-4. Регулирование влажности охлаждающего воздуха осуществляется путем изменения расходов отработанного воздуха и воздуха помещения управляющими клапанами 14-4, 15-4 при помощи контролирующих механизмов 16-4, 17-4. Регулирование времени пребывания в этой зоне производится исполнительным механизмом 18-4 при помощи контролирующего механизма 19-4.

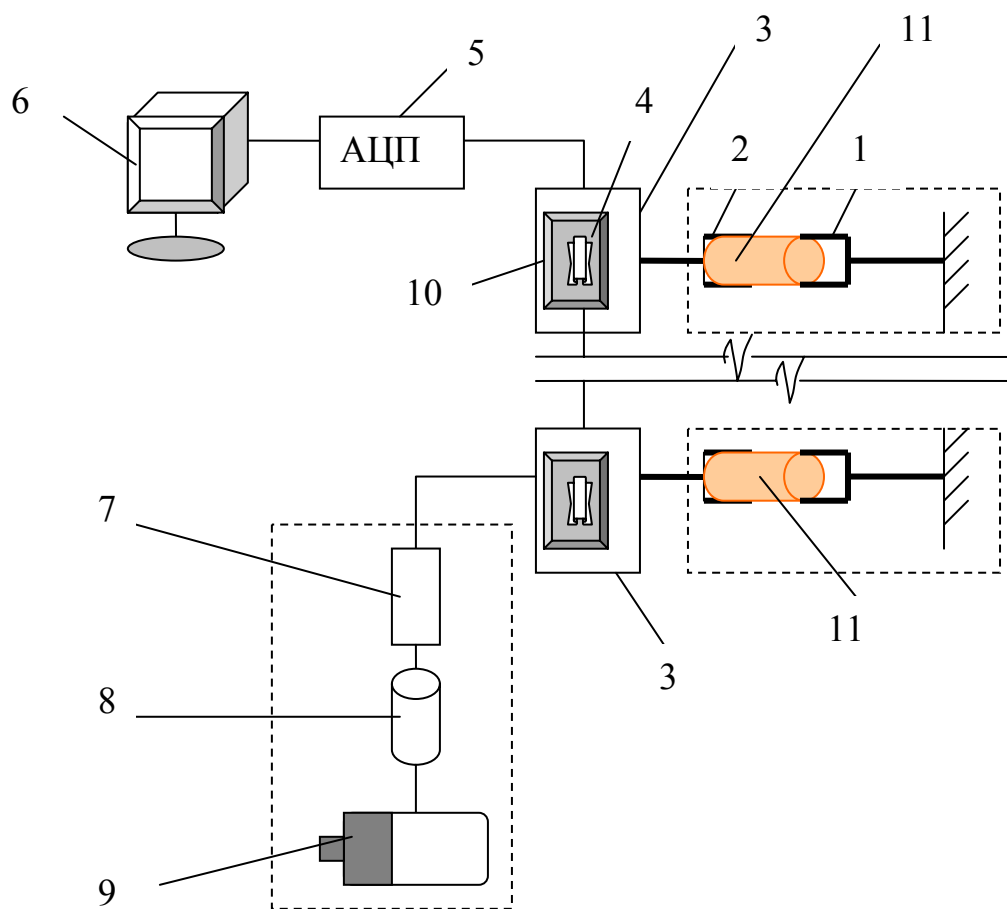
### **6.3 Устройство для испытания пищевых материалов на растяжение**

Для создания современных технологических процессов, позволяющих получить продукт высокого качества, необходимо практически в каждом конкретном случае изучить комплекс реологических свойств, которые характеризуют поведение пищевых масс под действием механических нагрузок со стороны рабочих органов машин. Реологические свойства могут быть использованы в качестве контролируемых параметров при создании автоматизированных систем управления оборудованием, а также при автоматизированном контроле качества продукции. В тех случаях, когда исследуемый материал обладает упруго-вязко-пластичными свойствами, целесообразно определять его структурно-механические свойства при растяжении. Определение реологических характеристик продукта может быть произведено путем установления аналитических зависимостей между изменением реологических свойств продукта и его линейной деформацией при растяжении.

Для более точного получения информации о характере изменения деформации растяжение может быть произведено с помощью устройства для испытания пищевых материалов на растяжение, защищенного патентом РФ № 2293316. Схема устройства представлена на рисунке 6.7.

Устройство работает следующим образом. Испытательный образец одним концом закрепляется в пассивном захвате, другим в активном захвате. В качестве испытательного образца могут использоваться макаронные изделия,

полуфабрикаты вспученных экструдатов и другие коллоидные капиллярно-пористые пищевые материалы.



- 1 - пассивный захват; 2 - активный захват;
- 3 – нагружатель; 4 - тензодатчики;
- 5 - аналого-цифровой преобразователь;
- 6 - компьютер; 7 - редуктор;
- 8 – вариатор; 9 – электродвигатель;
- 10 - металлическая пластина;
- 11 – испытательный образец.

Рисунок 6.7 - Устройство для испытания пищевых материалов на растяжение

Подвод активного захвата в исходное положение осуществляется путем движения нагружателя в обратном направлении. В результате работы электродвигателя нагружатель, с помощью вариатора и редуктора, приводит в движение и сообщает равномерную растягивающую нагрузку активному захвату. Сигнал, получаемый с тензодатчиков, регистрируется на аналого-цифровом преобразователе и передается в компьютер, где преобразуется в численные значения измеряемой величины, которые записываются в виде массива данных и графика зависимости от времени в файл.



Применение нагрузителя, содержащего электродвигатель, вариатор и редуктор, позволяет равномерно сообщать растягивающую нагрузку образцу, при этом устанавливая зависимость не только между удлинением и реологическими свойствами продукта, как это делалось ранее на аналогичных приборах, но и зависимость изменения реологических свойств от времени нагружения, и как следствие, позволяет судить о качестве продукта по времени, за которое произошло определенное изменение образца.

Использование в предлагаемой конструкции тензометрии, компьютерной обработки сигналов, а также зависимости качества продукта от времени нагружения испытательного образца, позволяет применять его для автоматизированного контроля и регулирования технологического процесса.

Знание реологических характеристик пищевых материалов позволяет управлять структурой и качеством готового продукта путем изменения режимов работы и способов механической и технологической обработки.

Диаграммы растяжения макаронных полуфабрикатов представляют собой типичные диаграммы для упруго-вязко-пластичных материалов: наблюдается нелинейная зависимость между напряжением и деформацией, процесс растяжения заканчивается при достижении максимального напряжения.

Такие зависимости получали при растяжении теста из пшеничной муки первого сорта для батонов, тестовых заготовок армянского матнакаша, плоской ленты из макаронного теста. По этим зависимостям определялись прочностные и упругие характеристики продуктов, а затем устанавливалась степень механического воздействия при приготовлении.

## Заключение

Изложенные выше результаты являются попыткой нахождения новых путей улучшения качества макаронной продукции, повышения её конкурентоспособности на современном рынке.

Проектирование предполагает создание прототипа или прообраза предполагаемого объекта. В данной работе авторы создали прототип одной из стадий производства макаронных изделий, делая упор на повышение их качества и уменьшение энергозатрат. Интенсификация процесса сушки макаронных изделий на базе автоматизированных систем позволяет значительно повысить качественные и количественные характеристики производства продукта и наметить новые горизонты исследований данной проблемы.

Сушка является наиболее продолжительной и важной стадией производства, так как именно её температурные режимы оказывают влияние на качество готового продукта. Однако на современных предприятиях зачастую не учитываются качественные изменения в полуфабрикатах в процессе их сушки. Данный вывод сделан на основании обширного обзора применяемого сушильного оборудования и средств контроля процесса. Эффективность данной технологии будет заметно выше, если данные об изменении качества макаронных изделий в процессе их сушки будут использованы для перестройки системы на более рациональный способ подачи энергии к высушиваемому материалу.

Авторы провели анализ математического аппарата, применяемого для описания процесса, и связав его с теорией растрескивания капиллярно-пористых тел, получили математическую модель процесса сушки, которая учитывает результаты определения относительного удлинения при растяжении макаронных изделий для предотвращения их разрушения.

Полученные в работе зависимости реологических параметров высушиваемого материала (коэффициент линейной усадки, коэффициент упругости и общий коэффициент, учитывающий форму единичных изделий, кривизну поверхности слоя, особенности приборов для определения внутренних напряжений в изделиях) от его начального относительного удлинения при растяжении, температуры и влажности, позволят эффективно использовать определение средневзвешенной влажности и относительного удлинения макаронных изделий при растяжении для корректировки степени энергетического воздействия на высушиваемый продукт в зависимости от состава и свойств исходных полуфабрикатов.

В работе разработан комплексный показатель качества физико-химических свойств макаронных изделий, объединяющий существующие в макаронном производстве частные показатели качества с учетом коэффициентов их значимости.

Предложенный (на основе патента РФ № 2240709) способ сушки макаронных изделий обеспечивает получение высококачественного продукта

из клетчатко-крахмалобелкового сырья за счет комплексного энергоподвода, который включает обработку изделий паром, инфракрасными лучами, СВЧ – нагревом.

С помощью разработанного программного средства оптимизированы режимы сушки макаронных изделий. Критерием проведенной оптимизации является качество изделий, его ограничивают удельные затраты энергии на проведение процесса и максимально возможный градиент влажности, определяемый по средневзвешенной влажности и относительному удлинению при растяжении. Соблюдение оптимальных параметров процесса сушки обеспечивает получение экспертной оценки органолептических свойств 430÷450 баллов, максимального показателя физико-химических свойств равного 140 баллам, при общих наименьших удельных затратах на сушку не более 219 Вт/кг.

Предложен алгоритм управления процессом сушки макаронных изделий с учетом измерения изменения их массы и относительного удлинения при растяжении, который позволяет оптимизировать процесс, снижать затраты энергии, повышать качество готовых изделий, а также уменьшать количество некондиционных изделий на 10 %.

На основании предложенного алгоритма разработана установка для сушки длинных макаронных изделий подвесным способом с использованием комплексного энергоподвода (патент РФ № 2251646) и соответствующая функциональная схема автоматизации этой установки.

Предложено устройство для испытания пищевых материалов на растяжение (патент РФ № 2293316), к достоинствам которого относятся использование тензометрии, компьютерной обработки сигналов, а также зависимости качества продукта от времени нагружения испытательного образца.

Таким образом, процесс сушки макаронных изделий полностью автоматизируется. Основные функции, выполняемые подобной системой включают в себя контроль и управление, обмен данными, обработку накопление и хранение информации, формирование сигналов отклонения от нормального функционирования, построение графиков и отчетов. Экономические преимущества использования автоматических систем в производстве вытекают из их технических преимуществ, а именно более экономичное использование труда, материалов и энергии.

Авторы надеются, что настоящая монография, не претендуя на окончательное решение проблемы создания эффективных методов проектирования сушильного оборудования, привлечет внимание специалистов к ресурсосберегающему ведению данного технологического процесса и сократит трудоемкость проектирования нового оборудования для сушки макаронных изделий.

## Список использованных источников

- 1 Автоматика и автоматизация пищевых производств/ под ред. М.М. Благовещенской [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1991. - 239 с.
- 2 Автоматизация процессов пищевых производств / А.М. Гордон [и др.]. – Воронеж, изд-во Воронежского университета, 1996. – 196 с.
- 3 **Александров, А.Г.** Оптимальные и адаптивные системы / А.Г. Александров. – М.: Высшая школа, 1989. - 262 с.
- 4 **Бозренко, И.М.** Адаптация, прогнозирование и выбор решений в алгоритмах управления технологическими объектами / И.М. Борзенко. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 144 с.
- 5 **Болонкин, В.Е.** Анализ и синтез систем автоматического управления на ЭВМ: Алгоритмы и программы / В.Е. Болонкин, П.И. Чинаев – М.: Радио и связь, 1991. – 256 с.
- 6 **Буров, Л.А.** Технологическое оборудование макаронных предприятий. / Л.А. Буров, Г.М. Медведев. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 246 с.
- 7 **Воронин, В.Г.** Автоматизированные системы управления в пищевой промышленности / под ред. Воронина В.Г. – М.: Агропромиздат, 1991. – 143 с.
- 8 **Герасимов, С.Г.** Теоретические основы автоматического регулирования тепловых процессов/ С.Г. Герасимов. – М: Высшая школа, 1967. – 336 с.
- 9 **Гинзбург, А.С.** Основы теории и техники сушки пищевых продуктов/ А.С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.
- 10 **Гинзбург, А.С.** Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности/ А.С. Гинзбург. – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.
- 11 **Гинзбург А.С.** Современные способы расчета и проектирования процесса сушки зерна / А.С. Гинзбург, В.Д. Скверчак. – М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1980. – 75 с.
- 12 **Грачев, Ю.П.** Математические методы планирования эксперимента / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин. – М.: ДеЛи принт, 2005. - 296 с.
- 13 **Егоров, А.И.** Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами / А.И. Егоров. – М.: Наука, 1979. – 464 с.
- 14 **Иберла, К.** Факторный анализ / К. Ирбела. – М.: Статистика, 1980. – 389 с.
- 15 **Ивахенко, А.Г.** Моделирование сложных систем по экспериментальным данным / А.Г. Ивахенко, Ю.П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с.
- 16 **Кини, Р.Л.** Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. - 265 с.
- 17 **Ковальская, Л.П.** Лабораторный практикум по общей технологии пищевых производств / под ред. Ковальской Л.П. – М.: Агропромиздат, 1991. – 336 с.
- 18 **Коробко, В.Ф.** Система автоматизированного проектирования предприятий пищевой промышленности / В.Ф. Коробко, Д.Я. Гигенейшвили. – М.: Агропромиздат, 1987. – 144 с.

- 19 **Корсаков, В.С.** Автоматизация проектирования технологических процессов / В.С. Корсаков, Н.М. Капустина, К.Х. Темпельгоф. – М.: Наука, 1985. – 304 с.
- 20 **Крамарухин, Ю.Е.** Приборы для измерения температуры / Ю.Е. Крамарухин. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
- 21 **Куцакова, В.Е.** Интенсификация тепло и массообмена при сушке пищевых продуктов / В.Е. Куцакова, А.Н. Богатырев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 236 с.
- 22 **Лебедев, П.Д.** Расчет и проектирование сушильных установок / П.Д. Лебедев. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 320 с.
- 23 **Лукьянов, В.В.** Технология макаронного производства / В.В. Лукьянов. – М.: Пищепроиздат, 1959. – 248 с.
- 24 **Лыков, А.В.** Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 470 с.
- 25 **Лыков, А.В.** Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1970. – 296 с.
- 26 **Лыков, А.В.** Теория сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов пищевой промышленности / А.В. Лыков, Л.Я. Ауэрман. – М.: Пищепромиздат, 1970. – 287 с.
- 27 **Малышкина, В.А.** Оптимальное управление технологическим процессом сушки макаронных изделий: дис...канд.. техн. наук. / В.А. Малышкина. – Оренбург: ОГУ, 2006.
- 28 **Манк, В.В.** Аналитическое описание кинетики обезвоживания макаронного теста и механизм процесса // В.В. Манк. - Хранен. и перераб. сельхоз. сырья, 2000, № 5. – С.12-16.
- 29 **Мачихин, Ю.А.** Инженерная реология пищевых материалов / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.
- 30 **Медведев, Г.М.** Технология и оборудование макаронного производства / Г.М. Медведев. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 280 с.
- 31 **Назаров, Н.И.** Технология макаронного производства / Н.И. Назаров. – М.: Пищевая промышленность, 1969. – 400 с.
- 32 Оптимальное управление / М. Атанс [и др.]; под ред. Ю.И. Топчева; пер. с англ. Г.Н. Алексакова. – М.: Машиностроение, 1968. – 763 с.
- 33 Органолептическая оценка качества хлебобулочных изделий. Обзорн. инф. / Пучкова Л.И. [и др.]. – М.: ЦНИИТЭИ Минхлебопродуктов, 1987. – 32 с.
- 34 **Остапенков, А.М.** К решению задачи тепломассопереноса в пищевом продукте, нагретом в поле СВЧ // Электронная обработка материалов, 1979, № 4. – С. 74-78.
- 35 **Патричный, В.А.** Мировые тенденции развития методов и средств измерений: Аналитический обзор / В.А. Патричный. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 72 с.

36 **Пат. 2087104 Россия**, МКИ <sup>6</sup> А 23 С 1/16 Способ сушки макаронных изделий / Тукачев В.Е., Софейков В.Ш ; заявитель и патентообладатель АОЗТ «Конверсия». - №95108425/3 ; заявл. 24.05.95; опубл. 20.08.97, бюл.№2.

37 **Пат. 2101978 Россия**, МКИ <sup>6</sup> А 23 L 1/6, В 65 D 85/22 Способ сушки макаронных изделий / Тукачев В.Е. ; заявитель и патентообладатель АОЗТ «Конверсия». - №961/18742/13 ; заявл. 20.09.96; опубл. 20.1.98, бюл.№2.

38 **Пат. 2117228 Россия**, МПК <sup>6</sup> А 23 L 1/10, В 65 D Способ автоматического управления процессом сушки / Кретов И.Г., Шевцов А.А. Лакомов И.В. ; заявитель и патентообладатель Ворон. гос. технол. акад. - № 96111571/06 ; заявл. 04.06.96; опубл. 10.08.98, бюл.№ 22.

39 **Пат. 6180148 Япония** , МПК <sup>7</sup> А 23 L 1/01 Metod for cooking fresh noodles in a microwave oven / Jajima Mizio ; Asama Chemical Co., ltd. - № 08/863715 ; заявл. 27.05.97; опубл. 30.01.2001, НПК 426/392.

40 **Пат. 6217918 США**, МПК <sup>7</sup> А 23 L 1/162 Microvable pasta in a bowl / Tecedor Silverio Luiz, Schryr Richard F., Meyers Edward J., Beall Neslon J., Gaeta Stephen A. ; Meiners M. Debbie. - № 09/215012 ; заявл. 17.12.98; опубл. 17.04.2001, НПК 426/89.

41 **Пат. 2240709** Российская Федерация, МПК <sup>7</sup> А 23 L 1/16. Способ сушки макаронных изделий / Попов В.П., Малышкина В.А., Ханин В.П., Пищухин А.М. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ОГУ. – № 2003100282 ; заявл. 04.01.2003; опубл. 27.11.2004, Бюл. № 33. – 6 с.

42 **Пат. 2251646** Российская Федерация, МПК <sup>7</sup> F 26 В 9/06. Установка для сушки длинных изделий подвесным способом / Попов В.П., Малышкина В.А., Ханин В.П., Пищухин А.М., Коротков В.Г ; заявитель и патентообладатель ГОУ ОГУ. – № 2003122554 ; заявл. 18.07.2003; опубл. 10.05.2005, Бюл. № 13. – 5 с.: ил.

43 **Пат. 2293316** Российская Федерация, МПК G 01 N 33/02. Устройство для испытания пищевых материалов на растяжение / Попов В.П., Малышкина В.А., Ханин В.П., Пищухин А.М., Шрейдер М.Ю. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ОГУ. – № 2004130991 ; заявл. 21.10.2004; опубл. 10.02.2007, Бюл. № 4. – 3 с.: ил.

44 **Полищук, В.Ю.** Системный синтез технологических объектов АПК / В.Ю. Полищук, Л.П. Карташов. – Екатеринбург: УроРАН, 1998. – 183 с.

45 Прикладные задачи оптимального управления: модели, методы, алгоритмы: сб. тр. – М. ИЦП, 1990. – 73 с.

46 **Попов, В.П.** Изменение реологических свойств макаронных изделий как фактор, влияющий на прохождение процесса их сушки / В.П. Попов, В.А. Малышкина, В.П. Ханин // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2005. – № 5. – С. 149 – 152.

47 **Пустыльник, Е.Н.** Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.Н. Пустыльник. – М.: Наука, 1968. – 288 с.

48 **Пучкова, Л.И.** Лабораторный практикум по технологии хлебопекарного производства / Л. И. Пучкова. – 3-е изд. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 232 с.

- 49 **Сажин, Б.С.** Основы техники сушки / Б. С. Сажин. - М.: Химия, 1994. – 320 с.: ил.
- 50 **Самарский, А.А.** Математическое регулирование и вычислительный эксперимент // Вестн. АН СССР, 1979, №5. - С.38-49.
- 51 **Себер, Дж.** Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер. – М.: Мир, 1980. – 45 с.
- 52 **Соколов, В.А.** Автоматизация технологических процессов пищевой промышленности / В.А. Соколов. – М.: Агропромиздат, 1991. – 445 с.
- 53 Способ производства термообработанных макаронных изделий: заявка № 98122905/3 Россия, МПК<sup>7</sup> А 23 L 1/16 / Г.М. Медведев [и др.]. – № 698122905/13 ; заявл.21.12.98 ; опубл. 20.10.00., бюл. №3.
- 54 Структурные методы обработки эмпирических данных / Э.М. Браверманн [ и др.]. – М.: Наука, 1983. – 464 с.
- 55 Технологическое оборудование хлебопекарных и макаронных предприятий/ С.А. Мачихин [и др.]. – М.: Агропомиздат, 1986. – 263 с.
- 56 **Уайлд, Д.** Оптимальное проектирование / Д. Уайлд. - М.: Мир, 1981. – 228 с.
- 57 **Уинксов, Е.П.** Инженерная теория пластичности / Е.П. Уинксов. – М: Машгиз, 1989. – 326 с.
- 58 **Федоренко, Р.П.** Приближенное решение задач оптимизационного управления / Р.П. Федоренко. – М.: Наука, 1978. – 486 с.
- 59 **Фейденгольд, В.Б.** Лабораторное оборудование для контроля качества зерна и продуктов его переработки / В.Б. Фейденгольд, С.Л. Маевская. – М.: Издательство «ЗООМедВет», 2001. – 240 с.: 251 ил.
- 60 **Фельдбаум, А.А.** Основы теории оптимальных систем / А.А. Фельдбаум. – М.: Наука, 1970. – 572 с.
- 61 **Чернов, М.Е.** Справочник по макаронному производству. / М.Е. Чернов, Г.М. Медведев, В.П. Негруб. – М.: Пищевая промышленность, 1984. – 304 с.
- 62 **Чернов, М.Е.** Техника и технология макаронного производства фирмы «Паван Мапимпьянти СпА»: обзорная информация / М.Е. Чернов. – Изд-во ЦНИИТЭИПИЩЕПРОМ», 1992. – 32 с.
- 63 **Чернов, М.Е.** Оборудование предприятий макаронной промышленности / М.Е. Чернов. – М.: Агропромиздат, 1988. – 263 с.
- 64 **Чернов, М.Е.** Анализ макаронного производства и возможные направления его совершенствования // Хлебопечение России, 1998, №2.–С.20-21.
- 65 **Шишкин, М.Ф.** Основы метрологии, стандартизации и контроля качества / М.Ф. Шишкин. – М.: Изд-во стандартов, 1988. -218 с.

## Приложение А (обязательное)

### Определение зависимости коэффициентов $\alpha$ , $K_I$ и $K$ от выходного значения относительного удлинения при растяжении полуфабрикатов

Для определения коэффициентов  $\alpha$ ,  $K_I$  и  $K$  изготавливались полуфабрикаты макаронных изделий путем прессования различных видов сырья на лабораторном пресс-экструдере ПЭШ-30/40.

Полуфабрикаты подвергались гигротермической обработке, затем высушивались конвективным способом. Для каждого вида сырья определяли исходное относительное удлинение при растяжении (влажность полуфабрикатов 28 %). Коэффициенты определялись для конвективного этапа сушки, т.к. он наиболее продолжительный.

Коэффициент  $\alpha$  определяли для каждого вида сырья по формулам (3.3 и 3.4). При этом  $l$ ,  $l_0$ ,  $W_1$ ,  $W_2$  измеряли в процессе высушивания.

Коэффициент  $K_I$  определяли преобразованием формулы (3.18)

$$K_I = \frac{E}{E_{сдв} \cdot (1 + \mu)},$$

где коэффициент Пуассона принимали для макаронного теста  $\mu = 0,5$ , а  $E$  и  $E_{сдв}$  определяли на приборе ПМ.

Коэффициент  $K$  определяли преобразованием выражения (3.23) для первого этапа, а именно

$$K = \frac{|\nabla U|_{II} \cdot \alpha \cdot E_{сдв} \cdot (1 + \mu) \cdot R}{3 \cdot (1 + \alpha \cdot U_{II}) \cdot (\dot{\varepsilon} \cdot \eta + \sigma_T) \cdot \left(1 - e^{-\frac{E \cdot \varepsilon}{\eta_T \cdot \dot{\varepsilon}}}\right)},$$

где  $|\nabla U|_{II}$  - рассчитывается из выражения (3.34);

$U_{II}$  - по выражению (3.42);

$\varphi$ ,  $t_B$ ,  $W_{ср.ВЗВ}$ ,  $R$  - определялись путем непосредственных измерений.

Остальные данные рассчитывались по приведенным в монографии методикам.

Результаты расчета коэффициентов  $\alpha$ ,  $K_I$  и  $K$  для полуфабрикатов из различных видов сырья сведены в таблицу А.1.



Таблица А.1 - Значения коэффициентов  $\alpha$ ,  $K_I$  и  $K$  для полуфабрикатов из различных видов сырья

Вид сырья применяемого для изготовления полуфабрикатов	$\varepsilon_{исх}$ , %	$\alpha$	$K_I$	$K$
Макаронная мука высшего сорта из твердой пшеницы	111	0,01131	1,10	0,71
Макаронная мука первого сорта из твердой пшеницы	109	0,0122	1,15	0,75
Макаронная мука высшего сорта из мягкой пшеницы	113	0,0131	1,05	0,80
Макаронная мука первого сорта из мягкой пшеницы	111	0,0131	1,10	0,71
Хлебопекарная мука высшего сорта	105	0,0082	1,25	0,85
Хлебопекарная мука первого сорта	107	0,0108	1,21	0,80
Хлебопекарная мука второго сорта	103	0,0043	1,30	0,93
Пшеничный крахмал	105	0,0127	1,01	0,65

По результатам расчетов были построены полиномиальные зависимости коэффициентов  $\alpha$ ,  $K_I$  и  $K$  от относительного удлинения при растяжении, которые описываются уравнениями

$$\alpha = -0,0001 \cdot \varepsilon^2 + 0,0238 \cdot \varepsilon - 1,3226$$

при величине достоверности аппроксимации 0,9955;

$$K_I = 0,0002 \cdot \varepsilon^2 - 0,0671 \cdot \varepsilon + 6,1337$$

при величине достоверности аппроксимации 0,9992;

$$K = 0,0011 \cdot \varepsilon^2 - 0,2579 \cdot \varepsilon + 16,057$$

при величине достоверности аппроксимации 0,9982.

## Приложение Б (рекомендуемое)

### Графоаналитические зависимости органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от исходных факторов (управляющих воздействий и возмущений) для каждого этапа сушки

Сначала рассматривали первый этап – инфракрасную сушку с пропариванием. При этом постепенно увеличивали интенсивность подвода энергии инфракрасного излучения и пара в пределах от 3 до 7 кВт/ (кг · ч) и фиксировали изменение относительного удлинения при растяжении полуфабрикатов и отношение количества энергий, подводимых с инфракрасным излучением и паром. Результаты представлены на рисунках Б.1 – Б.3.

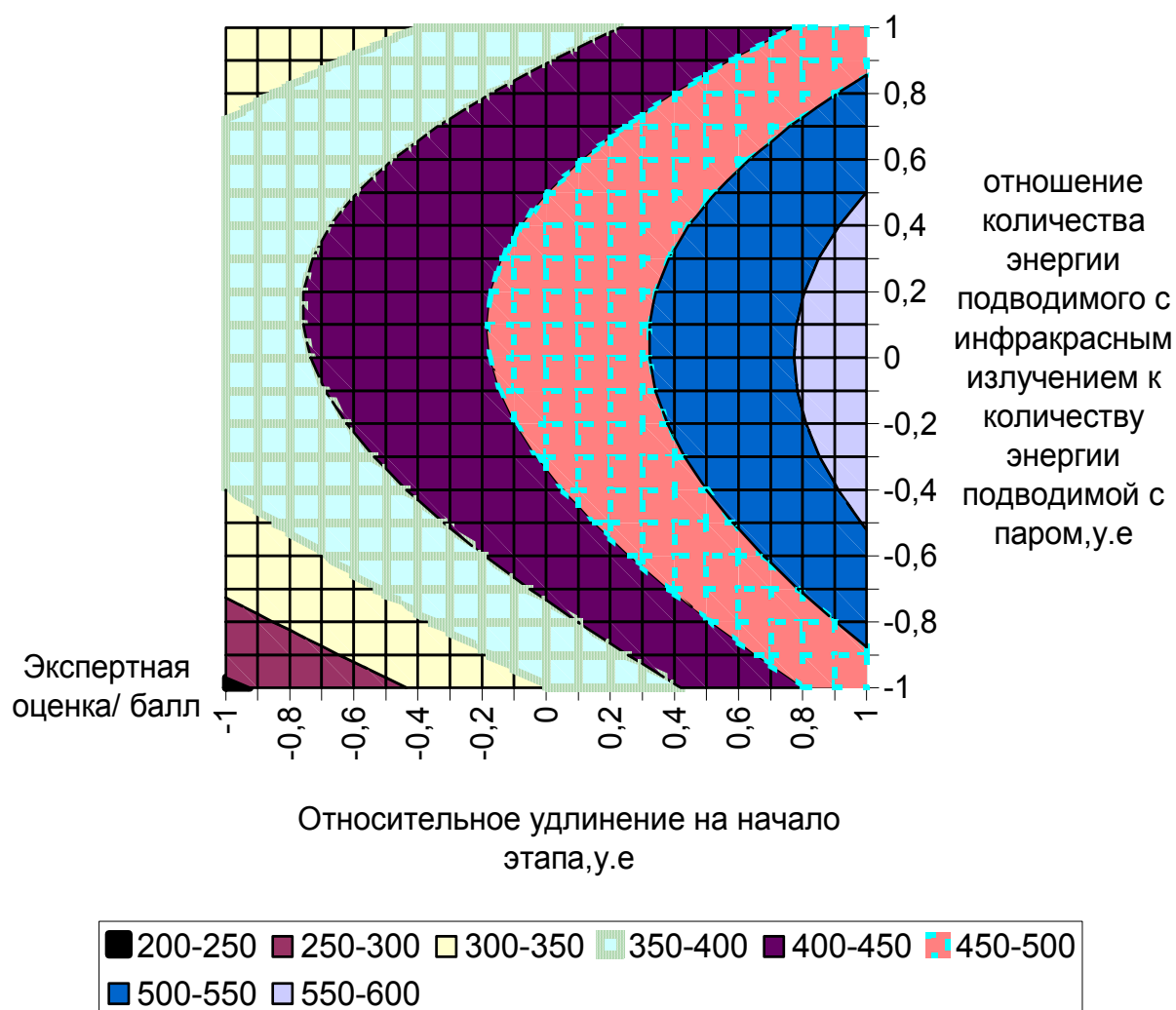


Рисунок Б.1 - Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и отношения количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара при интенсивности подвода энергии 3 кВт/ (кг · ч)

На рисунках Б.1 – Б.11 относительное удлинение на начало этапа и отношение количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара даны в условных единицах.

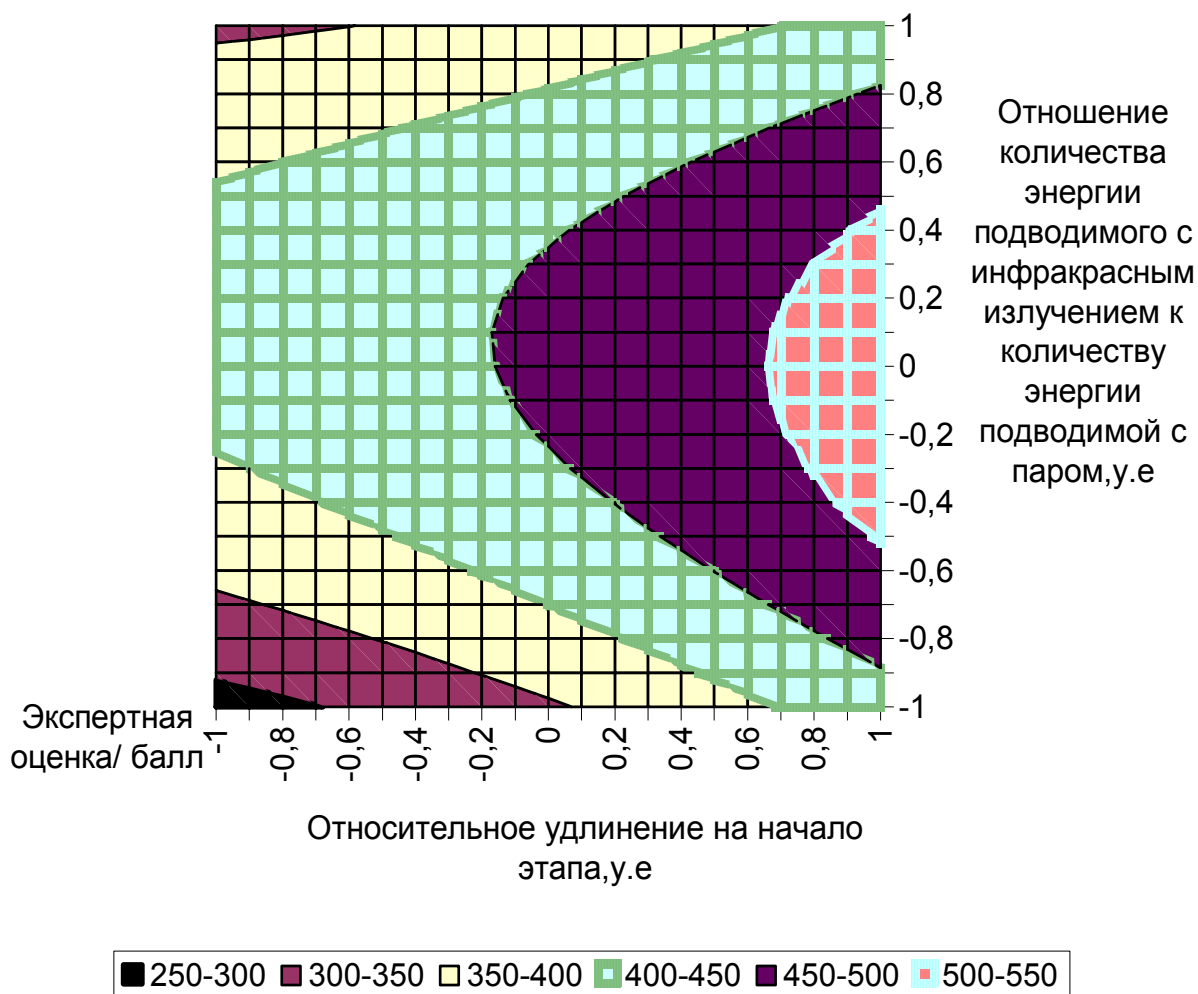


Рисунок Б.2 - Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и отношения количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара при интенсивности подвода энергии 5 кВт/(кг · ч)

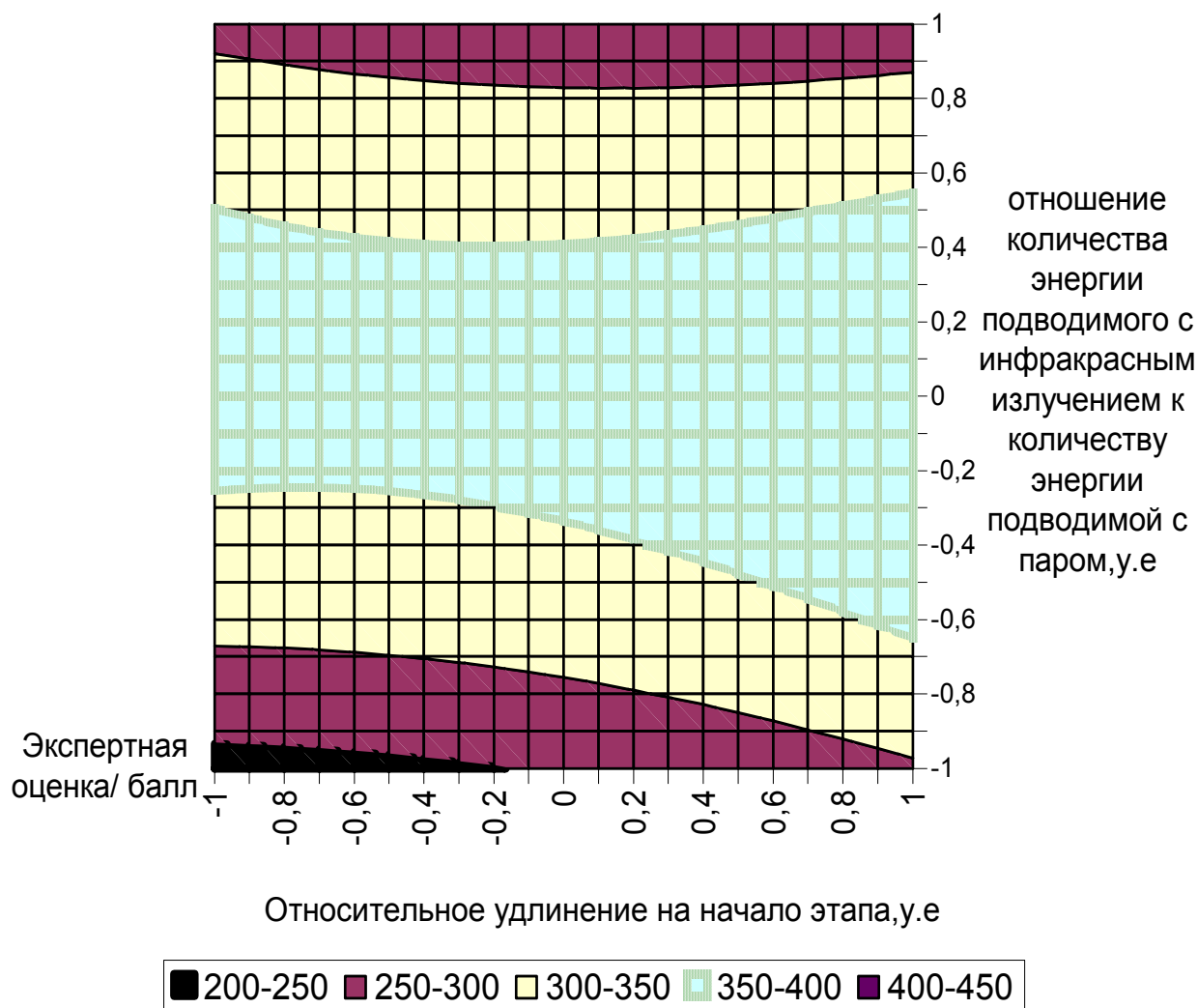


Рисунок Б.3 - Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и отношения количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара при интенсивности подвода энергии 7 кВт/(кг · ч)

Затем рассматривали второй этап сушки – конвективный. Постепенно увеличивая относительную влажность сушильного воздуха от 65 до 95 %, фиксировали относительное удлинение при растяжении полуфабрикатов в начале этапа и изменение температуры сушильного воздуха. Результаты представлены на рисунках Б.4 – Б.6.

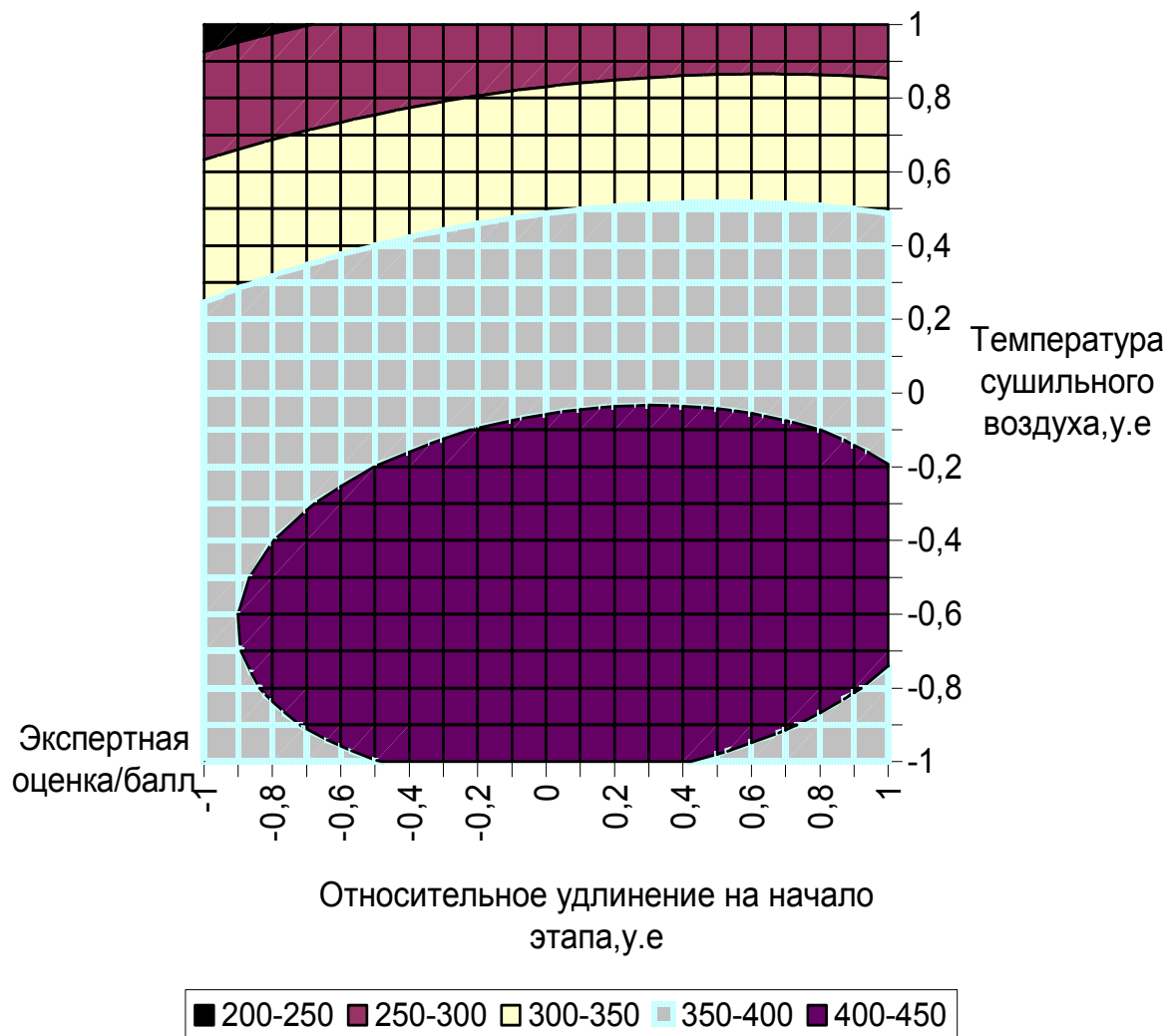


Рисунок Б.4 - Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и температуры сушильного воздуха при его относительной влажности 65 %

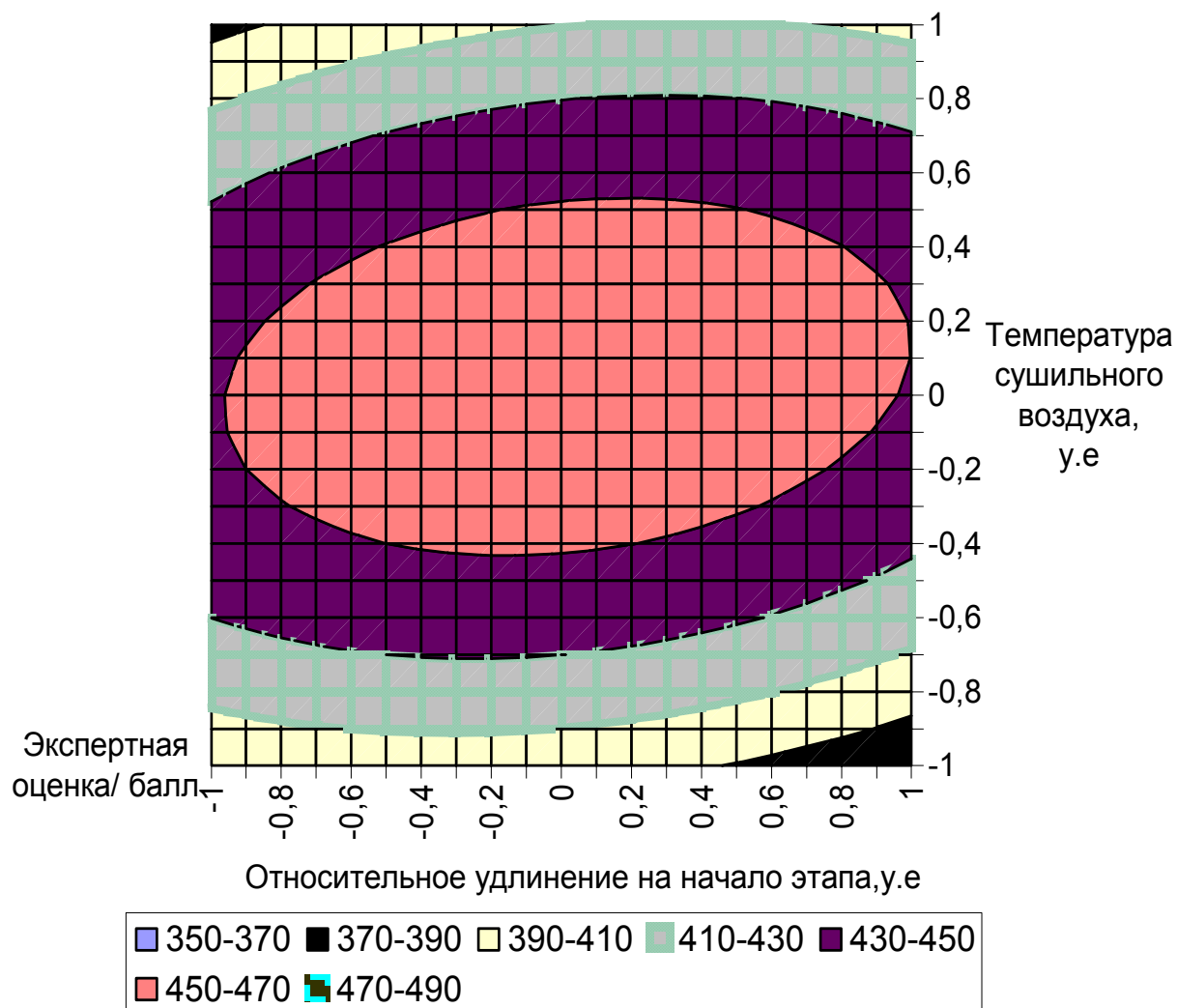


Рисунок Б.5 - Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и температуры сушильного воздуха при его относительной влажности 80 %

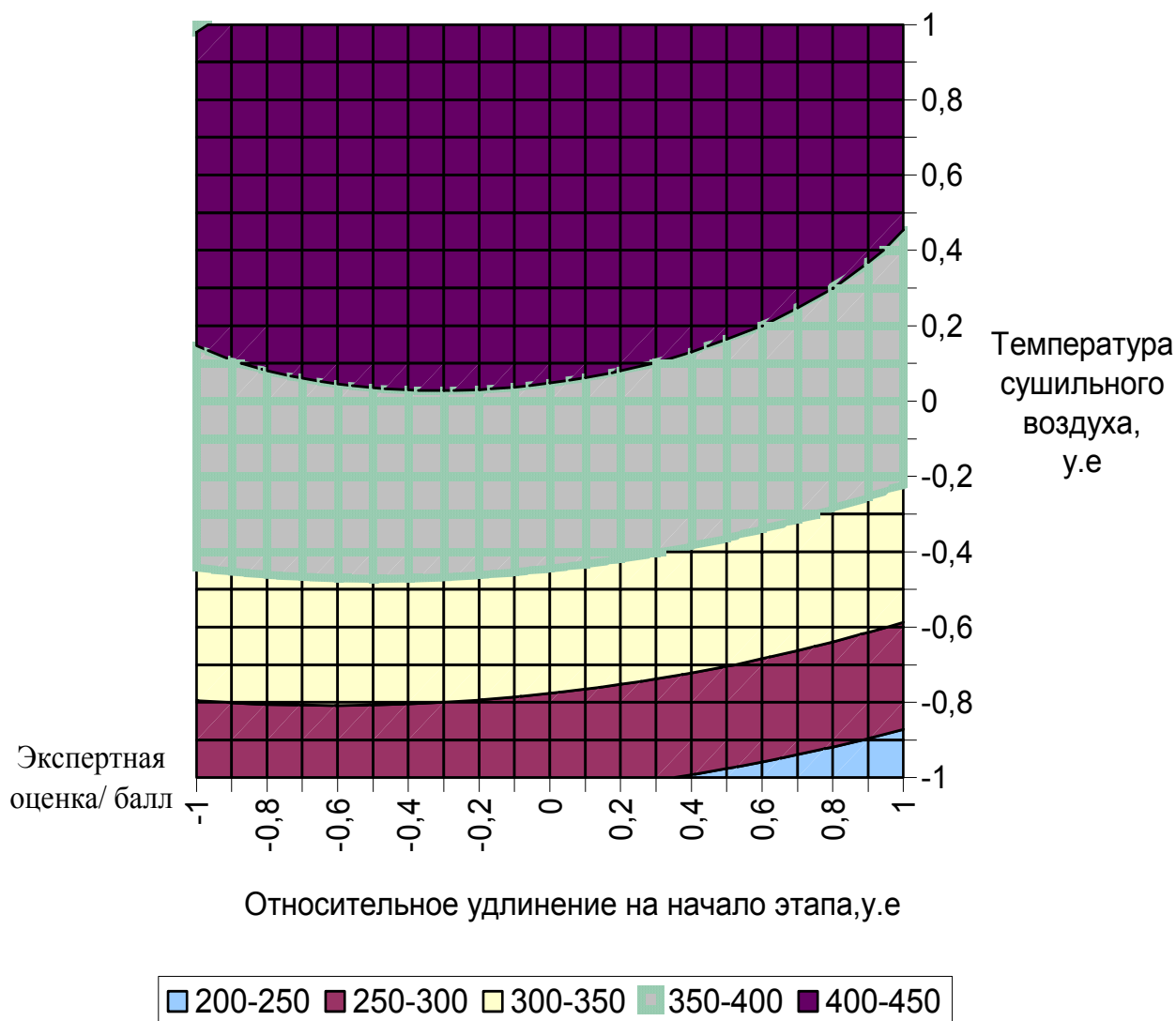


Рисунок Б.6 - Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и температуры сушильного воздуха при его относительной влажности 95 %

Затем рассматривали третий этап – сверхвысокочастотной сушки. Постепенно увеличивая поверхностную влажность изделий от 8 до 14 %, фиксировали относительное удлинение при растяжении полуфабрикатов в начале этапа и изменение интенсивности СВЧ – воздействия. Результаты представлены на рисунках Б.7 – Б.9.

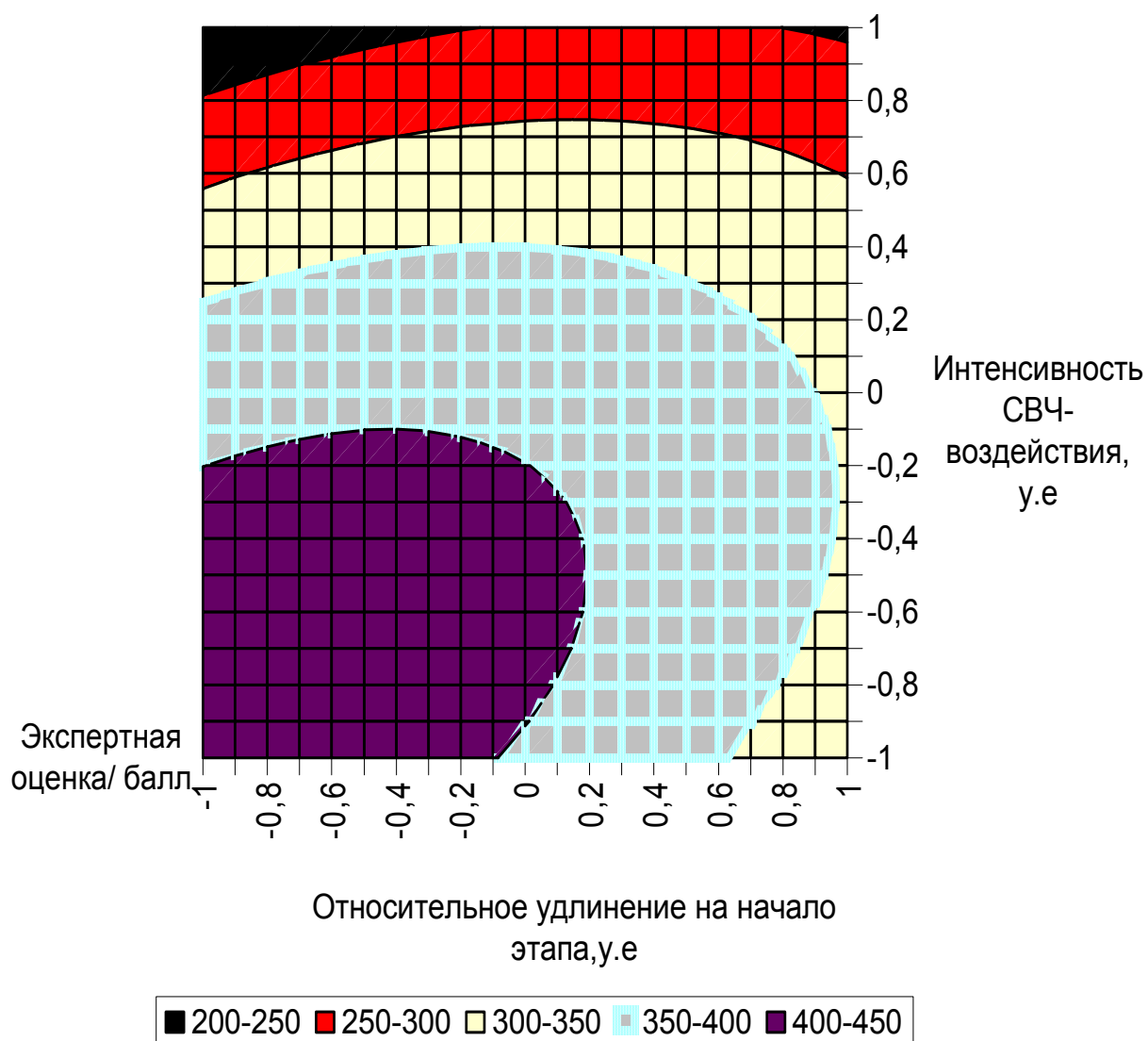


Рисунок Б.7 – Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и интенсивности СВЧ – воздействия при влажности поверхности 8 %



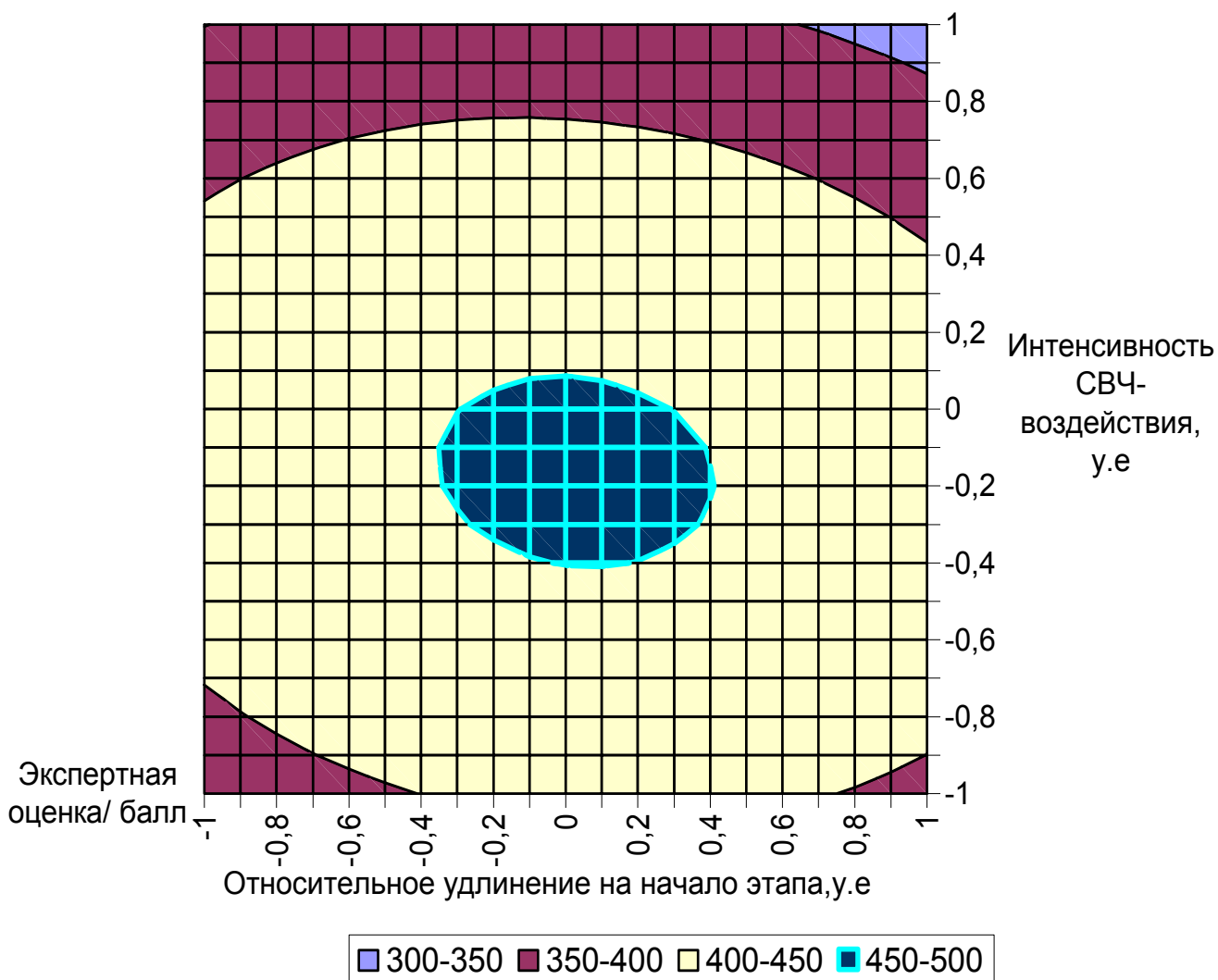


Рисунок Б.8 – Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и интенсивности СВЧ – воздействия при влажности поверхности 11 %

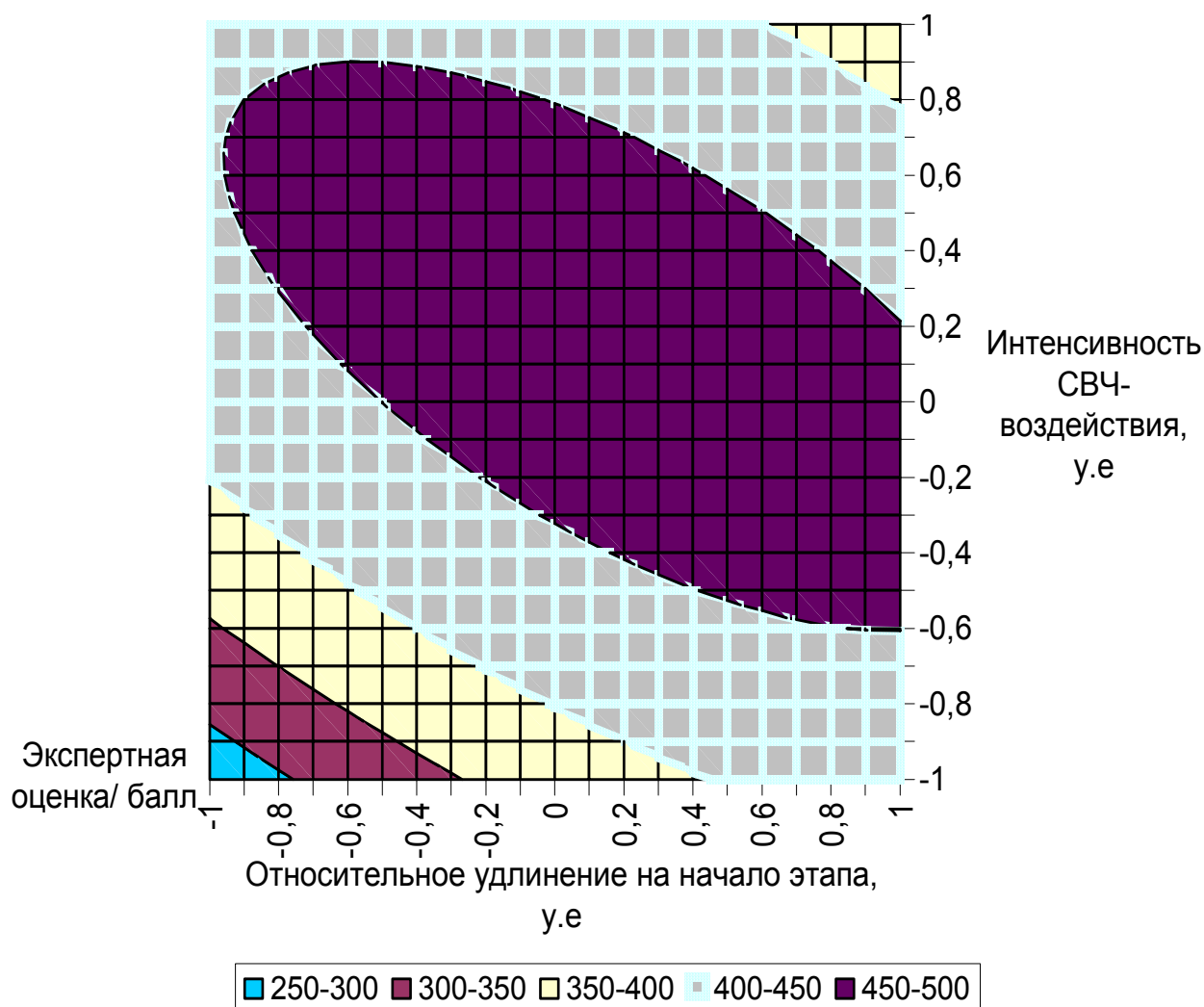


Рисунок Б.9 – Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и интенсивности СВЧ – воздействия при влажности поверхности 14 %

Затем рассматривали последний этап – охлаждение. Постепенно увеличивая относительную влажность охлаждающего воздуха от 45 до 95 %, фиксировали относительное удлинение при растяжении полуфабрикатов в начале этапа и изменение температуры охлаждающего воздуха. Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 45 % на рисунке Б.10.

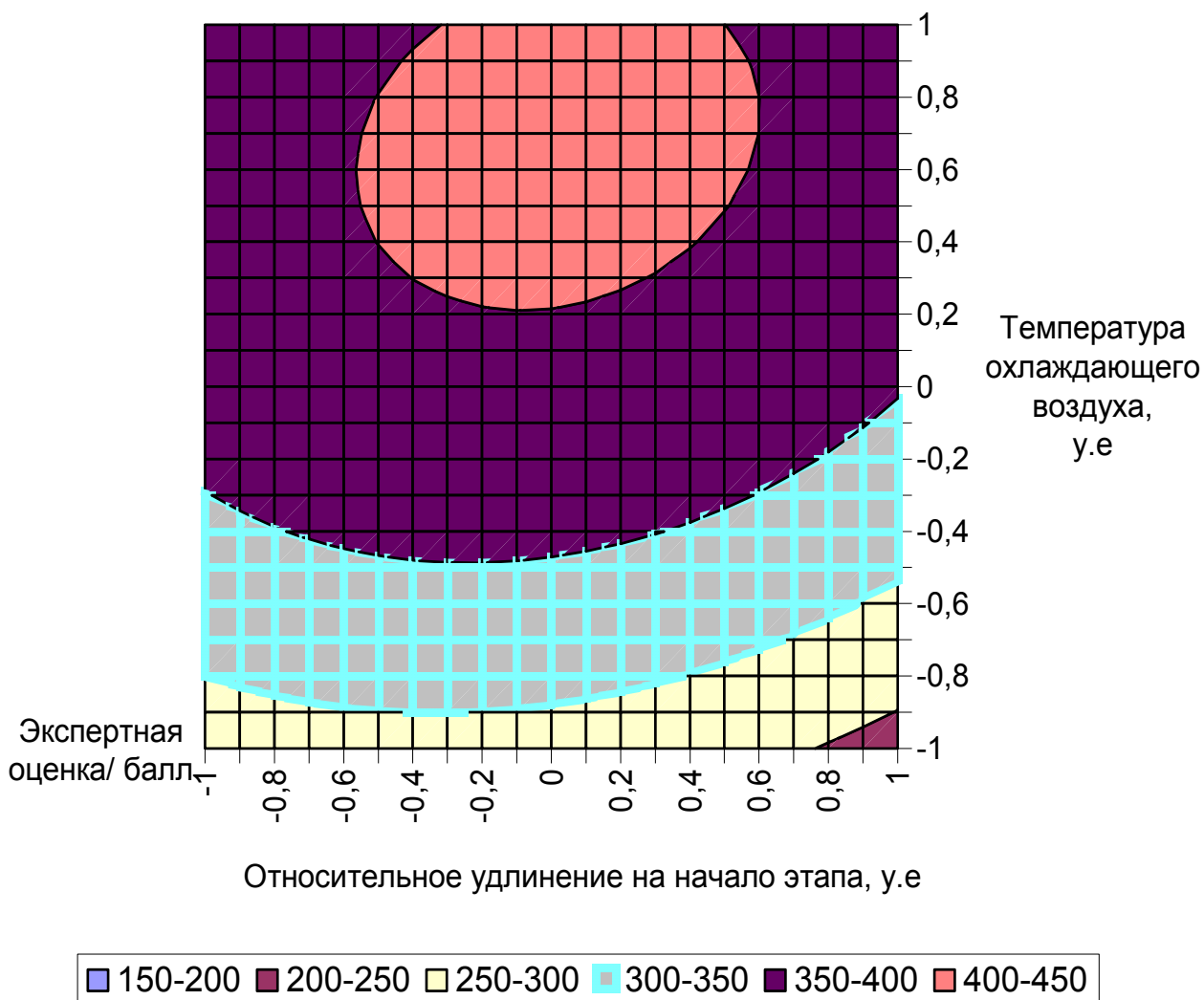


Рисунок Б.10 – Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 45 %

Наилучшие результаты получены при относительной влажности воздуха 70 %. Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 70 % представлена в главе 5. Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 95 % на рисунке Б.11.

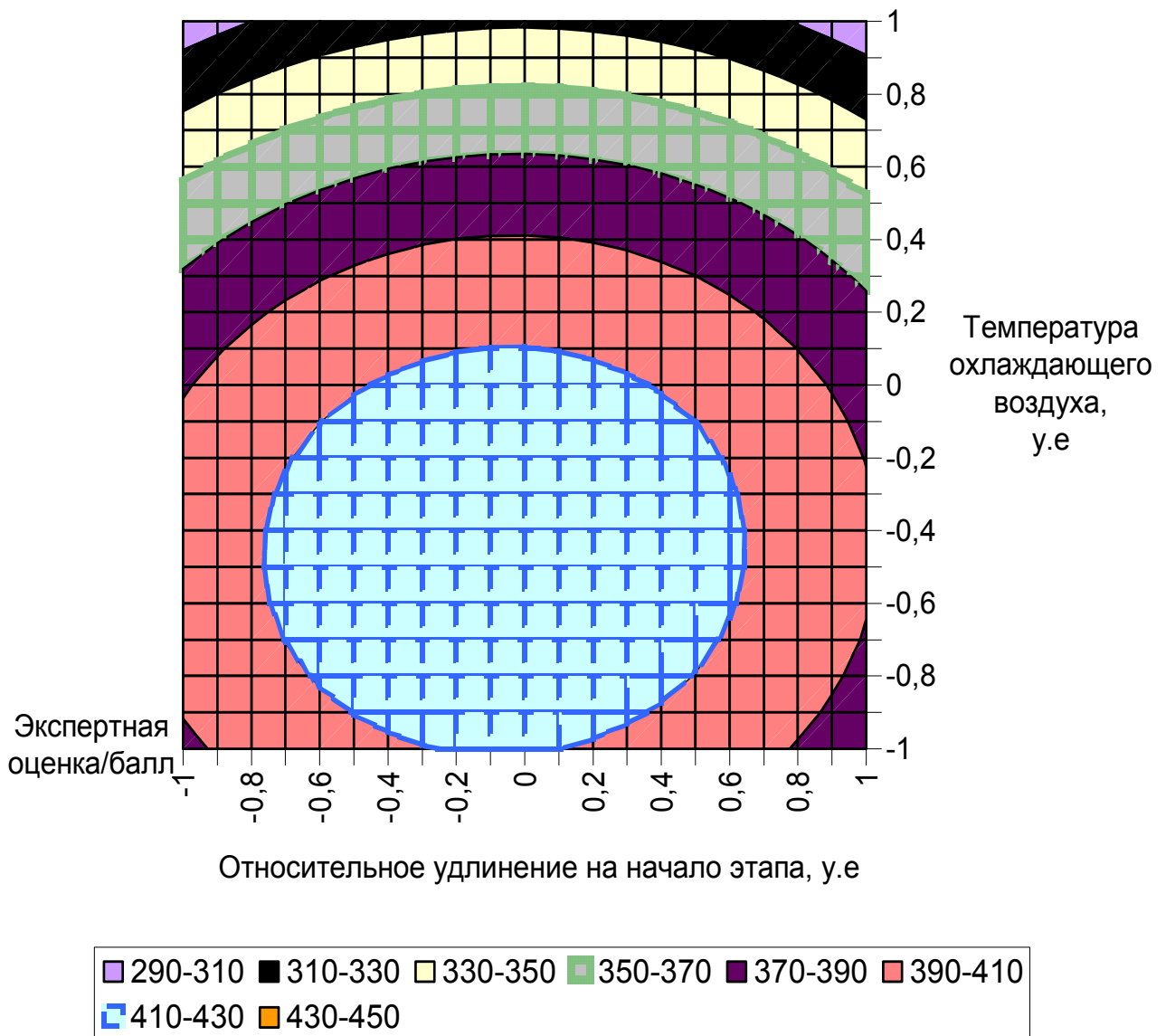


Рисунок Б.11 – Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 95 %

## Приложение В (рекомендуемое)

### Графоаналитические зависимости комплексного показателя качества от исходных факторов (управляющих воздействий и возмущений) для каждого этапа сушки

Сначала рассматривали первый этап – инфракрасную сушку с пропариванием. При этом постепенно увеличивали интенсивность подвода энергии инфракрасного излучения и пара в пределах от 3 до 7 кВт/(кг · ч) и фиксировали изменение относительного удлинения при растяжении полуфабрикатов и отношение количества энергий, подводимых с инфракрасным излучением и паром. Результаты представлены на рисунках В.1 – В.11.

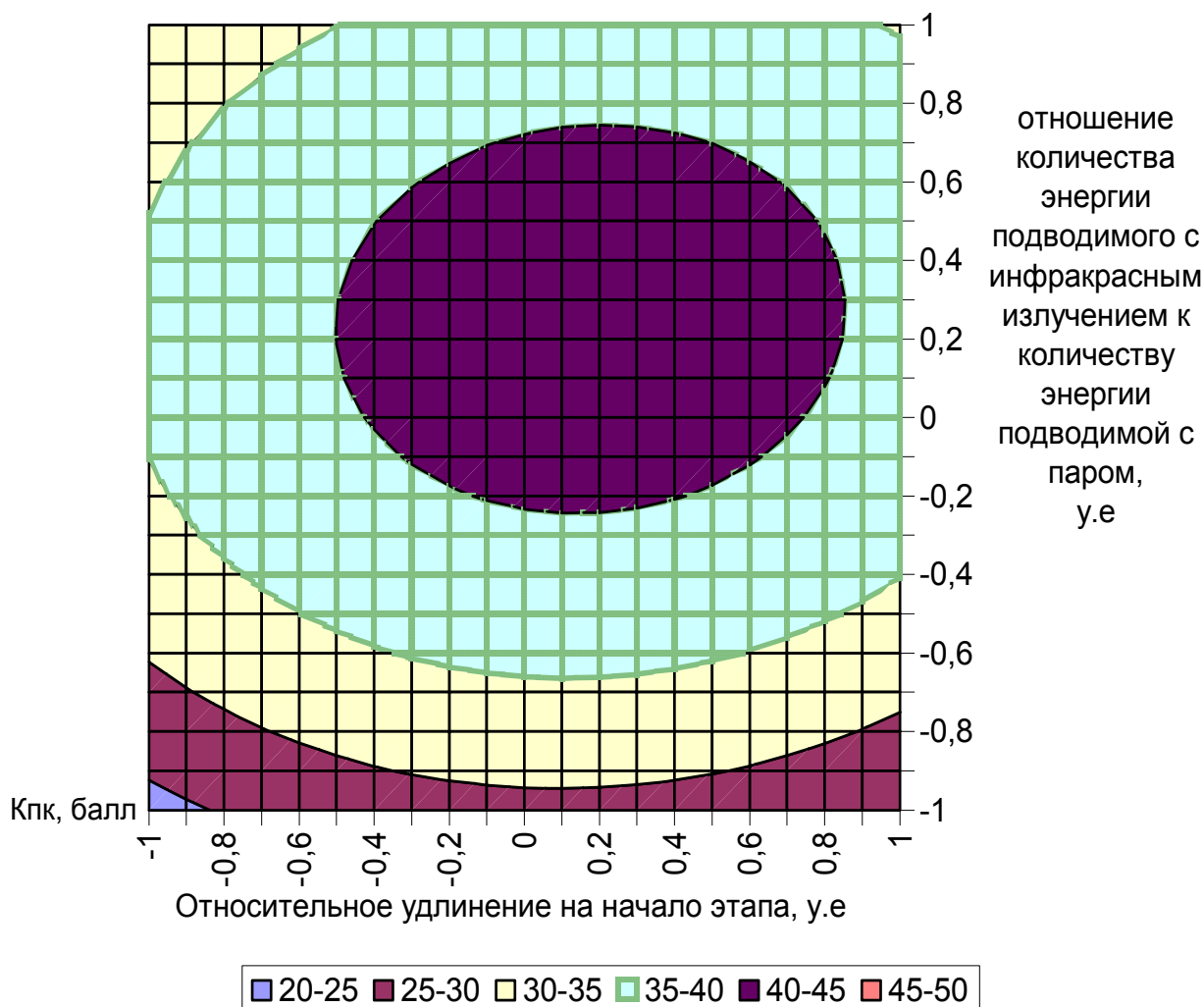


Рисунок В.1 – Зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и отношения количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара при интенсивности подвода энергии 3 кВт/(кг · ч)

На рисунках В.1 – В.11 относительное удлинение на начало этапа и отношение количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара даны в условных единицах.

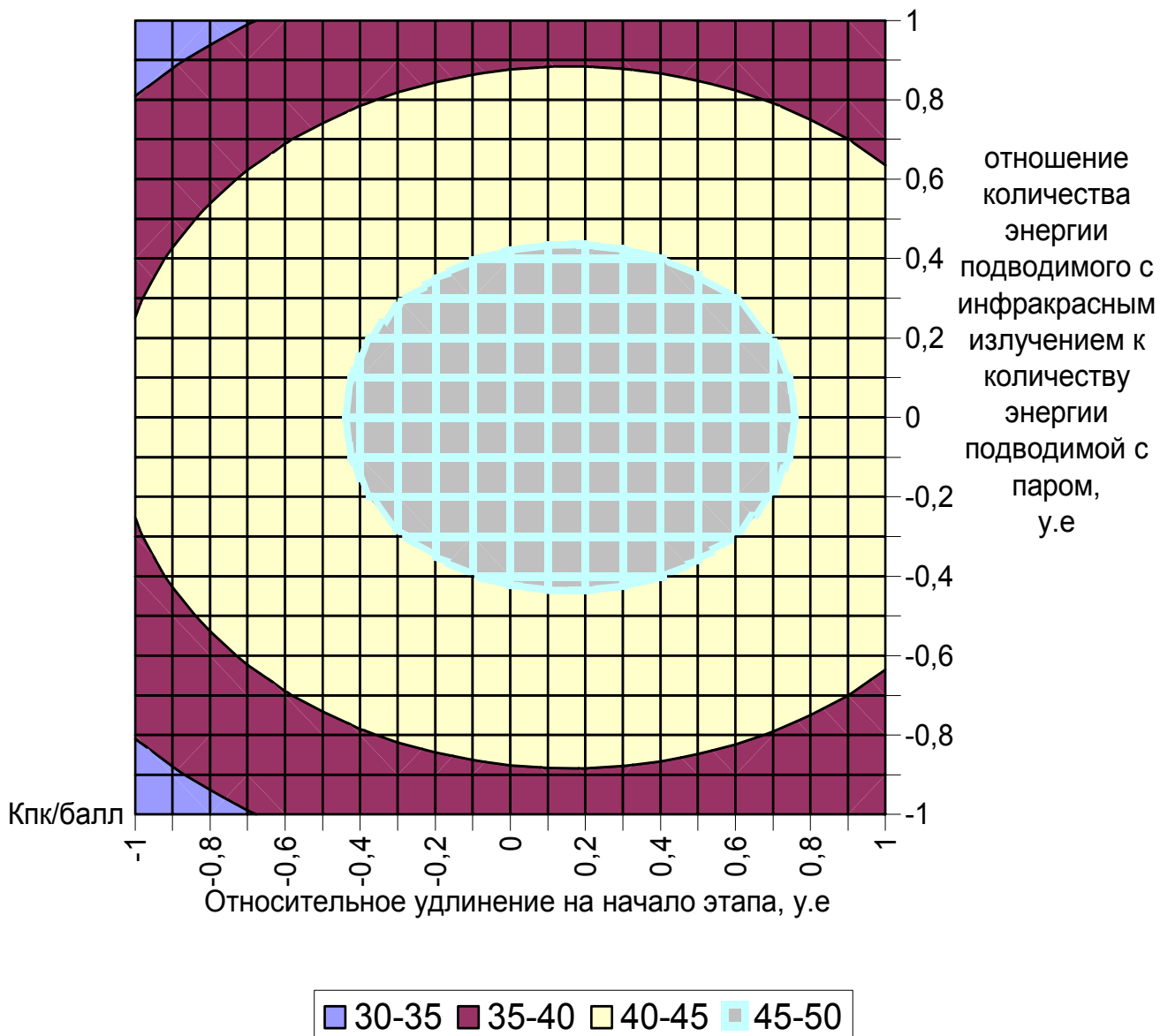


Рисунок В.2 – Зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и отношения количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара при интенсивности подвода энергии 5 кВт/(кг · ч)

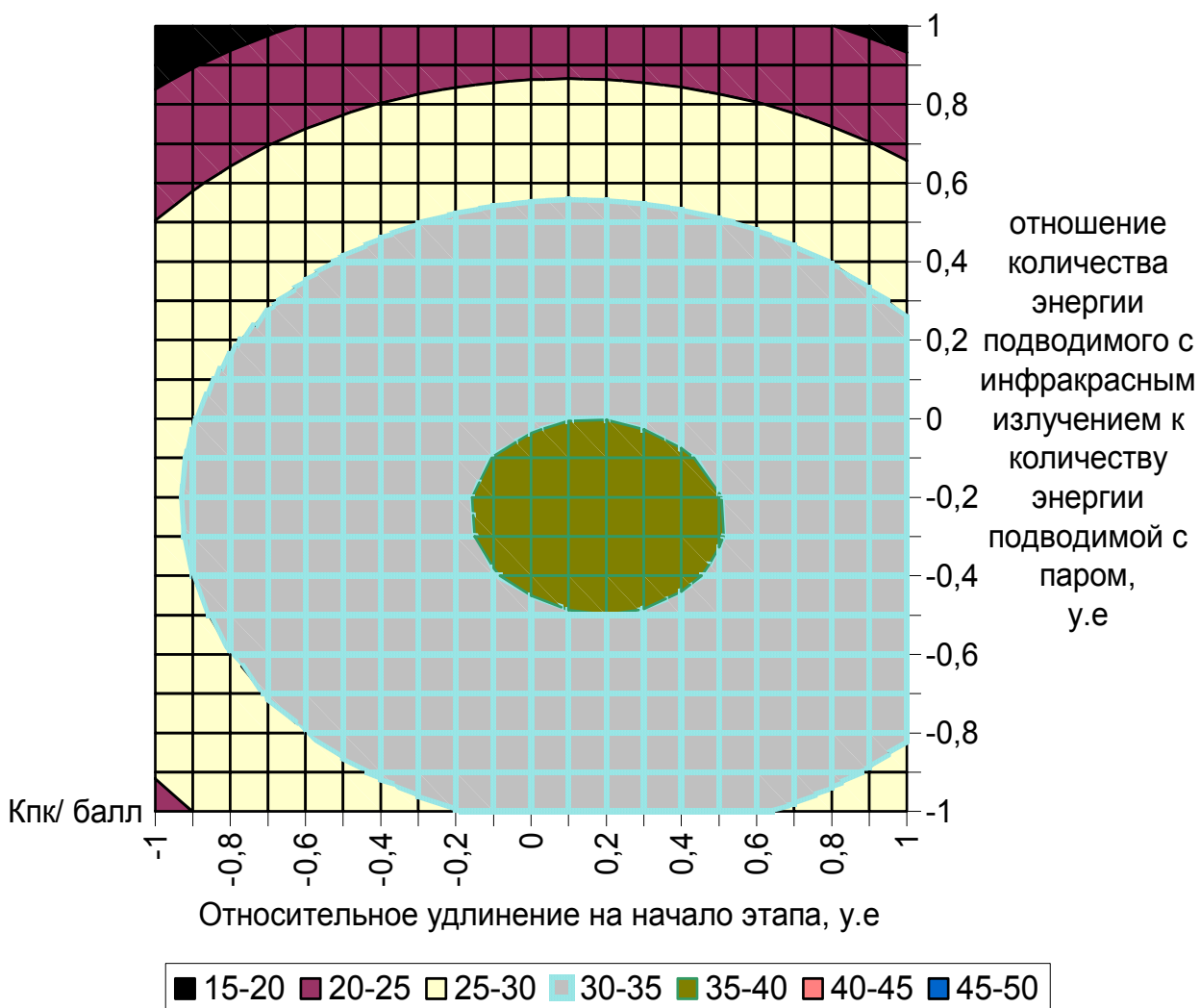


Рисунок В.3 – Зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и отношения количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара при интенсивности подвода энергии 7 кВт/(кг · ч)

На этапе конвективной сушки макаронных изделий постепенно увеличивая относительную влажность сушильного воздуха от 65 до 95 %, фиксировали относительное удлинение при растяжении полуфабрикатов в начале этапа и изменение температуры сушильного воздуха. Результаты представлены на рисунках В.4 - В.6.

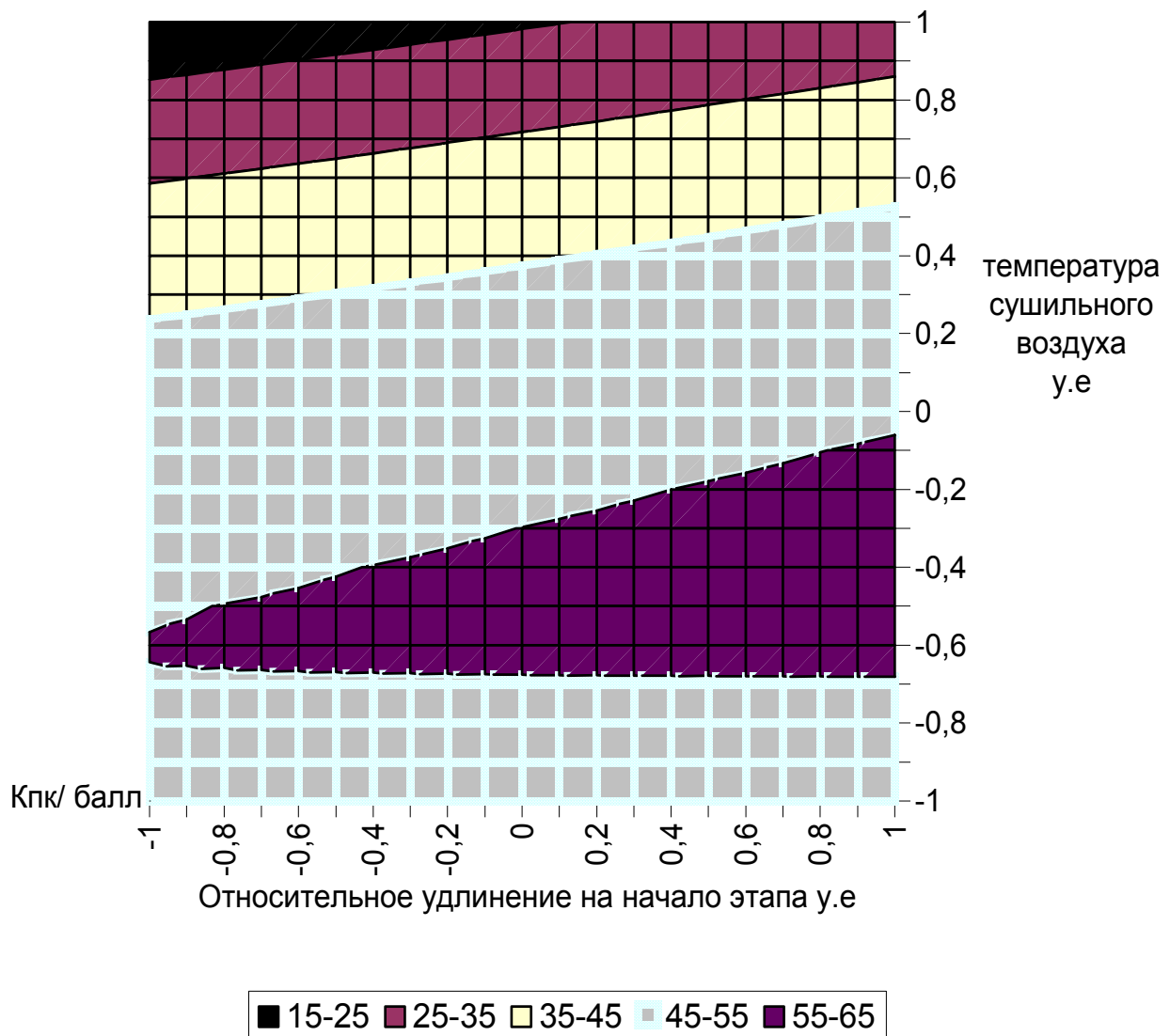


Рисунок В.4 – Зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры сушильного воздуха при его относительной влажности 65 %



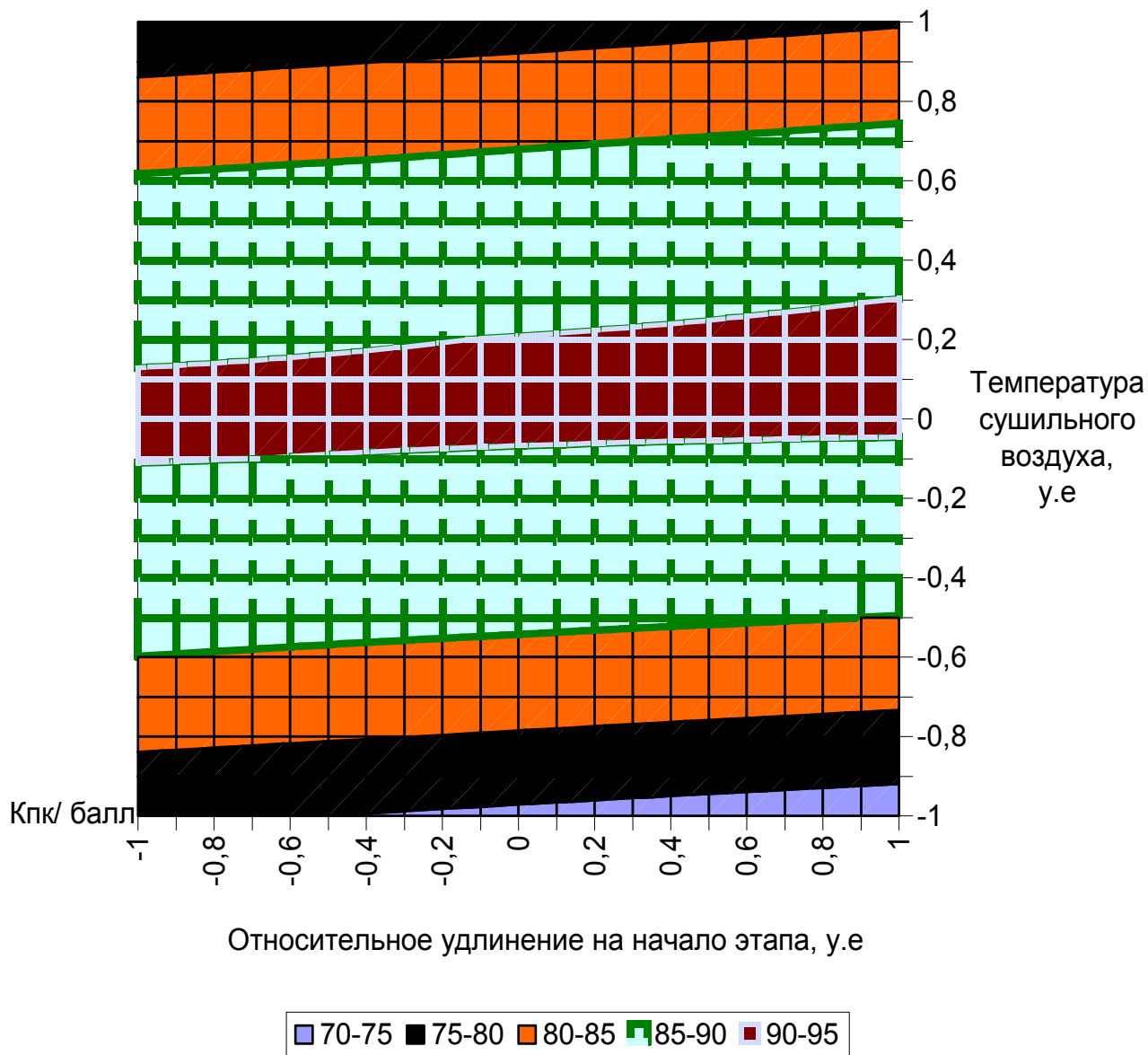


Рисунок В.5 – Зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры сушильного воздуха при его относительной влажности 80 %

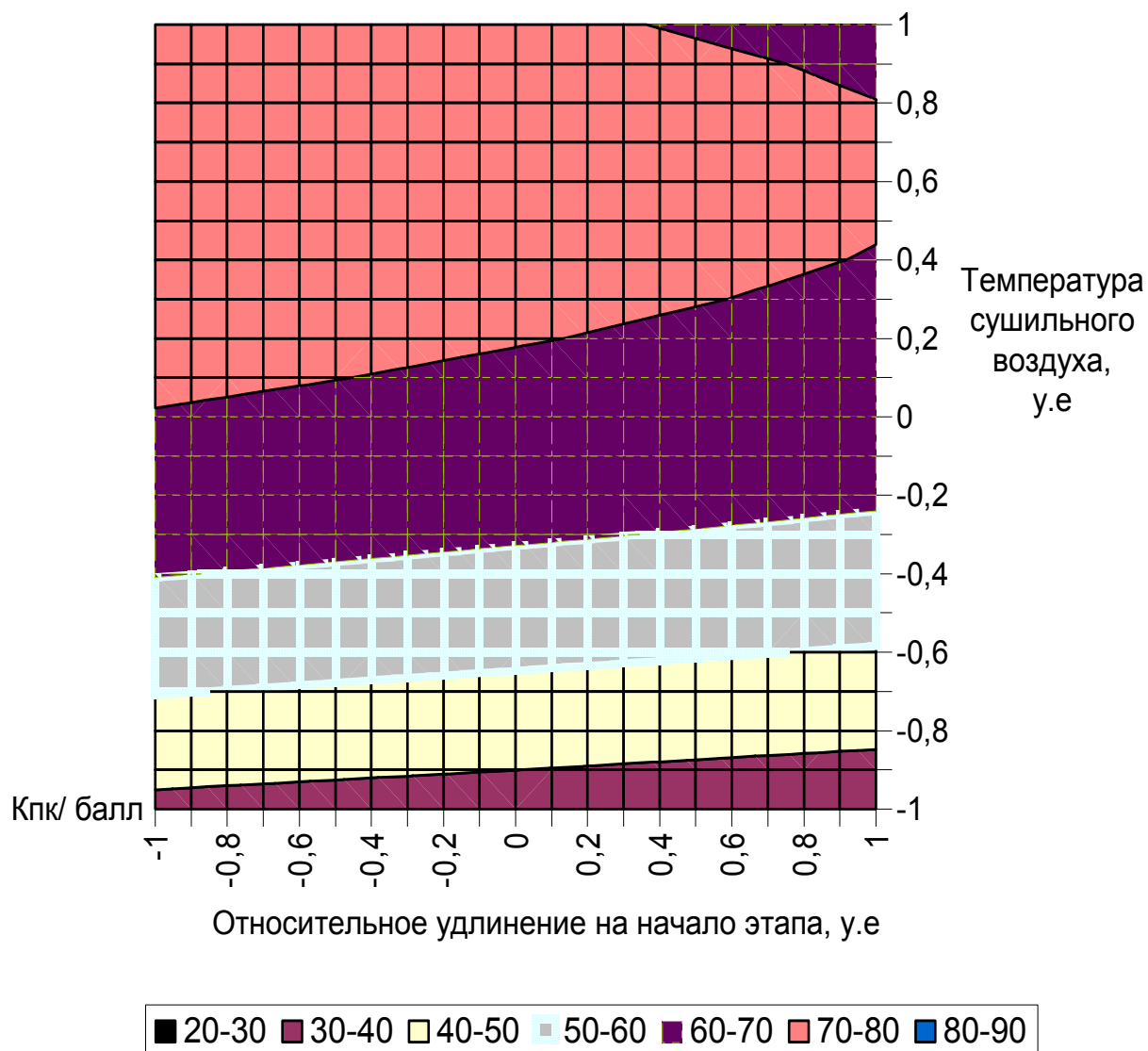


Рисунок В.6 – Зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры сушильного воздуха при его относительной влажности 95 %

На этапе сверхвысокочастотной сушки, постепенно увеличивая поверхностную влажность изделий от 8 до 14 %, фиксировали относительное удлинение при растяжении полуфабрикатов в начале этапа и изменение интенсивности СВЧ – воздействия.

Результаты представлены на рисунках В.7 – В. 9.

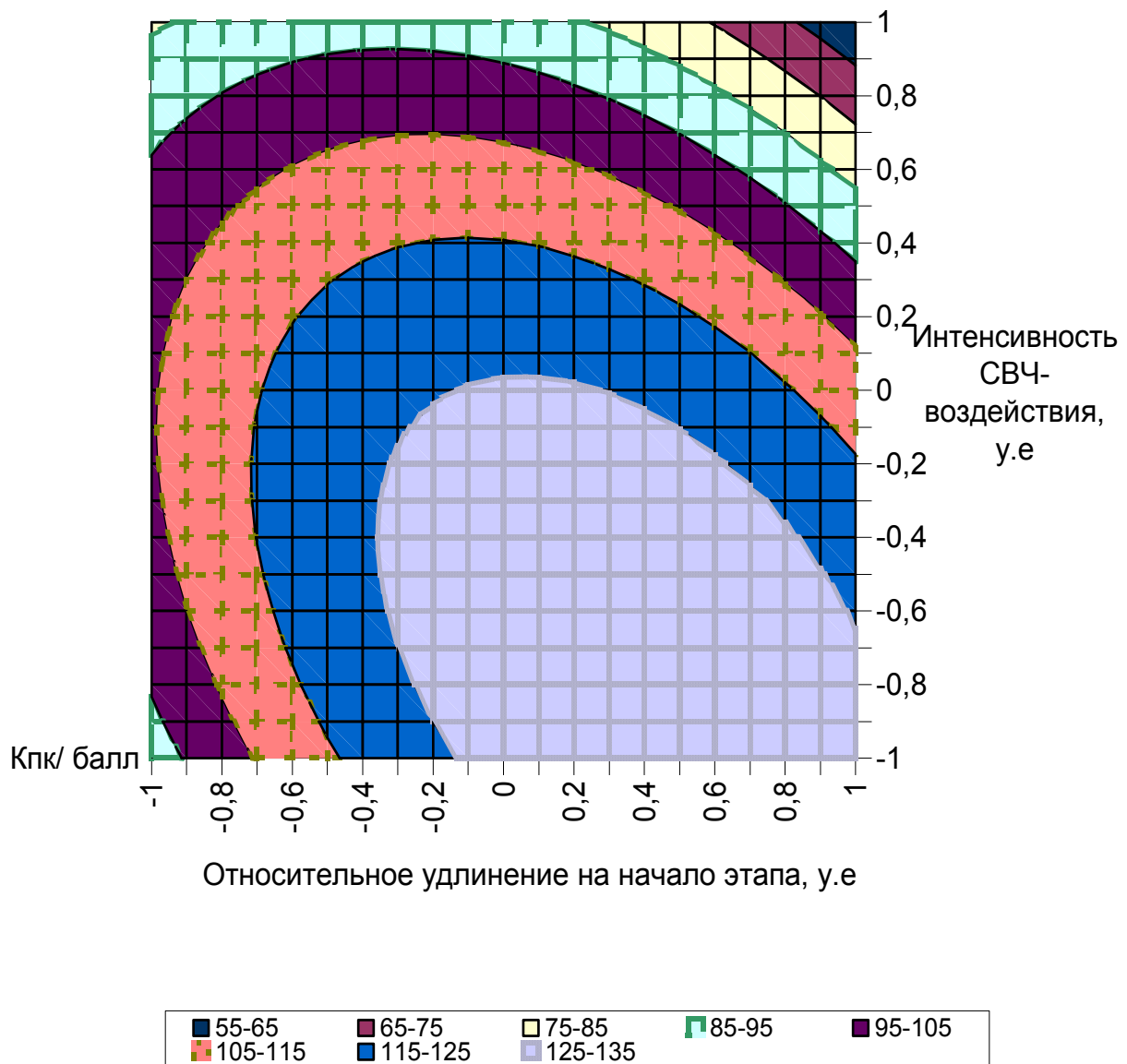


Рисунок В.7 – Зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и интенсивности СВЧ – воздействия при влажности поверхности 8 %

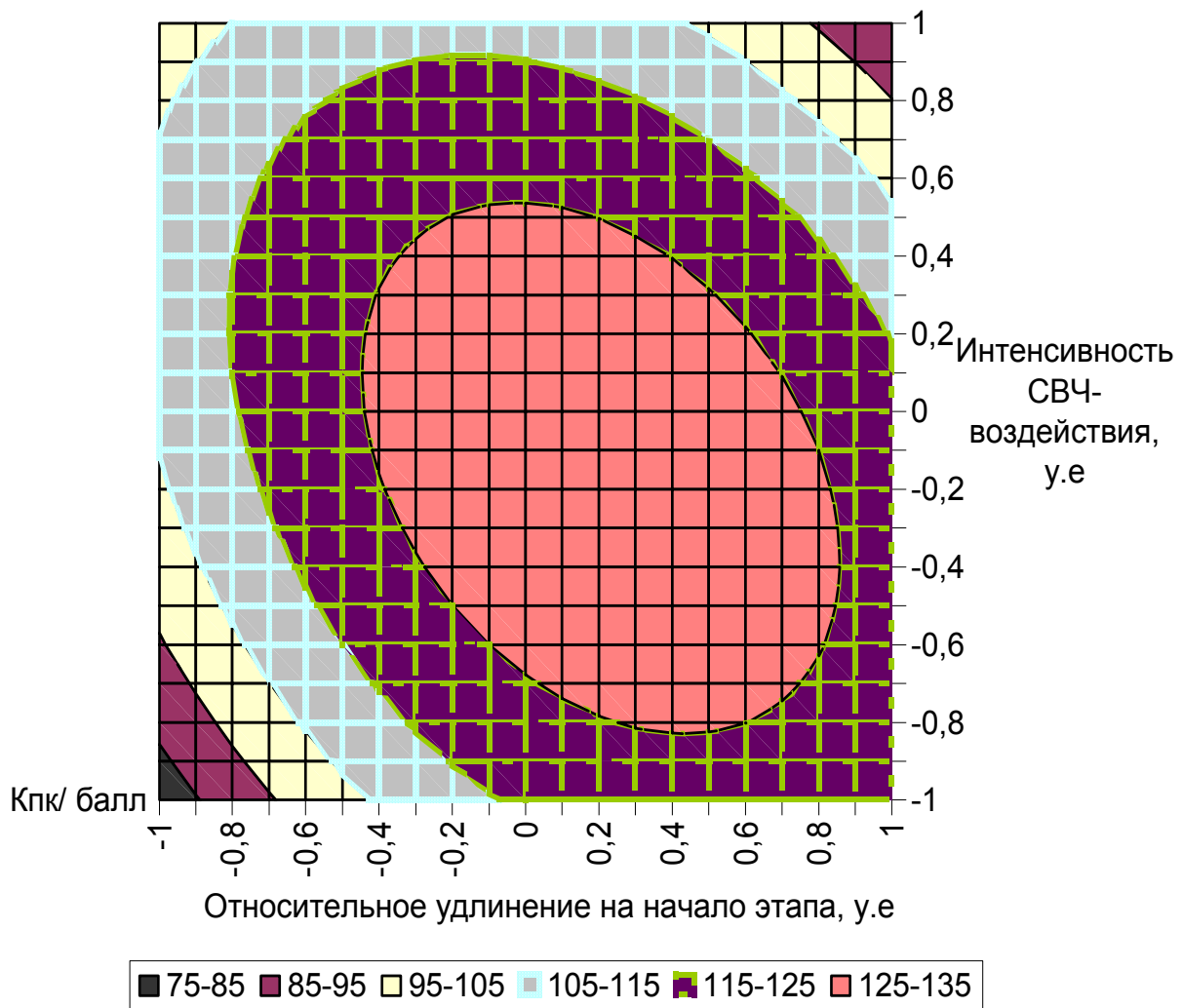


Рисунок В.8 – Зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и интенсивности СВЧ – воздействия при влажности поверхности 11 %

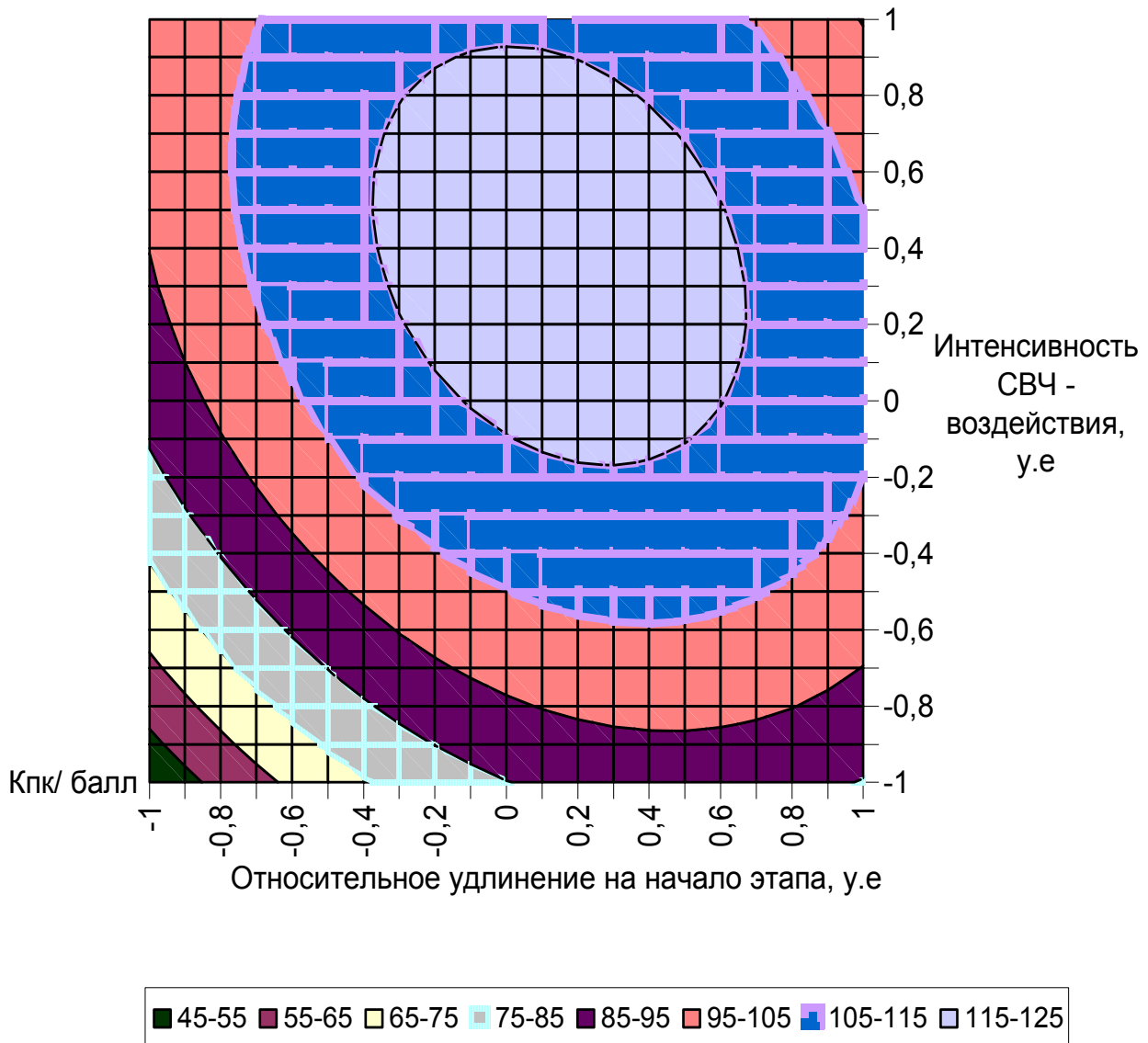


Рисунок В.9 – Зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и интенсивности СВЧ – воздействия при влажности поверхности 14 %

Затем рассматривали последний этап – охлаждение. Постепенно увеличивая относительную влажность охлаждающего воздуха от 45 до 95 %, фиксировали относительное удлинение при растяжении полуфабрикатов в начале этапа и изменение температуры охлаждающего воздуха. На рисунке В.10 представлена зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 45 %.

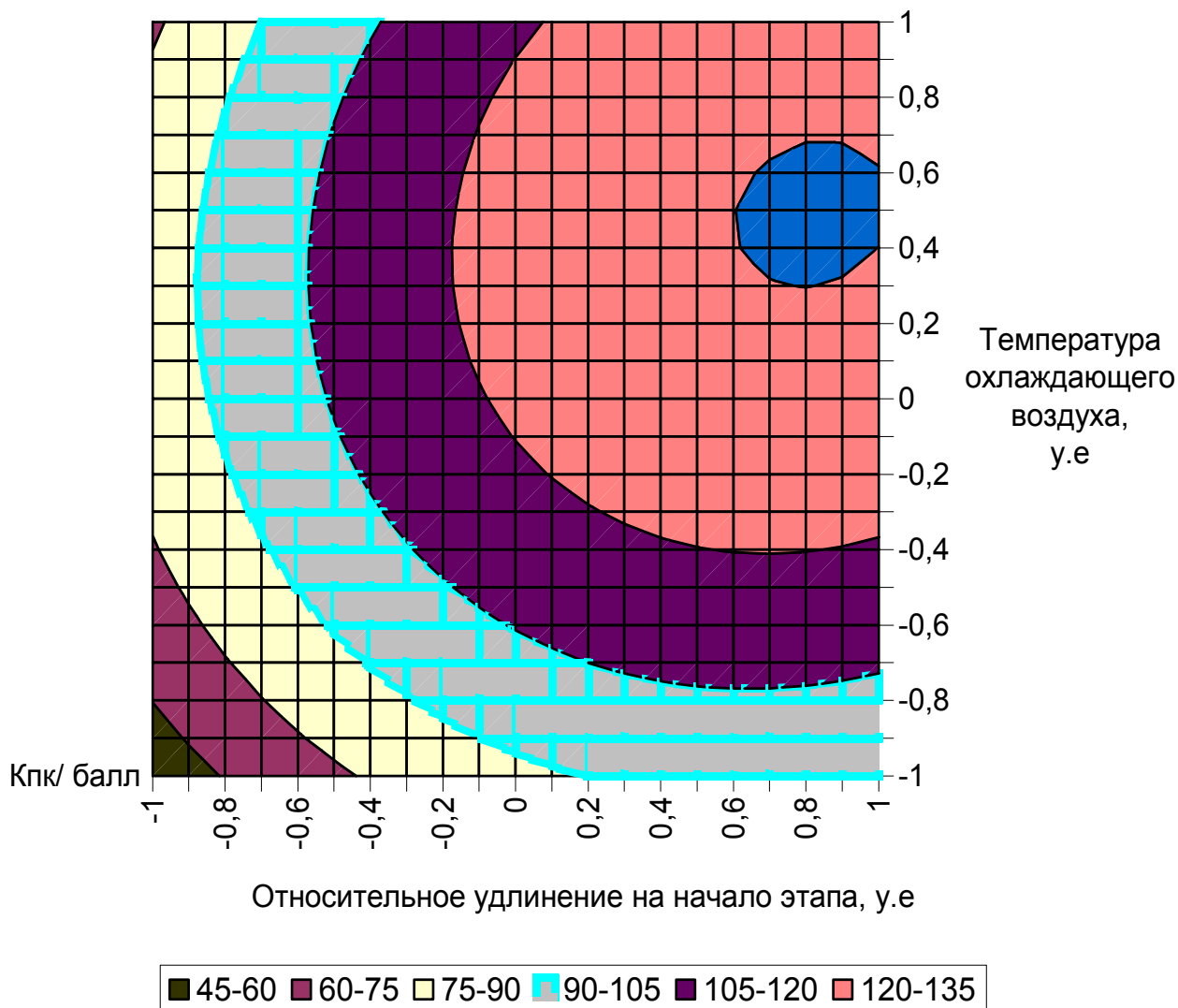


Рисунок В.10 – Зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 45 %

Наилучшие результаты получены при относительной влажности воздуха 70 %, поэтому зависимость комплексного показателя качества макаронных изделий от их относительного удлинения и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 70 % как пример представлена в главе 5.

Зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 95 % представлена на рисунке В.11.

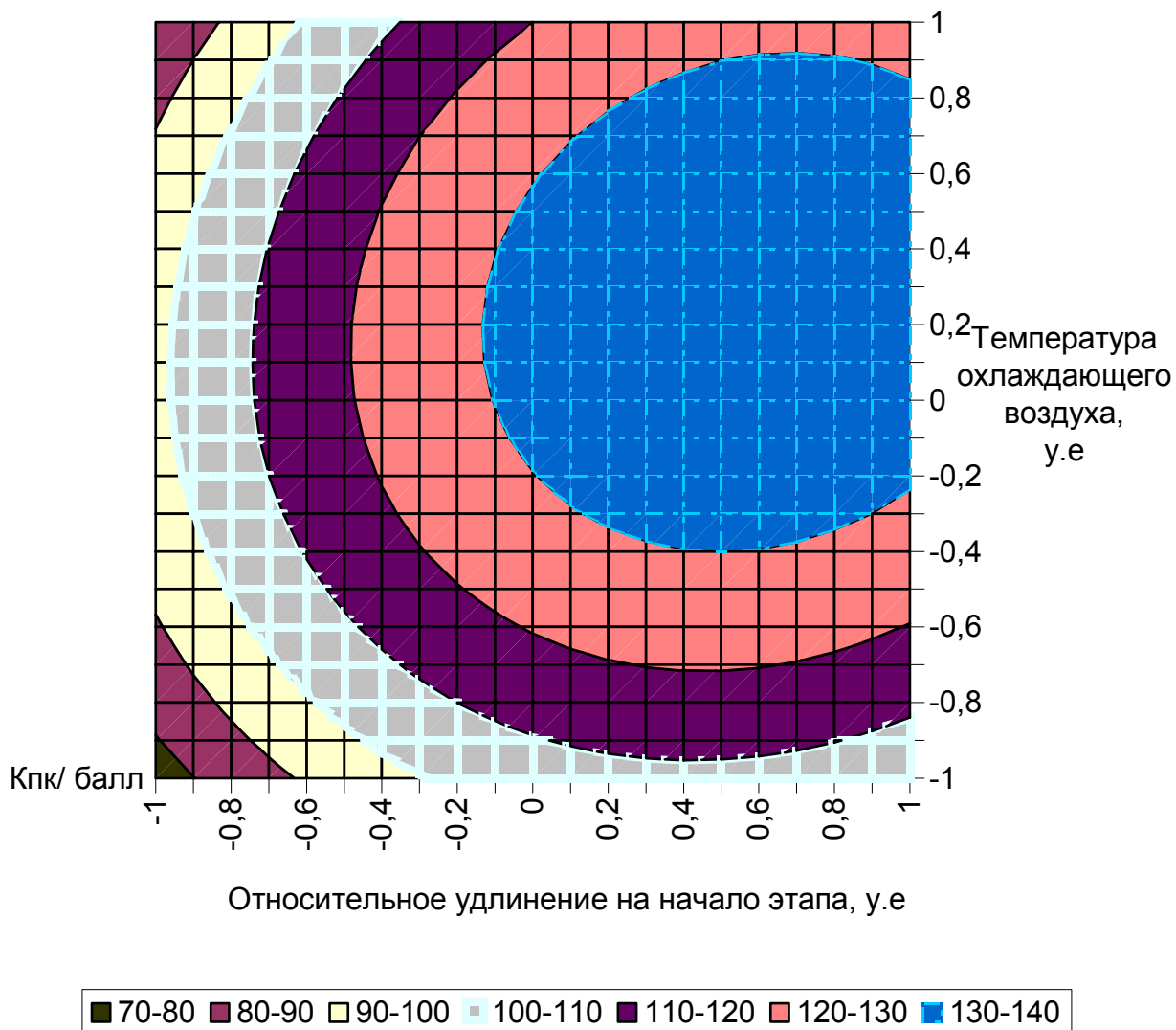


Рисунок В.11 – Зависимость комплексного показателя качества от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 95 %.

## Приложение Г (рекомендуемое)

### Графоаналитические зависимости удельных затрат энергии от исходных факторов (управляющих воздействий и возмущений) для каждого этапа сушки

Сначала рассматривали первый этап – инфракрасную сушку с пропариванием. Исследования проводили постепенно увеличивали интенсивность подвода энергии инфракрасного излучения и пара в пределах от 3 до 7 кВт/ (кг · ч) и фиксировали изменение относительного удлинения при растяжении полуфабрикатов и отношение количества энергий, подводимых с инфракрасным излучением и паром.

Результаты представлены на рисунках Г.1 – Г.11.

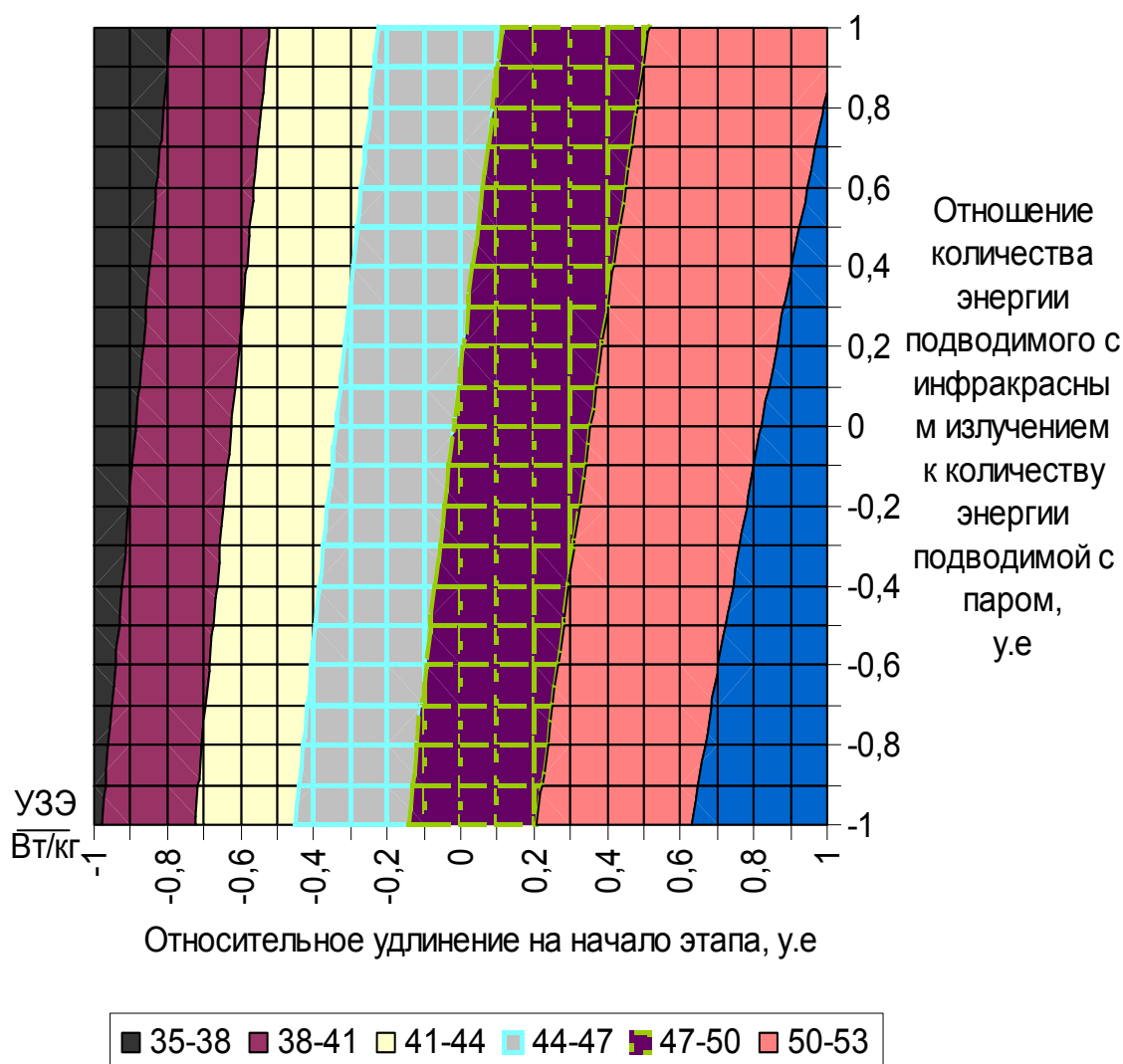


Рисунок Г.1 – Зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и отношения количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара при интенсивности подвода энергии 3 кВт/ (кг · ч)



На рисунках Г.1 – Г.11 относительное удлинение на начало этапа и отношение количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара даны в условных единицах.

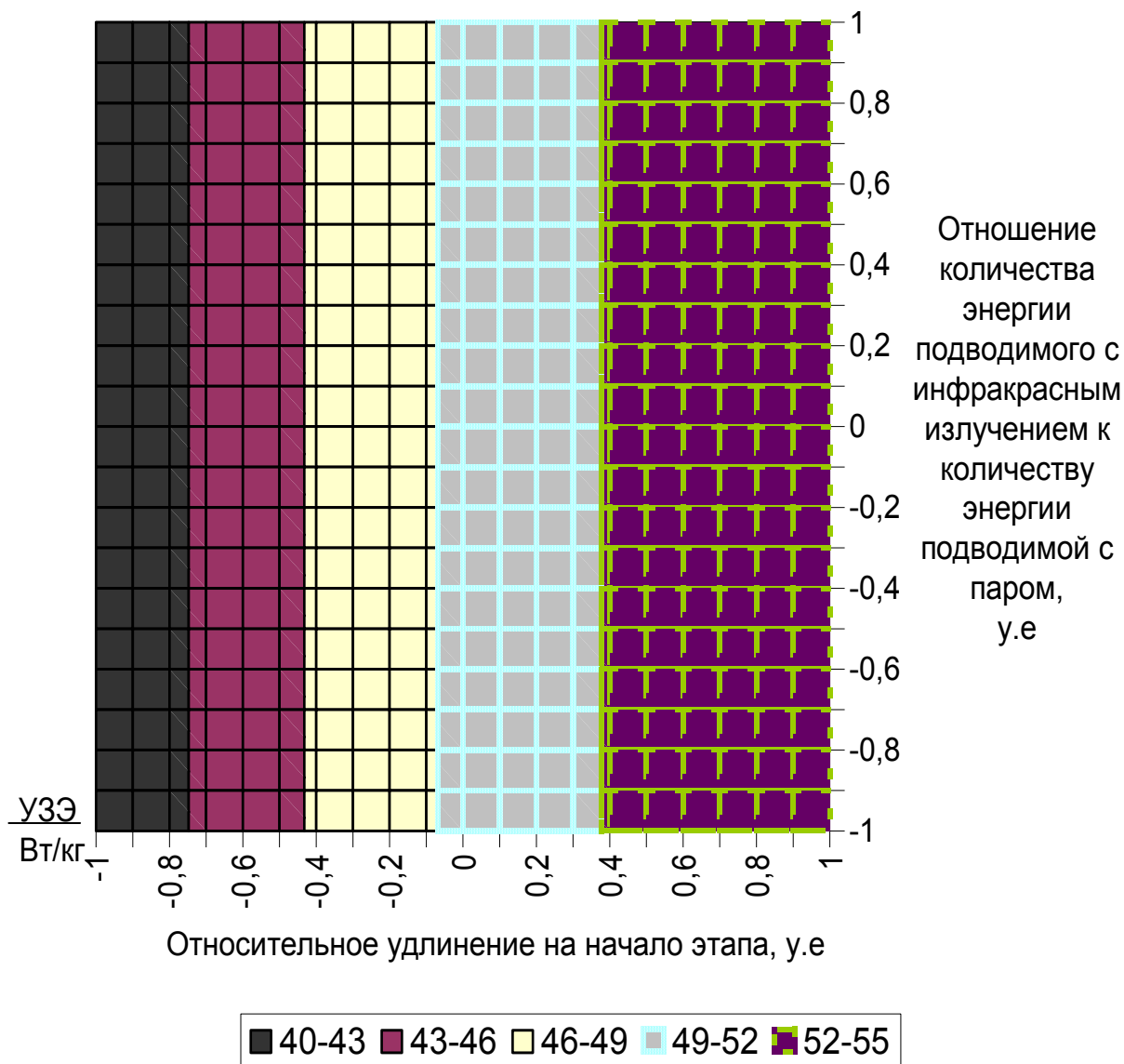


Рисунок Г.2 – Зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и отношения количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара при интенсивности подвода энергии 5 кВт/(кг · ч)

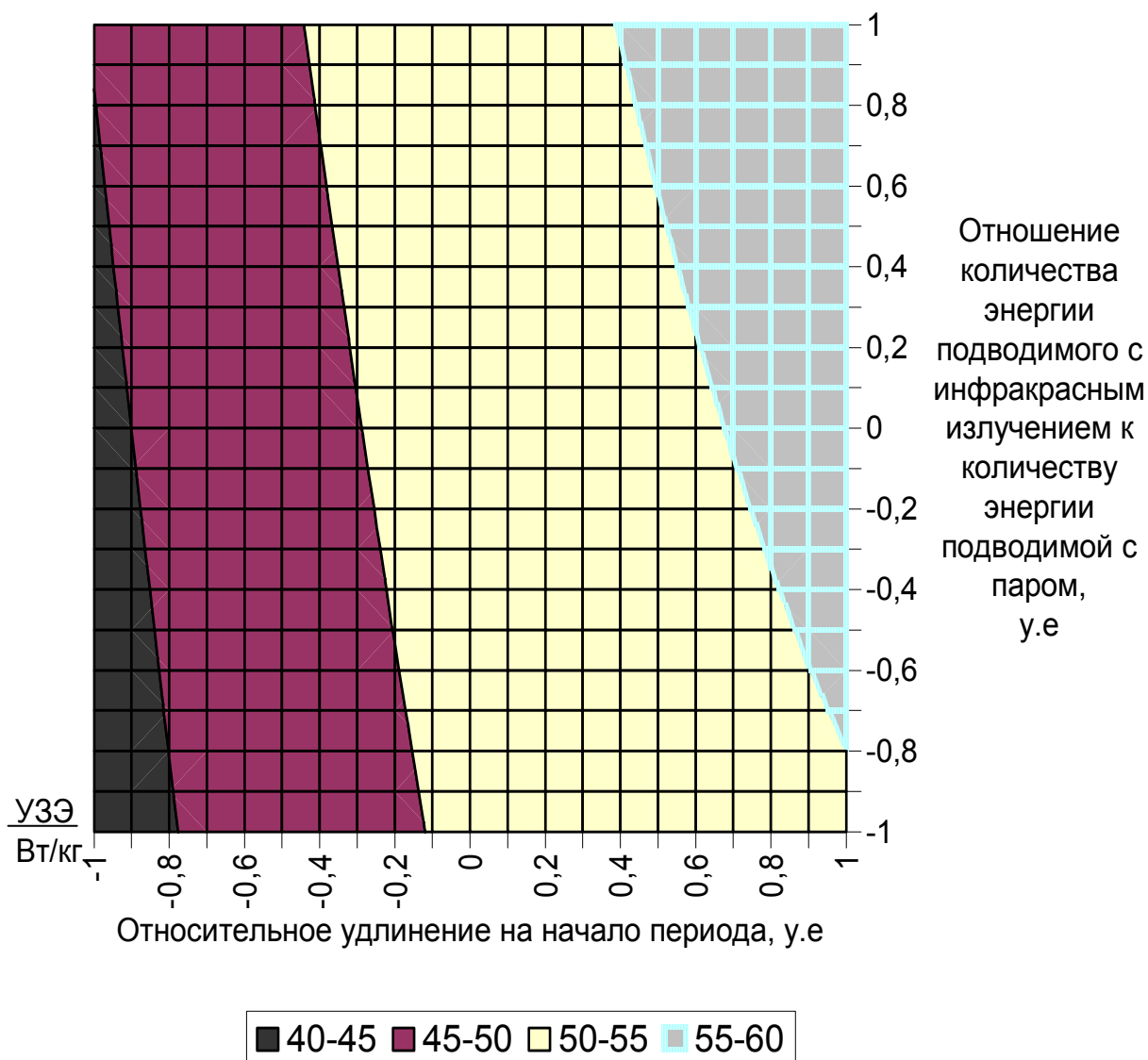


Рисунок Г.3 – Зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и отношения количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара при интенсивности подвода энергии 7 кВт/(кг · ч)

Затем рассматривали второй этап сушки – конвективный. Постепенно увеличивая относительную влажность сушильного воздуха от 65 до 95 %, фиксировали относительное удлинение при растяжении полуфабрикатов в начале этапа и изменение температуры сушильного воздуха.

Результаты представлены на рисунках Г.4 – Г.6.

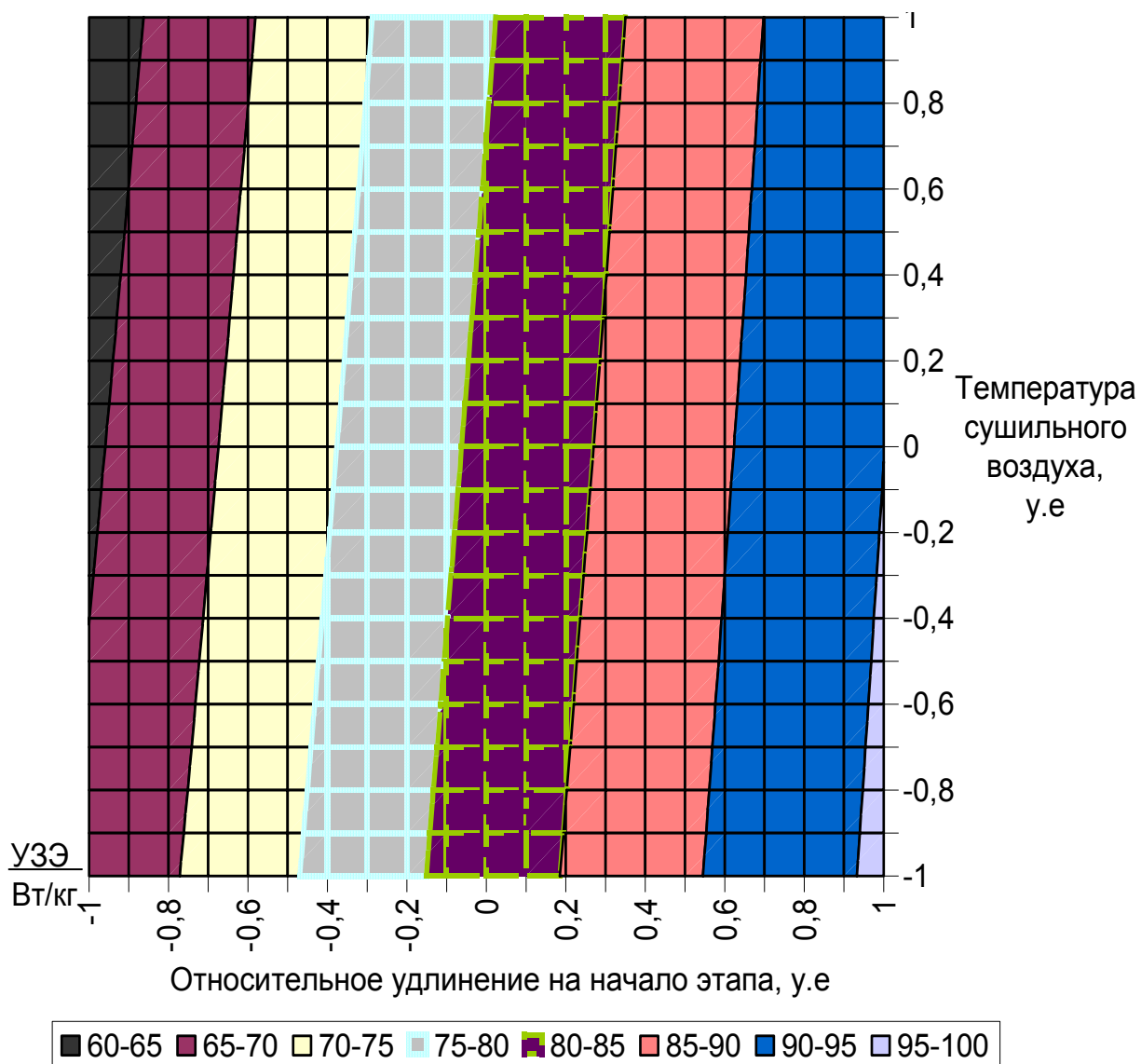


Рисунок Г.4 - Зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры сушильного воздуха: при его относительной влажности 65 %

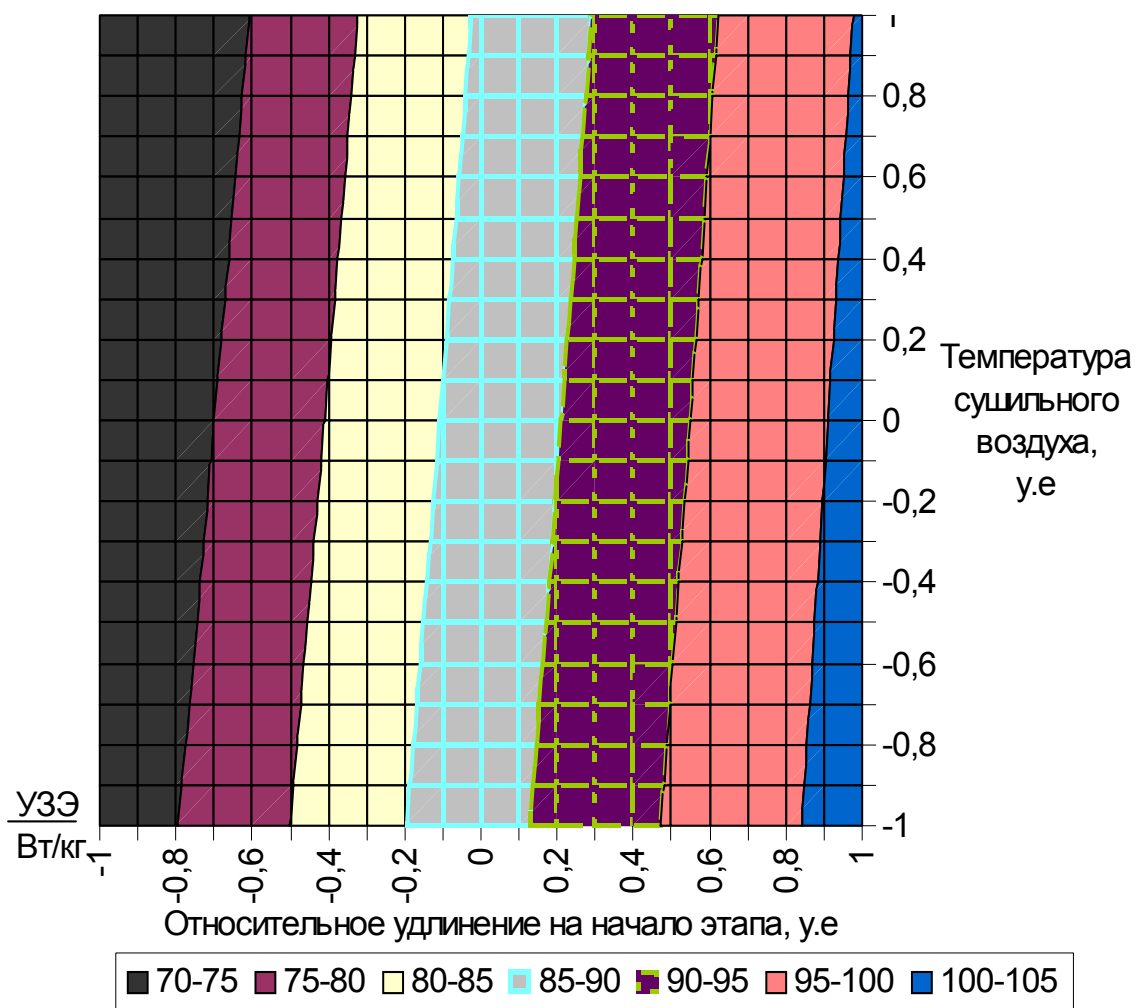


Рисунок Г.5 - Зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры сушильного воздуха: при его относительной влажности 80 %

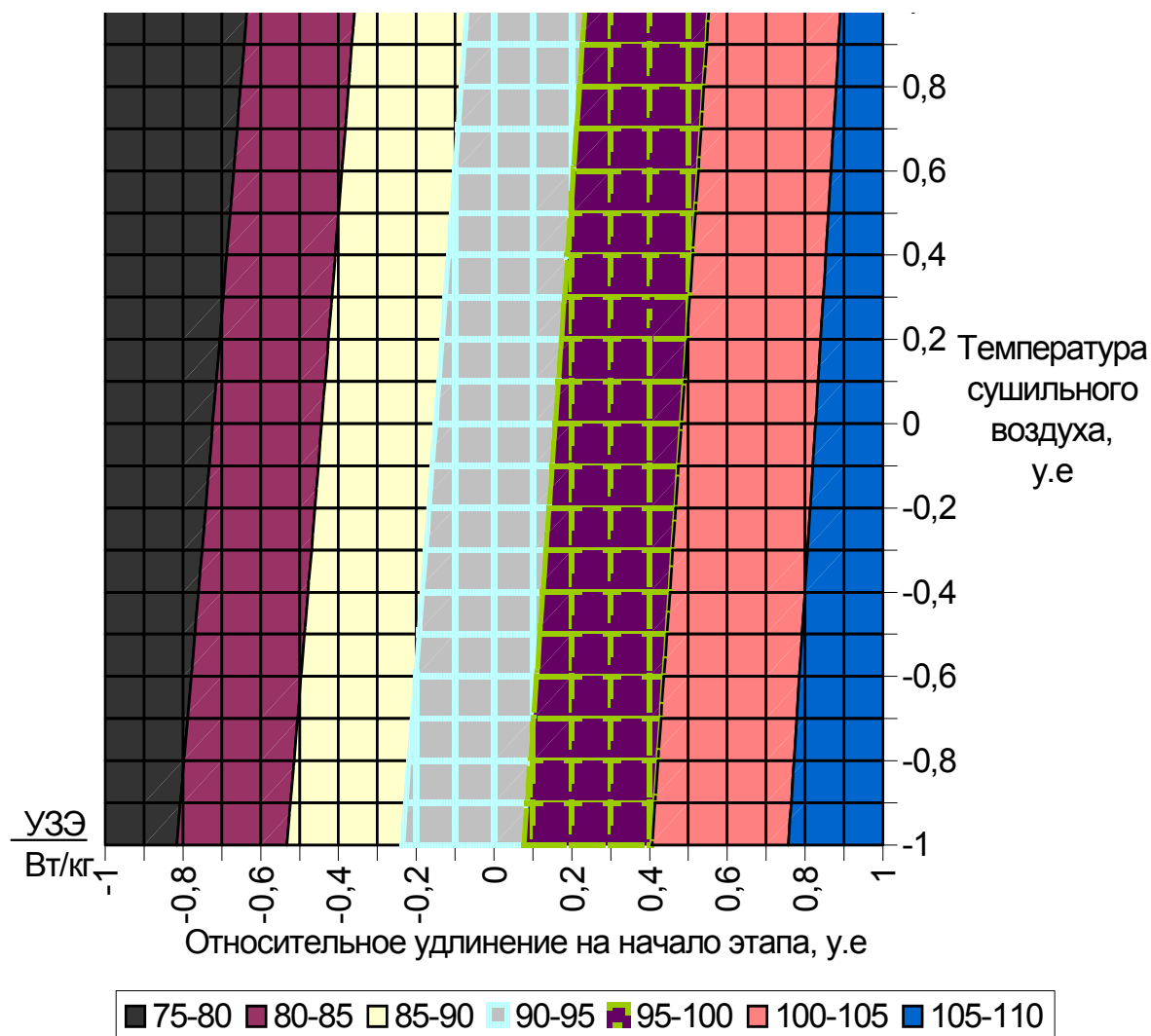


Рисунок Г.6 - Зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры сушильного воздуха: при его относительной влажности 95 %

Затем рассматривали третий этап – сверхвысокочастотной сушки. Постепенно увеличивая поверхностную влажность изделий от 8 до 14 %, фиксировали относительное удлинение при растяжении полуфабрикатов в начале этапа и изменение интенсивности СВЧ – воздействия.

Результаты представлены на рисунках Г.7 – Г.9.

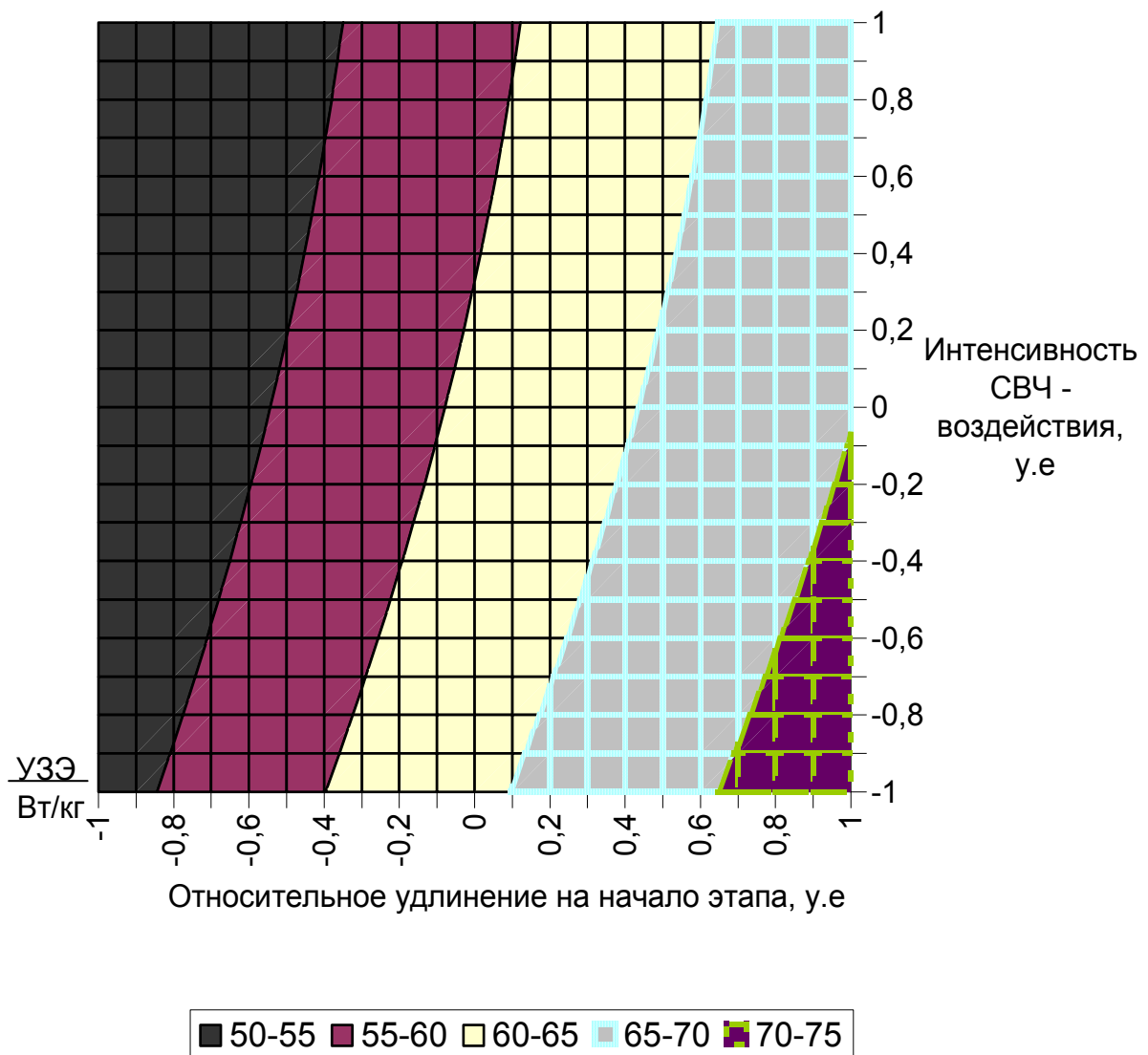


Рисунок Г.7 – Зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и интенсивности СВЧ – воздействия при влажности поверхности 8 %

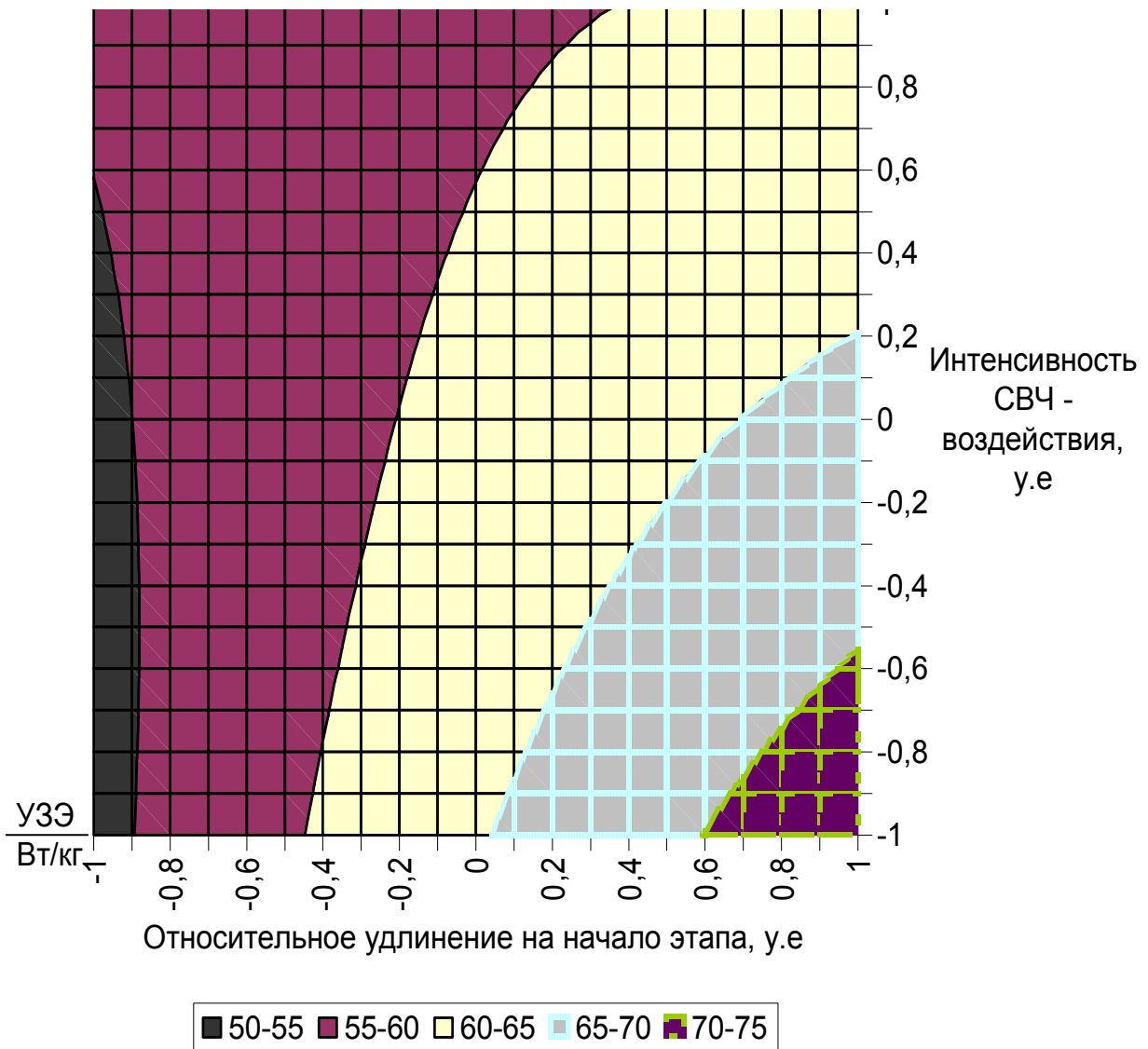


Рисунок Г.8 – Зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и интенсивности СВЧ – воздействия при влажности поверхности 11 %

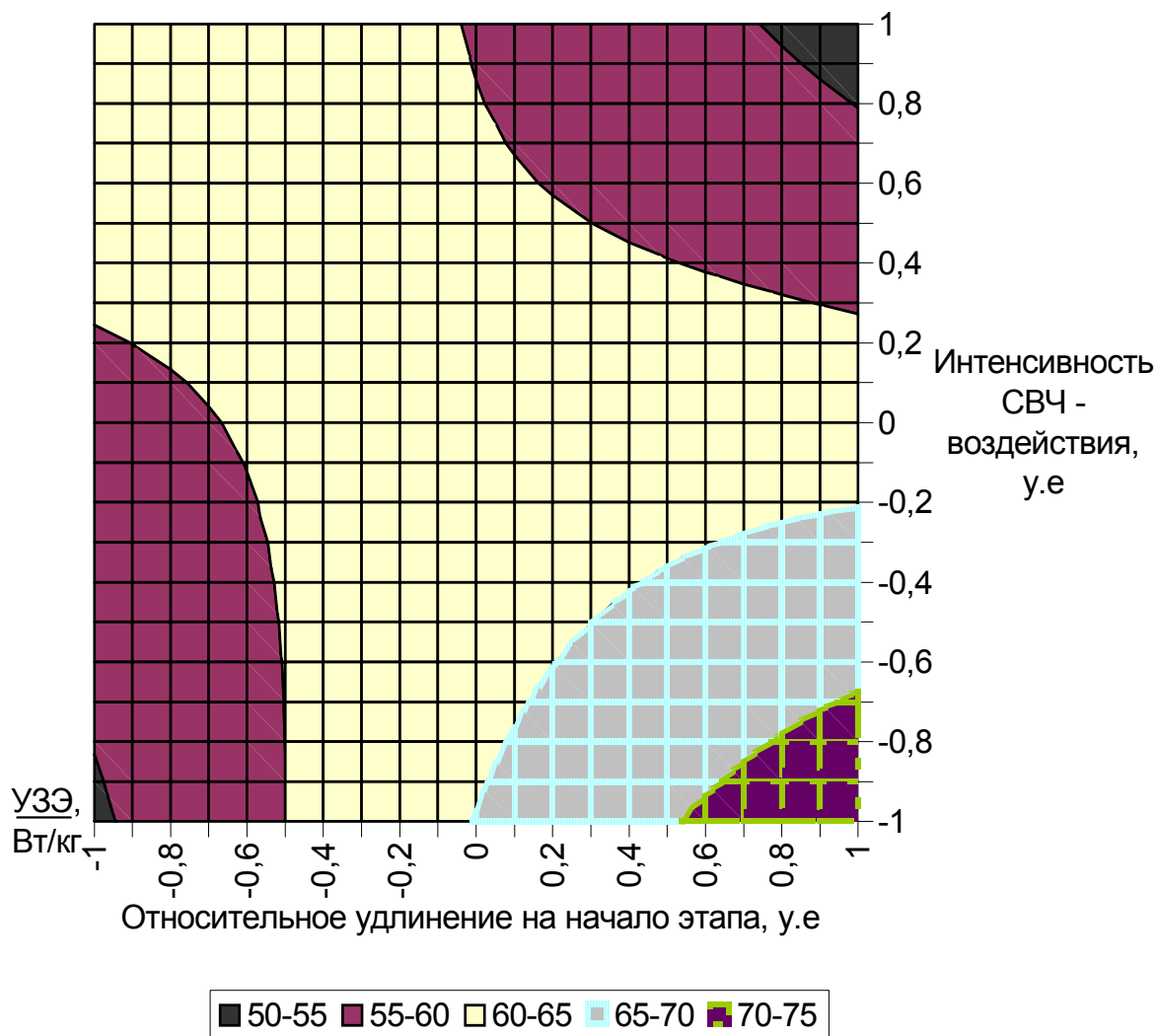


Рисунок Г.9 – Зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и интенсивности СВЧ – воздействия при влажности поверхности 14 %

На последнем этапе сушки – этапе охлаждения и стабилизации, постепенно увеличивая относительную влажность охлаждающего воздуха от 45 до 95 %, фиксировали относительное удлинение при растяжении полуфабрикатов в начале этапа и изменение температуры охлаждающего воздуха. Зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 45 % представлена на рисунке Г.10.



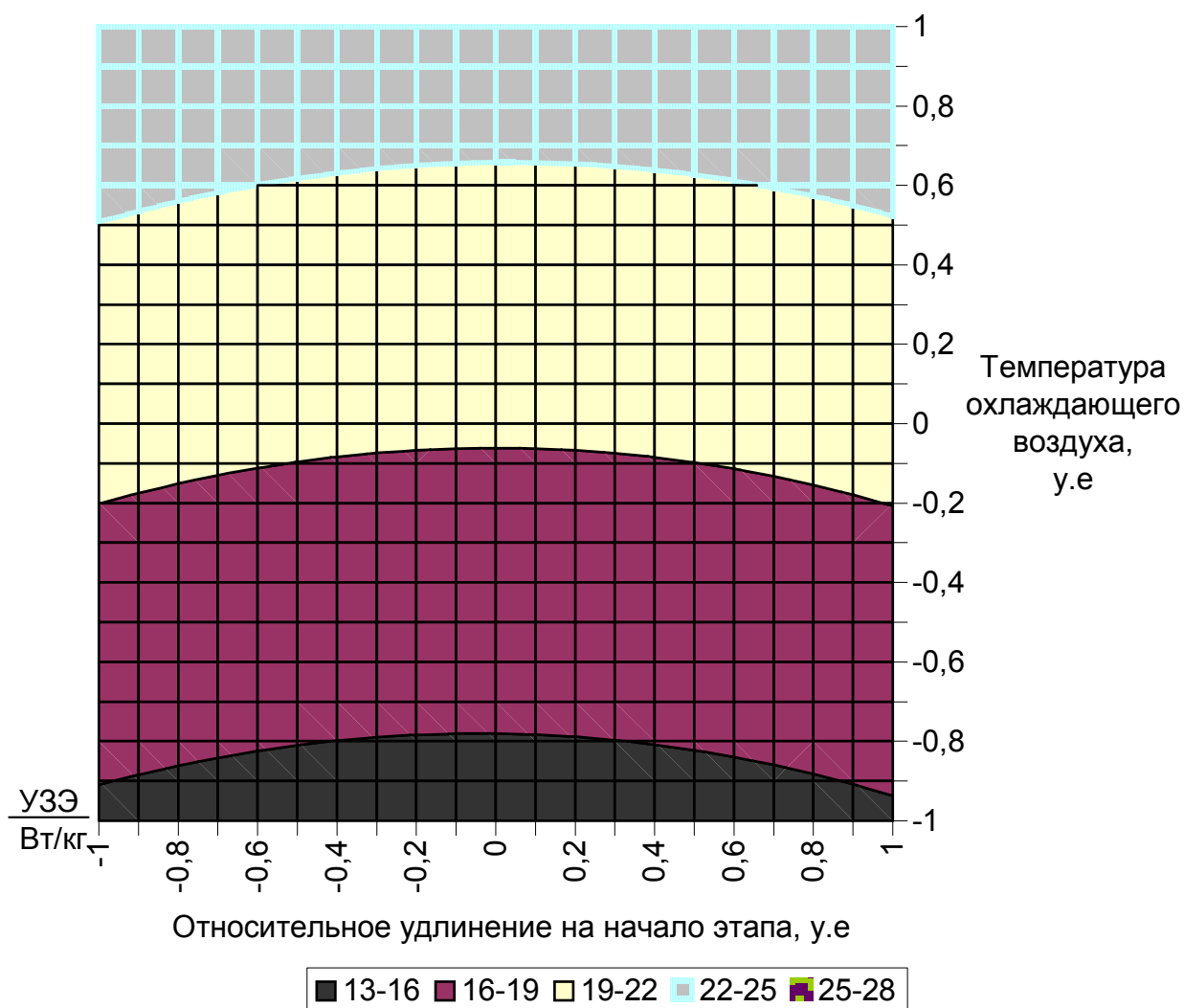


Рисунок Г.10 – Зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 45 %

Наилучшие результаты получены при относительной влажности воздуха 70 %. Зависимость органолептических свойств полуфабрикатов по результатам экспертной оценки от их относительного удлинения и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 70 % представлена в главе 5.

На рисунке Г. 11 представлена зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 95 %.

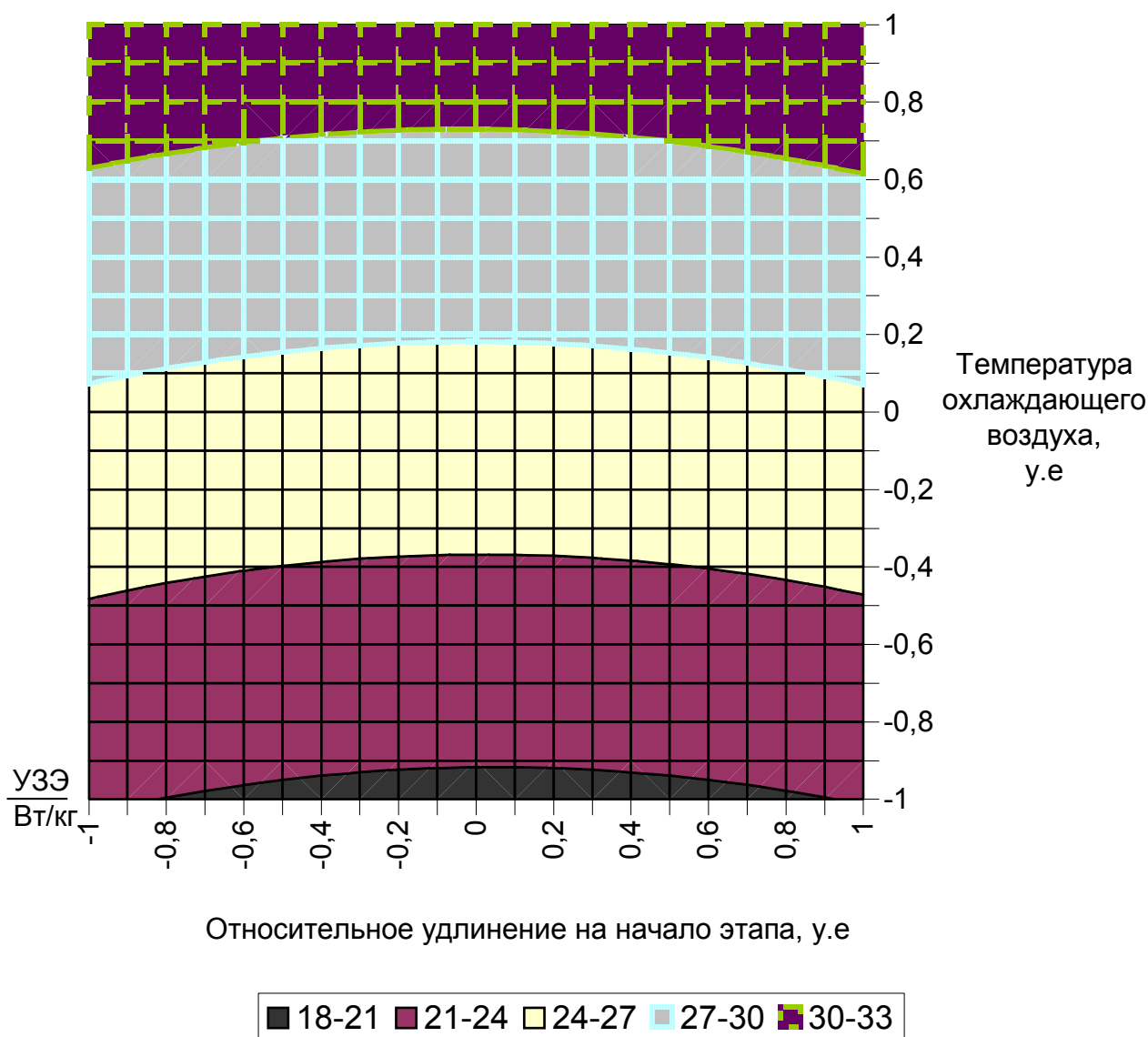


Рисунок Г. 11 – Зависимость удельных затрат энергии от относительного удлинения полуфабрикатов и температуры охлаждающего воздуха при его относительной влажности 95 %

## Приложение Д (рекомендуемое)

### Графоаналитические зависимости относительного удлинения полуфабрикатов в конце каждого этапа сушки от исходных факторов (управляющих воздействий и возмущений)

При проведении оптимизации необходимо было учитывать также относительное удлинение полуфабрикатов при растяжении в конце каждого этапа сушки. Для этого при исследованиях после каждого этапа сушки, кроме последнего, производили соответствующие замеры. Фиксированные параметры (интенсивность подвода энергий, относительная влажность сушильного воздуха) взяты в оптимальных пределах. Зависимость относительного удлинения полуфабрикатов в конце периода от начального относительного удлинения и отношения количества подводимых энергий инфракрасного излучения и пара (при интенсивности подвода энергии 5 кВт/(кг · ч)) представлена на рисунке Д.1.

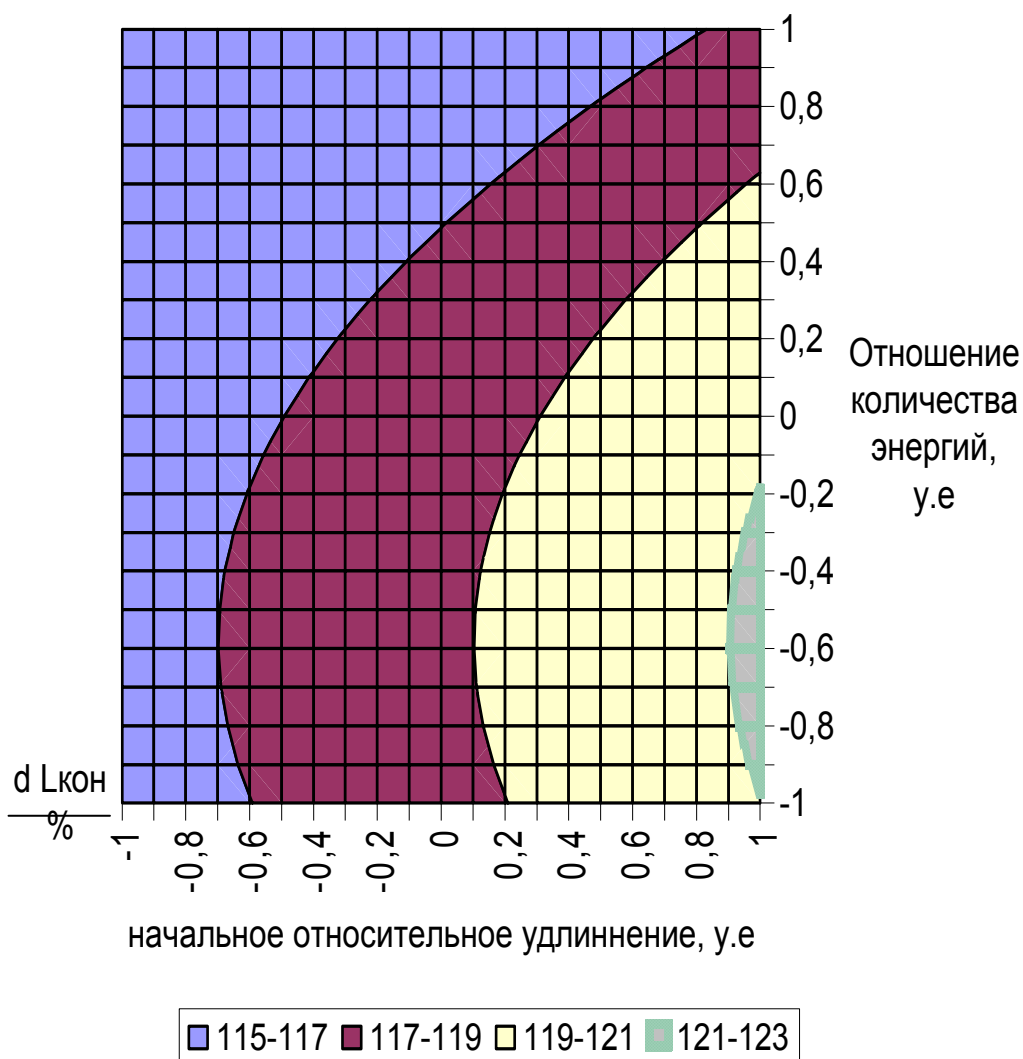


Рисунок Д.1

Зависимость относительного удлинения полуфабрикатов в конце периода от начального относительного удлинения и температуры сушильного воздуха при его относительной влажности 80 % представлена на рисунке Д.2.

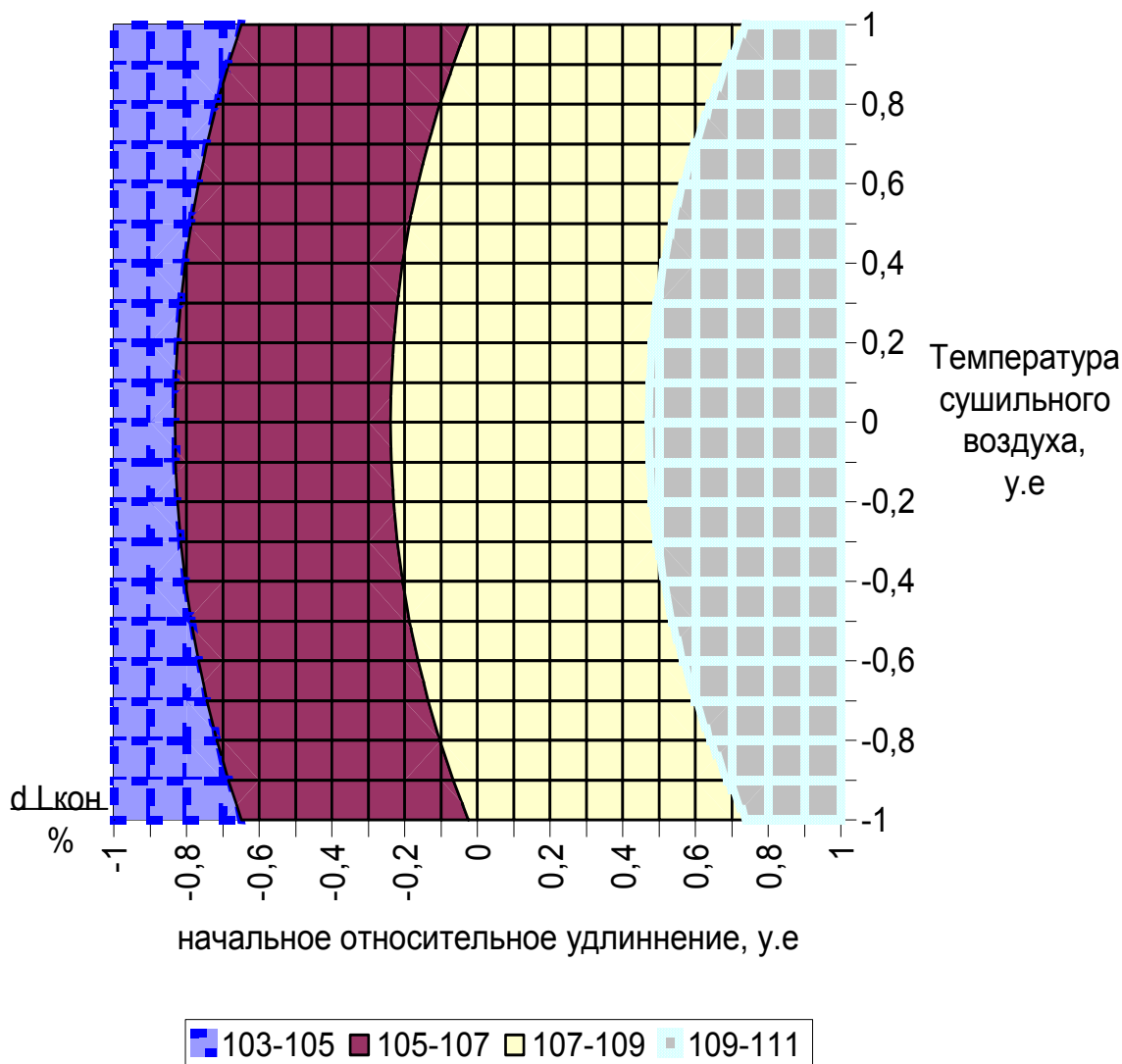


Рисунок Д.2 - Зависимость относительного удлинения полуфабрикатов в конце периода от начального относительного удлинения и температуры сушильного воздуха при его относительной влажности 80 %

Зависимость относительного удлинения полуфабрикатов в конце периода от начального относительного удлинения и интенсивности СВЧ - воздействия при влажности поверхности 11 % представлена на рисунке Д.3.

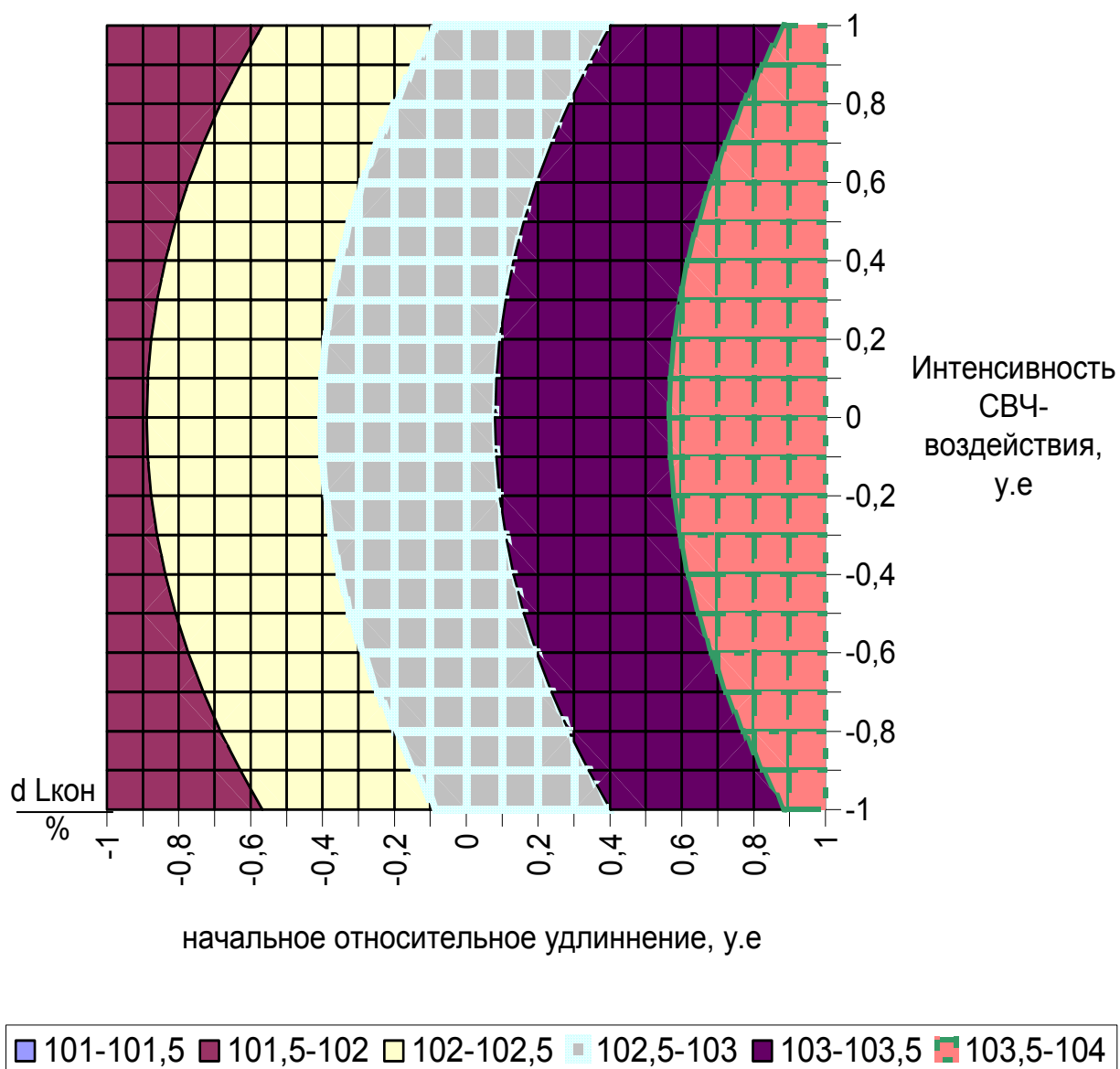


Рисунок Д.3 – Зависимость относительного удлинения полуфабрикатов в конце периода от начального относительного удлинения и интенсивности СВЧ - воздействия при влажности поверхности 11 %