

На правах рукописи



СТАРШОВ ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ДЛЯ  
ПРИГОТОВЛЕНИЯ ВАФЕЛЬНОГО ТЕСТА

Специальность 05.18.12 - Процессы и  
аппараты пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.»)

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
**Седелкин Валентин Михайлович**  
ФГБОУ ВО «Саратовский  
государственный технический  
университет имени Гагарина Ю.А.»

Официальные оппоненты – **Корячкина Светлана Яковлевна**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Орловский государственный  
университет имени И.С. Тургенева»,  
профессор

**Дерканосова Анна Александровна**  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный университет  
инженерных технологий», доцент

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Тамбовский  
государственный технический  
университет», г. Тамбов

Защита диссертации состоится 12 декабря 2019 г., в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.035.01 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: 394036 г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц - зал

Отзывы (в двух экземплярах) на автореферат, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета университета.

Автореферат размещен на сайтах Высшей аттестационной комиссии при Министерства науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и ВГУИТ <http://www.vsuet.ru> «7» октября 2019 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» <http://www.vsuet.ru> «18» сентября 2019 г.

Автореферат разослан «11 » ноября 2019 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций  
на соискание ученой степени кандидата наук,  
на соискание ученой степени  
доктора наук Д 212.035.01



Л.Н. Фролова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Кондитерская промышленность занимает 4-ое место по объему выпуска продукции среди подотраслей пищевой промышленности. Анализ рынка кондитерских изделий в России показал, что в 2018 году объем их производства составил 2856 тыс. тонн, или 20,2 кг на 1 человека. Потребление кондитерских изделий в России практически достигло европейского уровня.

Вафельные кондитерские изделия (вафли, вафельные торты, конфеты на вафельной основе и др.) являются наиболее востребованной на отечественном потребительском рынке продукцией. Основной составной частью вафельных изделий являются вафельные листы, которые должны обладать такими специфическими свойствами, как мелкопористая однородная внутренняя структура, низкое содержание влаги, издание хруста при раскусывании, рифлёная клетчатая поверхность. Для получения вафельных листов с требуемыми свойствами необходимо соответствующее вафельное тесто.

Анализ существующих технологий и оборудования для приготовления вафельного теста показал, что они имеют целый ряд недостатков:

- использование частично механизированного способа дозирования и перемешивания рецептурных компонентов при атмосферном давлении;
- низкая интенсивность и большая продолжительность процесса замеса теста;
- высокие удельные затраты энергии на приготовление теста.

Поэтому совершенствование процессов и аппаратов для дозирования сыпучих компонентов, приготовления рецептурной смеси и замеса теста является актуальной научной и прикладной задачей.

**Цель работы:** Совершенствование процессов приготовления вафельного теста и разработка нового оборудования для вафельного производства.

**Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

1. Разработать научно-технические решения по совершенствованию процессов дозирования и перемешивания сыпучих компонентов, входящих в рецептуру вафельного теста, в том числе:

- исследовать процессы подачи, дозирования и перемешивания компонентов в вакуумированной системе;
- экспериментально и теоретически определить рациональные параметры предложенного устройства для дозирования и перемешивания сыпучих компонентов.

2. Разработать научно-технические решения по совершенствованию процесса замеса вафельного теста, в том числе:

- предложить способ интенсификации замеса вафельного теста и тестомесильное устройство для приготовления вафельного теста;
- экспериментально установить оптимальные технологические, кинематические и конструктивные характеристики тестосмесителя (величина

давления в системе, время замеса и доставки вафельного теста на выпечку листов, параметры ротора турбопривода и др.);

- выявить зависимости между характеристиками тестосмесителя и параметрами вафельного теста (степень аэрации, динамическая вязкость, степень однородности и др.)

- разработать инженерную методику расчета тестосмесителей для приготовления вафельного теста, работающих при переменном давлении.

3. Исследовать влияние параметров процесса замеса теста на структурно-механические и органолептические показатели вафельных листов.

4. Провести сравнительный анализ эффективности замеса теста для вафельных изделий традиционными и предложенным в диссертации способами.

5. Разработать, изготовить и испытать автоматическую станцию для приготовления вафельного теста.

#### **Научная новизна:**

1. Предложен трехстадийный способ получения вафельного теста, реализуемый в параллельно-последовательном режиме. В соответствии с этим режимом приготовление эмульсии и смеси сухих сыпучих компонентов происходит параллельно. Замес вафельного теста из рецептурной смеси и эмульсии происходит последовательно. При этом все технологические операции (кроме приготовления эмульсии) проводятся в вакуумированных герметичных емкостях, что снижает затраты энергии и исключает любые потери сыпучих компонентов рецептурной смеси и готового теста, а также используются преимущества тестомесильных машин периодического действия с непрерывной доставкой к вафельной печи свежей порции теста, что исключает снижение его гомогенности до выпечки и повышает качество готовой продукции.

2. Расчетно-теоретическим и экспериментальным путем определены конструктивные и технологические параметры предложенного дозатора для сыпучих компонентов. Установлено, наилучшее согласование расчетного, экспериментального и заданного по рецептуре значения массы дозы сыпучего продукта имеет место при перепаде давления в 70 кПа, который можно считать оптимальным. Получено эмпирическое уравнение регрессии, позволяющее выявить степень влияния перепада давления в системе, диаметра выпускного отверстия и числа оборотов подвижного диска дозатора на массу единичной дозы сыпучих компонентов, входящих в состав вафельного теста.

3. Выявлено влияние на характеристики вафельного теста основных технологических параметров процесса его замеса, а также кинематических и конструктивных особенностей тестосмесителя. Установлено, что на реологические свойства теста, при заданном его компонентном составе, основное влияние оказывают давление в тестосмесителе, время замеса и окружная скорость ротора турбины. Установлены зависимости между динамической вязкостью теста, временем его замеса, удельной мощностью привода тестосмесителя и кинематическими параметрами ротора турбины

смесителя (частотой вращения, окружной скоростью). Получено эмпирическое уравнение, описывающее изменение вязкости теста. Показано, что вакуумирование тестосмесителя позволяет интенсифицировать процесс замеса и уменьшить время и потребляемую мощность на его проведение. Подтверждена целесообразность установки в тестосмесителе над турбиной перфорированного цилиндра, способствующего интенсификации процесса замеса теста.

4. Установлены оптимальные технологические, кинематические и конструктивные характеристики тестосмесителя. Показано, что вязкость теста имеет минимальное значение после 30 секунд замеса при величине давления в емкости тестосмесителя 30 кПа. При этом тесто приобретает наивысшую степень однородности и готовности к выпечке. Определены наиболее рациональные параметры ротора турбины тестосмесителя ( $\omega_p=4,42$  м/с;  $n_p=10,5$  с<sup>-1</sup>;  $d_p=0,134$  м), обеспечивающие минимальное значение удельной мощности привода турбины тестосмесителя.

5. Выявлено влияние параметров процесса замеса теста на структурно-механические (предел прочности, модуль Юнга, относительную деформацию–хрупкость) и органолептические показатели вафельных листов.

Установлено, что наибольшее влияние на эти показатели оказывают давление в тестосмесителе и время доставки вафельного теста на выпечку листов. Показано, что механизм воздействия давления на хрупкость вафельных листов проявляется через степень аэрации теста, а времени хранения теста – через его вязкость. Определены наиболее рациональные значения  $R_z$ ,  $\tau_{дос}$ ,  $\mu_o$ , при которых выпеченные вафельные листы обладают наибольшей хрупкостью. Для оценки зависимости относительной деформации (хрупкости) вафельных листов от влияющих на нее параметров предложено эмпирическое уравнение регрессии.

Показано, что способ приготовления вафельного теста, в котором реализуется трехстадийный процесс с параллельно - последовательным режимом, позволяет использовать преимущества аппаратов периодического действия и доставлять непрерывно к вафельной печи свежую порцию готового теста. Это исключает затягивание и потерю гомогенности теста при выпечке, что способствует получению стабильно высокого качества вафельной продукции.

#### **Практическая значимость и реализация результатов работы.**

1. Разработана новая конструкция дозатора для сыпучих компонентов, используемых при приготовлении вафельного теста.

2. Разработано и защищено патентом на изобретение устройство для замеса вафельного теста, позволяющее снизить удельные энергозатраты на его приготовление.

3. Предложена инженерная методика расчета тестосмесителей для приготовления вафельного теста, работающих при переменном давлении.

4. Разработана и защищена патентом на изобретение конструкция автоматической станции для приготовления вафельного теста. Разработан и

изготовлен опытный образец станции, предназначенной для работы в комплексе с автоматической печью для выпечки вафельных листов производительностью до 330 кг/ч. Опытный образец автоматической станции прошел испытания в научно-производственной фирме «ПоТехИн», подтвердив проектные технические и эксплуатационные характеристики.

5. Проведена сравнительная оценка эффективности приготовления теста в различных тестомесильных устройствах. Показано, что предложенный в диссертации способ замеса теста в вакуумированном автоматическом тестомесителе позволяет получать более дешевую и качественную продукцию.

**Обоснованность и достоверность результатов исследования.** Все сырьевые компоненты, использованные для приготовления теста, соответствовали требованиям стандартов. Отбор проб для исследования проводили по гостированной методике. В работе использован комплекс независимых и взаимодополняющих методов исследования. Воспроизводимость экспериментальных данных оценивалась их статистической обработкой с анализом погрешностей. Полученные результаты сопоставлялись с данными других исследователей.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования процесса дозирования сыпучих компонентов, входящих в рецептуру вафельного теста.
2. Результаты исследования процесса замеса вафельного теста.
3. Научно-технические решения по интенсификации процессов приготовления вафельного теста и их аппаратному оформлению.
4. Методика расчета технологических, кинематических и конструктивных параметров аппаратов для приготовления вафельного теста, работающих при переменном давлении.
5. Результаты исследования зависимости структурно-механических и органолептических показателей вафельных листов от параметров процесса замеса теста.
6. Результаты разработки и испытания автоматической станции для приготовления вафельного теста.
7. Результаты сравнительной оценки эффективности замеса вафельного теста традиционными и предложенным в диссертации способами.

#### **Личный вклад соискателя.**

Соискатель принимал непосредственное участие в планировании и проведении экспериментальных исследований, обработке и анализе их результатов, подготовке заявок на изобретения, докладов и публикаций по теме диссертации. Основные положения, выносимые на защиту, получены автором лично.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы доложены на заседаниях кафедры «Технология и оборудование нефтегазовых, химических и пищевых производств» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., восьмом Саратовском салоне изобретений, инноваций и инвестиций (Саратов, 2013г),

международной научной конференции «Пищевые инновации и биотехнология» (Кемерово, апрель 2015г), 27-ой и 28-ой международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях», (Саратов, 2014, 2015 г).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 9 печатных работах, в том числе 3 статьи – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК. Получены два патента РФ на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 174 страницах печатного текста, содержит 59 таблиц и 29 рисунков. Список литературы включает 199 источников в том числе 44 – иностранных. Приложения к диссертации приведены на 48 страницах.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна, практическая значимость и реализация результатов работы, приведены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

#### **Глава 1. Анализ современного состояния проблемы и задачи исследования**

Сформулированы технологические требования к приготовлению и структуре вафельного теста, дан анализ исследований по интенсификации замеса вафельного теста, дозированию и перемешиванию сухих сыпучих компонентов рецептурной смеси. Проанализированы технологии и оборудование для замеса вафельного теста. Сформулированы требования к структурно-механическим и качественным показателям вафельных полуфабрикатов. На основе анализа современного состояния проблемы сформулированы цель и задачи исследования.

#### **Глава 2. Комплексная экспериментальная установка. объекты, методы и методология исследования**

На рисунке1 приведена схема комплексной экспериментальной установки, созданной для исследования тестомесильного оборудования вафельных производств.

Как видно из подрисуночной экспликации, установка включает весь набор оборудования, необходимого для приготовления вафельного теста.

Установка позволяет реализовать предложенный в диссертации и защищенный патентом РФ на изобретение трехстадийный способ приготовления вафельного теста, а также исследовать технологические процессы в новых устройствах для дозирования и перемешивания рецептурных компонентов и для замеса теста. Экспериментальная установка оснащена необходимыми измерительными приборами, прошедшими метрологическую поверку.

В соответствии с целью и задачами настоящей работы объектами исследования явились: доза сыпучего компонента; рецептурная смесь; вафельное тесто; вафельные листы.

Для приготовления вафельного теста по классической рецептуре использовались пищевые компоненты, предусмотренные действующими в РФ нормативно-техническими документами.

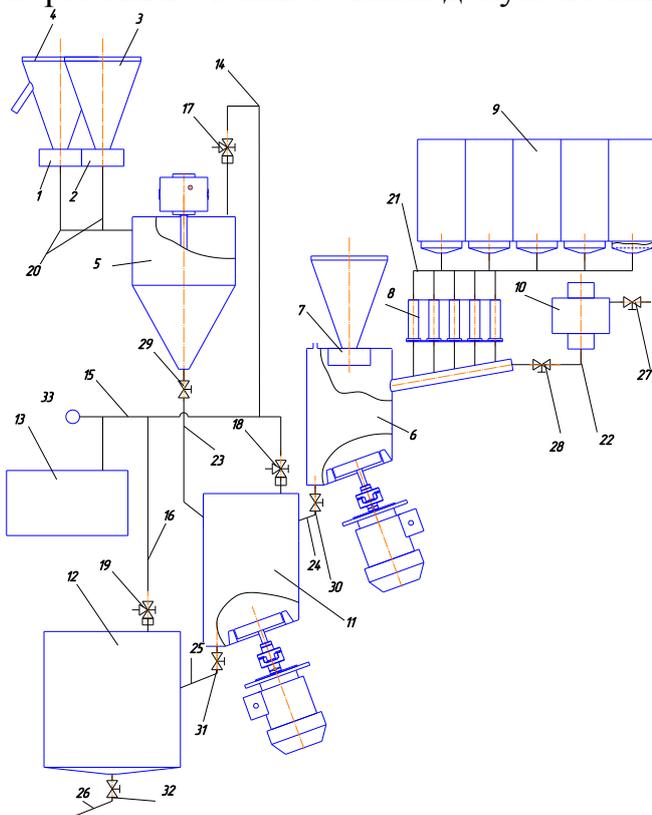


Рисунок 1 - Схема комплексной экспериментальной установки:

1,2,7-дозаторы сухих компонент;

3,4-расходные бункеры; 5-смеситель для рецептурной смеси; 6-эмульсатор; 8-дозаторы жидких компонент; 9-расходные емкости для жидких компонентов; 10-дозатор воды;

11-тестосмеситель; 12-емкость для готового теста; 13-вакуум-насос; 14,15,16-вакуум-трубопроводы; 17,18,19-электромагнитные пневмоклапаны;

20,21,22,23,24,25,26-продуктопроводы; 27,28,29,30,31,32-электромагнитные клапаны; 33-вакуумметр.

изучении точности дозирования и структурно-механических показателей вафельного листа). В работе использованы статистические методы планирования эксперимента. Математическую обработку результатов экспериментов проводили по программам пакета EXCELL для Microsoft Office и MATHCAD ENTERPRICE EDITION v11. A

В работе применялись следующие методы исследования: масс-статистический анализ (определение массы дозы и точности дозирования сыпучих компонентов); моделирование сбивающей способности смеси (влияние вакуумирования емкости тестосмесителя на степень аэрирования теста); ротационная вискозиметрия (реологические свойства теста); оптическая микроскопия (микроструктура теста); деформационно-прочностные испытания (прочность и хрупкость вафельных листов); экспертные оценки (органолептические показатели).

Динамическую вязкость вафельного теста определяли при помощи вискозиметра ротационного типа «Реотест-2». Влажность вафельного теста и изделий определяли в соответствии с ГОСТ 5900-73. Экспериментальные измерения проводили в трехкратной повторности (при изучении вязкости вафельного теста) и в десятикратной повторности (при

### Глава 3. Исследование процессов дозирования и перемешивания сухих сыпучих компонентов, входящих в рецептуру вафельного теста

Дозирование и перемешивание сухих сыпучих компонентов (муки, соды, крахмала, пищевых волокон) являются важнейшими головными технологическими операциями при приготовлении вафельного теста, определяющими в значительной степени его качественные показатели.

В диссертации предложена новая конструкция автоматизированного дозирующего устройства, основные параметры которого отрабатывались на комплексной экспериментальной установке, схема которого приведена на рисунке 1.

Новизна предложенного устройства заключается в том, что процессы подачи и дозирования сыпучих компонентов, а также их перемешивания происходят в системе с регулируемым давлением в периодическом режиме поступления компонентов в смеситель малыми дозами. За счет этого появляется возможность достичь более высокой точности дозирования компонентов и полностью исключить их потери, уменьшить продолжительность цикла перемешивания всех компонентов смеси и повысить степень ее однородности.

Дозировочное устройство содержит загрузочные бункера 3,4 и дозаторы 1,2, которые с помощью патрубка 23 соединены с емкостью смесителя 5, снабженного вакуумметром. Внутри смесителя 5 установлен ворошитель с приводом. В нижней части смесителя 5 установлен клапан 29 для выпуска отмеренной дозы сыпучего продукта в тестосмеситель 11. Приведенные на рисунке 1 дозатор и смеситель сухих компонентов работают во взаимосвязанном режиме.

Исследование процесса дозирования проводилось по двум основным сыпучим компонентам рецептурной смеси для вафельного теста (муке и соде).

Для определения основных параметров предложенной в диссертации конструкции проходного дозатора предложен теоретический метод и проведены экспериментальные исследования. При разработке теоретического метода сделано предположение, истечение сыпучих продуктов из бункера происходит в гидродинамическом режиме, что обосновывается аэрированием и постоянным перемешиванием сыпучего компонента лопастями ворошителя. Результаты теоретических расчетов сравнивались с экспериментальными данными.

Конструктивные и кинематические параметры дозировочного и смесительного устройства экспериментальной установки в результате предварительных расчетов были выбраны следующими: объем загрузочного бункера и смесителя были равны 10 литрам; диаметры вращающегося и неподвижного дисков  $D_1 = D_2 = 50\text{мм}$ ; диаметр траектории вращения оси выпускного отверстия  $D_4 = 30\text{мм}$ ; частота вращения подвижного диска  $n_d = 60\text{мин}^{-1}$ . Расчетные диаметры выпускных отверстий в дисках для муки и соды равны соответственно 12мм и 6мм, количество выпускных отверстий для муки – два, для соды – одно.

При экспериментальном исследовании дозирования сыпучего компонента проводился полный факторный эксперимент. При этом определяемым параметром являлась масса дозы сыпучего компонента  $m_3$ , получаемая за один оборот диска, а переменными параметрами являлись перепад давления между загрузочным бункером и емкостью смесителя  $\Delta P$ , диаметр выпускного отверстия дозатора  $D_3$ , частота вращения подвижного диска  $n_d$ .

По результатам экспериментов получено следующее уравнение регрессии:

$$m_3 = 119,163 - 0,413 \Delta P - 0,712 D_3 - 1,613 n_d - 0,887 \Delta P D_3 + 1,363 \Delta P n_d - 0,338 D_3 n_d \quad (1)$$

Анализ уравнения (1) свидетельствует о сложной зависимости массы дозы сыпучего компонента от исследованных определяющих факторов. При заданном диаметре выпускного отверстия и числе оборотов подвижного диска определяющим технологическим параметром процесса дозирования является перепад давления  $\Delta P$ .

В таблице 1 приведены результаты экспериментального исследования влияния  $\Delta P$  на дозирование муки. Там же для сравнения приведены расчетные данные.

Таблица 1 - Расчетные и экспериментальные данные по дозированию  
муки

№ п/п	Давление в смесителе, $P_2$ , кПа	Перепад давления, $\Delta P$ , кПа	Расчетная скорость истечения компонента, $V$ , м/с	Расчетная масса одной дозы, $m_p$ , кг	Экспериментальная масса одной дозы, $m_3$ , кг	Расчетная масса 25 доз $M_p$ , кг	Экспериментальная масса 25 доз, $M_3$ , кг
1	90	10	3,0	0,045	0,041	1,125	1,120
2	80	20	4,18	0,063	0,064	1,575	1,550
3	70	30	5,1	0,070	0,071	1,750	1,735
4	60	40	5,87	0,089	0,090	2,255	2,240
5	50	50	6,56	0,099	0,100	2,475	2,470
6	40	60	7,18	0,109	0,110	2,725	2,715
7	30	70	7,82	0,1195	0,117	2,962	2,930
8	20	80	8,28	0,136	0,140	3,400	3,300

Как видно из таблицы 1, с увеличением перепада давления увеличивается значение массы одной дозы и соответственно общая масса, требуемая по рецептуре смеси. При этом экспериментальные значения масс хорошо согласуются с расчетными значениями. Наилучшее согласование расчетного, экспериментального и заданного по рецептуре значения массы дозы муки (соответственно 0,1195, 0,117, и 0,12 кг) получено при перепаде давления между загрузочным бункером и смесителем, равном 70 кПа. При этом относительная погрешность дозирования в эксперименте составила 2,3%, что ниже относительной погрешности, допускаемой технологическими требованиями по рецептурной смеси и составляющей 5%.

Относительная погрешность дозирования соды составила 3,9%, что также ниже допускаемой технологической погрешности.

Испытания предложенного дозатора на других сыпучих компонентах (сахар, крахмал, пищевые волокна) показали его надежность, универсальность и стабильно высокую точность дозирования при изменении относительной влажности компонентов в диапазоне 9-15%. Поэтому исследованный тип дозатора был использован, после соответствующей корректировки конструктивных и кинематических параметров, при разработке дозирующих устройств для всех основных сухих компонентов, входящих в рецептуру вафельного теста.

В соответствии с предложенным способом приготовления вафельного теста все сыпучие компоненты из своих индивидуальных дозаторов подаются в смесительное устройство, основной функцией которого является приготовление однородной рецептурной смеси. Как показали специальные исследования, проведенные методом просвечивающей микроскопии, предложенное в диссертации смесительное устройство обеспечивает получение рецептурной смеси с высокой степенью однородности состава.

Высокая степень однородности смеси сухих компонентов достигается прежде всего за счет того, что все компоненты подаются из дозаторов в смеситель периодически малыми факельными дозами. Это позволяет осуществлять процессы перемешивания с начального момента попадания компонентов в вакуумированную емкость смесителя. После предварительного перемешивания в факелах образующаяся смесь подвергается механическому воздействию ворошителя, установленного в смесительном устройстве и обеспечивающего окончательное перемешивание с получением рецептурной смеси однородного состава.

К достоинствам предложенного смесителя относится также то, что перемешивание компонентов происходит в герметичной вакуумированной емкости, что исключает любые потери продукта, а также уменьшает удельные энергозатраты за счет снижения потерь на трение в разреженной воздушной среде.

#### **Глава 4. Экспериментальное исследование процесса замеса вафельного теста**

Параметры готового теста оказывают определяющее влияние на качество вафельных листов и изделий из них. В свою очередь, структура и свойства теста зависят от процессов, происходящих при его замесе.

В диссертации предложено и защищено патентом РФ на изобретение новое устройство (тестосмеситель) для замеса вафельного теста. Новизна запатентованного тестосмесителя заключается прежде всего в том, что процесс замеса теста происходит в герметичной вакуумированной емкости. За счет этого обеспечивается регулирование содержания воздуха в тесте, его оптимальная аэрация и повышение качественных показателей вафельных полуфабрикатов. Кроме того, проведение замеса теста в условиях вакуума

приводит к снижению его вязкости и окисляемости, времени на замес и удельных энергозатрат.

На рисунке 2 приведена схема тестосмесительного модуля, использованного в составе комплексной экспериментальной установки (см. рисунок 1). Тестосмеситель работает следующим образом. В герметичной емкости 1 создается вакуум за счет откачки воздуха через патрубок 4 с помощью вакуум-насоса. С помощью привода 2 обеспечивается вращение ротора турбины 3. Через патрубок 6, расположенный ниже диффузора 15, в тестосмеситель подается эмульсия, а через патрубок 5, установленный над диффузором, подается смесь сыпучих компонентов. Под действием сил тяжести сыпучие компоненты и эмульсия опускаются вниз тестосмесителя, где попадают в поле действия вращающегося ротора турбины. Под действием центробежных сил, создаваемых при вращении ротора, образующаяся вязкопластичная смесь продавливается через отверстия в боковой поверхности статора турбины 12, делится на многочисленные потоки и отбрасывается к стенке емкости 1. Затем смесь поднимается вверх по каналу, образованному внешней поверхностью перфори-

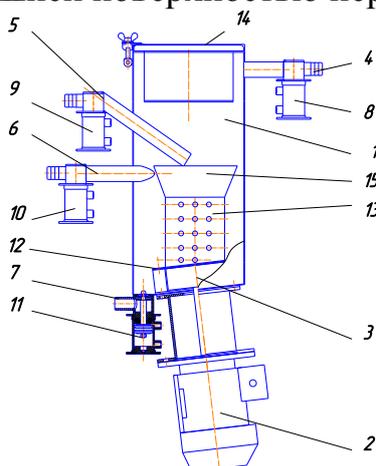


Рисунок 2 – Схема тестосмесительного модуля:

1-емкость; 2 – электродвигатель;  
3 – ротор турбины; 4 – патрубок для откачки воздуха; 5 – патрубок для подачи сухих компонентов; 6 – патрубок для подачи эмульсии; 7 – патрубок для слива готового теста; 8, 9, 10, 11 – клапаны пневматические; 12 – статор турбины; 13 – перфорированный цилиндр; 14 – герметизирующая крышка; 15 – диффузор.

рованного цилиндра 13 и емкостью 1, проходит через отверстия цилиндра 13, делясь на многочисленные струи, вновь опускается к турбине, захватывая частицы сыпучих компонентов. Таким образом обеспечивается интенсификация процессов перемешивания всех компонентов и получение вафельного теста требуемой консистенции.

Исследовано влияние конструктивных и кинематических параметров, а также технологических режимов работы тестосмесителя на удельные энергозатраты при замесе и качество получаемого теста.

В производстве вафельных листов большое значение имеет вязкость теста, от которой зависит время замеса и удельные энергозатраты на замес, а также заполняемость форм для выпечки листов.

Вязкость теста формируется по ходу его замеса и поэтому определяется многими факторами.

Вязкость различных образцов вафельного теста, отличавшихся временем его замеса, сравнивали при начальном градиенте скорости, равном  $5,4 \text{ с}^{-1}$ , поскольку в процессе приготовления тесто испытывает механическое воздействие от рабочих органов, примерно равное

этой величине. Эту вязкость считали начальной и обозначали  $\mu_0$ . Был проведен полный факторный эксперимент по определению зависимости вязкости от давления в тестосмесителе  $P_3$ , времени замеса теста  $\tau_{\text{зам}}$  и окружной скорости вращения ротора турбины  $\omega_p$ . Полученное уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\mu_0 = 0,863 - 0,093 P_3 - 0,038 \tau_{\text{зам}} + 0,013 \omega_p + 0,013 P_3 \tau_{\text{зам}} - 0,013 P_3 \omega_p + 0,013 \tau_{\text{зам}} \omega_p \quad (2)$$

На рисунках 3 и 4 приведены зависимости вязкости теста и удельной мощности от времени замеса теста при различном давлении в тестосмесителе.

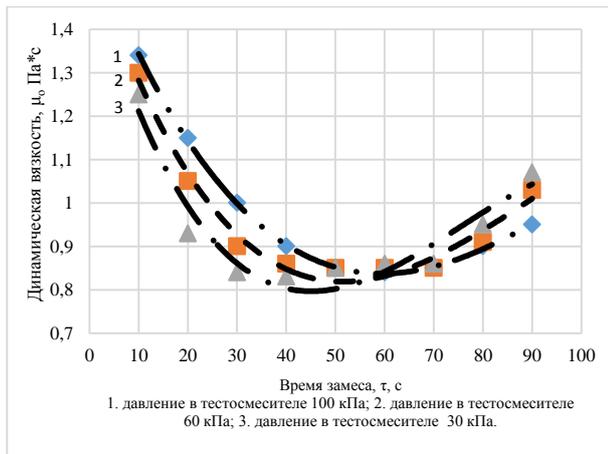


Рисунок 3 – Влияние на вязкость теста времени его замеса при различной величине давления в тестосмесителе

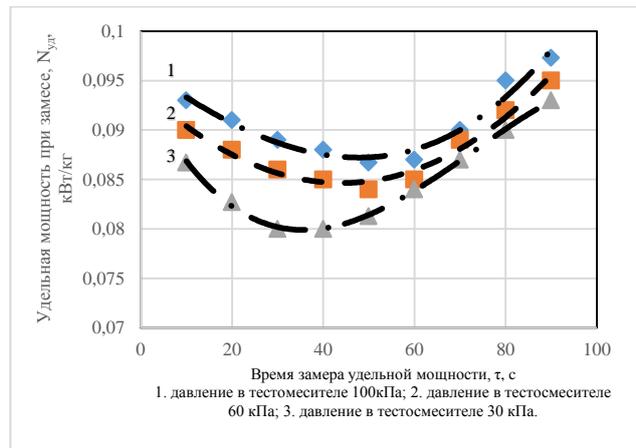


Рисунок 4 – Влияние на удельную затрачиваемую мощность времени замеса теста при различной величине давления в тестосмесителе

Анализ полученных результатов показал, что наблюдается временной оптимум, при котором вязкость теста и потребляемая на его замес мощность имеют минимальное значение, соответствующее готовности теста. При атмосферном давлении этот минимум наблюдается при 60 секундах замеса, а при вакуумировании тестосмесителя до 30 кПа - при 40 секундах замеса. Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование вакуума позволяет снизить вязкость теста, а также уменьшить время и потребляемую мощность на его замес.

Как видно из рисунков 4 и 5, увеличение времени замеса теста больше оптимальных значений будет приводить к повышению вязкости теста и удельных энергозатрат на его замес. Кроме того, повышение вязкости теста усложнит его транспортировку к вафельной печи, а также дозировку и равномерное наполнение форм для вафельных листов.

Это подтверждается также приведенными в таблице 2 данными о влиянии на вязкость теста времени его доставки к вафельной печи на выпечку.

Тесто готовилось тремя способами замеса: в тестосмесителе с поворотной дежой с длительностью замеса 20 минут; в турбомиксере ТМ-60 в течение 3 минут и в разработанном тестосмесителе в течение 40 секунд.

Таблица 2 - Влияние на вязкость теста  $\mu_0$  (Па\*с) времени его доставки к вафельной печи

Способ замеса	Время доставки готового теста на выпечку вафельных листов, $\tau_{\text{дос}}$ , мин								
	0	3	5	10	15	20	25	30	35
В тестосмесителе с поворотной дежей	2,5	2,5	2,5	3,0	3,2	3,30	3,5	4,0	4,5
В турбомиксере ТМ-60	1,0	1,0	1,1	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	3,0
В разработанном тестосмесителе	0,84	0,84	0,85	0,9	0,95	1,5	2,0	2,2	2,5

Как видно из результатов, представленных в таблице 2, самое низкое значение начальной вязкости теста имеет место при его замесе в предложенном в диссертации тестосмесителе. При производительности вафельной печи 100 кг/ч последняя порция теста, замешанного по традиционному способу и в турбомиксере ТМ-60, достигнет печи через 40 минут, а замешанного в предложенном тестосмесителе - через 5 минут. Поэтому вязкость теста перед заполнением вафельных форм для третьего способа замеса будет существенно ниже, чем для сравниваемых способов (см. таблицу 2), что должно улучшить заполняемость форм, уменьшить расслаивание теста и повысить качество готовой продукции.

На рисунке 5 и в таблице 3 приведены данные по микроструктуре и однородности вафельного теста, полученные на экспериментальном тестосмесителе при давлении в нем 30кПа.

Таблица 3 – Сравнительная характеристика однородности теста

Время замеса вафельного теста, с	10	20	40
Однородность вафельного теста, %	20	60	100

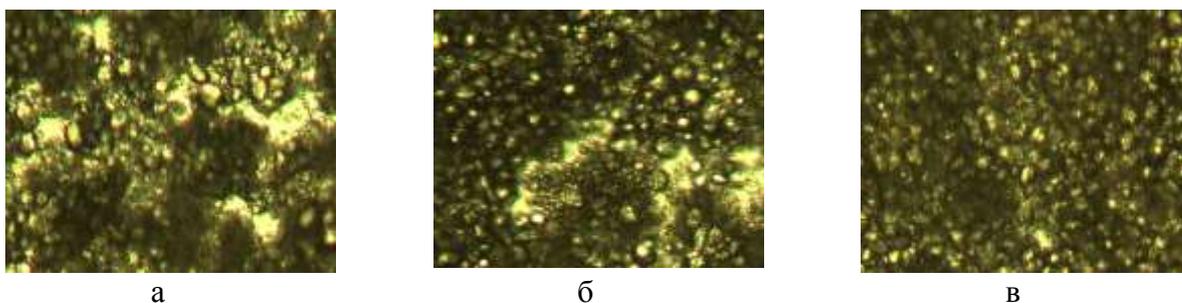


Рисунок 5. - Оптические микрофотографии образцов вафельного теста с разным временем перемешивания исходных компонентов (в секундах):

а – 10; б – 20; в – 40

Однородность структуры теста характеризовалась статистическим соотношением мелких и крупных фракций крахмальных зерен и клейковины, выраженным в процентах.

Видно, что после 40 секунд замеса (рисунок 5в) структура теста имеет высокую степень однородность, что свидетельствует о готовности вафельного теста к дальнейшему использованию для выпечки вафельных листов.

На качество вафельного теста большое влияние оказывает степень его аэрации, которая оценивается показателем сбиваемости (плотностью) теста.

Слишком высокая насыщенность воздухом вафельного теста приводит к падению его плотности и росту пористости, что в конечном итоге снижает качество вафельных изделий. Слишком низкое содержание воздуха в тесте делает его чрезмерно плотным и ломким, что также нежелательно.

На рисунке 6 приведены результаты исследования влияния давления в тестосмесителе и времени замеса теста на его плотность.

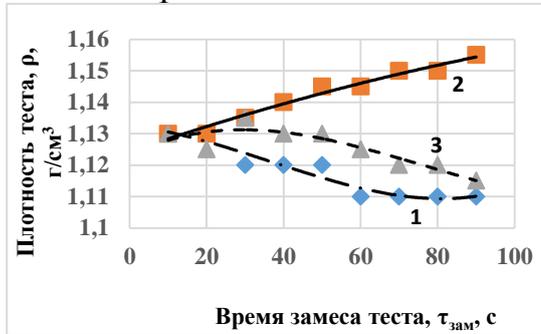


Рисунок 6 – Зависимость плотности теста от времени замеса при разном давлении (кПа) в тестосмесителе: 1–100; 2–30; 3–переменное (первые 20с–при 30 кПа, затем 20с–при 100 кПа)

Видно, что с увеличением времени замеса при атмосферном давлении плотность теста монотонно падает, что свидетельствует о дополнительной аэрации теста.

При замесе теста под вакуумом с ростом

времени замеса плотность теста увеличивается, что свидетельствует о снижении степени его аэрации. При переменном давлении в тестосмесителе, когда в первые 20 секунд замес теста проводится под вакуумом при  $P=30$  кПа, а в остальное время - при атмосферном давлении, появляется возможность регулировать степень аэрации теста.

При этом общее время замеса теста до достижения его однородности уменьшается, что свидетельствует об интенсификации процесса замеса теста.

На рисунках 7 и 8 показано влияние времени замеса, а также кинематических и конструктивных параметров ротора турбины тестосмесителя на вязкость теста и удельную мощность на его замес.

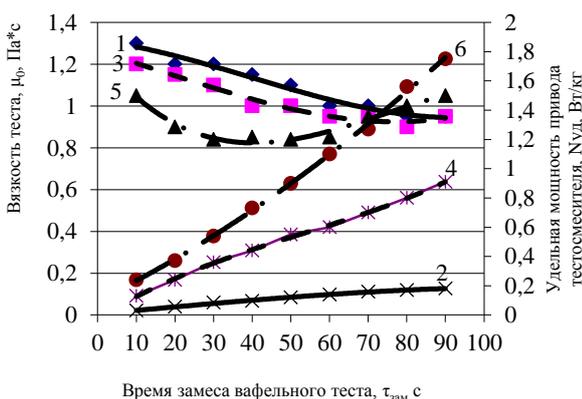


Рисунок 7 - Изменение вязкости вафельного теста и удельной мощности от времени замеса при частоте вращения ротора турбины тестосмесителя  $n_p=10,5\text{ с}^{-1}$ , [сменные диаметры ротора турбин соответственно 0,077м (1,2), 0,115м (3,4), 0,134м (5,6)]

1,3,5–для вязкости; 2,4,6–для удельной мощности

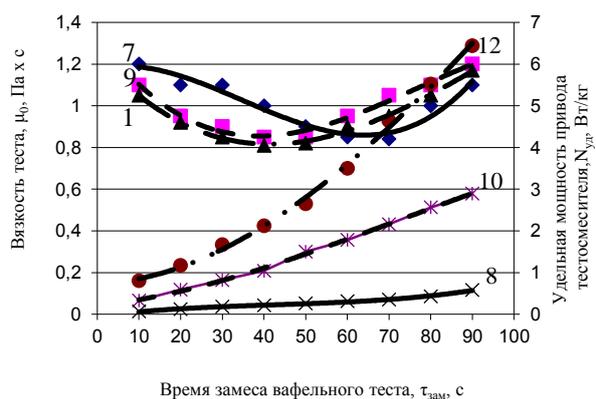


Рисунок 8 - Изменение вязкости вафельного теста и удельной мощности от времени замеса при частоте вращения ротора турбины тестосмесителя  $n_p=15,8\text{ с}^{-1}$  [сменные диаметры ротора турбин соответственно 0,077м (7,8), 0,115м (9,10), 0,134м (11,12)]

7,9,11–для вязкости; 8,10,12–для удельной мощности

В опытах окружная скорость ротора турбины, определяемая как произведение частоты вращения ротора и его диаметра, изменялась от 2,5 до 7 м/с, частота вращения ротора составляла 10,5 и 15,8 с<sup>-1</sup>, диаметры турбины были равны соответственно 0,077; 0,115 и 0,134 м. Анализ полученных результатов показал, что вязкость теста и удельная потребляемая мощность существенно зависят от диаметра ротора турбины и частоты вращения. Установлено, что наиболее рациональное значение окружной скорости ротора турбины составляет 4,42 м/с ( $n = 10,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $d=0,134 \text{ м}$ ). При данных конструктивных и кинематических параметрах вязкость теста достигает минимальных значений при времени замеса 40 с, обеспечивающих однородность теста и невысокие энергозатраты на привод ротора турбины тестосмесителя.

Выявлено также влияние на время замеса теста и на его вязкость перфорации цилиндра, установленного над турбиной тестосмесителя. Как видно из результатов, представленных в таблице 4, применение перфорации данного конструктивного элемента тестосмесителя приводит к получению теста с минимальной вязкостью и однородной структурой уже после 30 секунд замеса.

Таблица 4. Влияние перфорации цилиндра тестосмесителя на время замеса вафельного теста и на его вязкость

Наименование параметров	Размерность	Время замеса, $\tau_{\text{зам}}$ , с								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Вязкость $\mu_0$ с не перфорированным цилиндром	Па*с	1,1	1,0	0,950	0,9	0,84	0,85	0,96	0,95	1,0
Вязкость $\mu_0$ с перфорированным цилиндром	Па*с	1,05	0,9	0,84	0,85	0,840	0,85	0,95	1,0	1,05

При работе тестосмесителя с цилиндром без перфорации минимум вязкости теста наблюдается только через 50 секунд замеса. Все это свидетельствует о том, что перфорация способствует интенсификации процесса замеса теста, уменьшению времени, а следовательно, и удельных энергозатрат на замес.

## Глава 5. Исследование влияния параметров процесса замеса теста на характеристики вафельных листов

Качество вафельных листов характеризуется структурно-механическими и органолептическими показателями, которые взаимосвязаны между собой.

Одним из основных показателей качества вафельных изделий является их хрупкость. Чем более хрупкими являются вафли, тем выше считаются их органолептические показатели. Хрупкость характеризовали величиной относительной деформации  $\epsilon$  в момент разрушения образца вафельного листа.

Снижение относительной деформации образца свидетельствовало о росте его хрупкости.

Исследовали влияние на относительную деформацию (хрупкость) листов давления в тестосмесителе  $P_3$ , вязкости теста  $\mu_0$  и времени доставки теста на выпечку  $\tau_{\text{дос}}$ . Результаты экспериментального исследования обрабатывали с использованием методики регрессионного анализа.

Полученное уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\varepsilon = 1,219 + 0,201 P_3 + 0,204 \tau_{\text{дос}} + 0,049 \mu_0 + 0,086 P_3 \tau_{\text{дос}} + 0,066 P_3 \mu_0 - 0,001 \tau_{\text{дос}} \mu_0 \quad (3)$$

Анализ уравнения (3) показывает, что сильнее всего относительная деформация (хрупкость) листов зависит от давления в тестосмесителе и времени доставки теста. Повышение давления в тестосмесителе и увеличение времени доставки теста приводят к возрастанию относительной деформации и уменьшению хрупкости вафельных листов. Установлено, что наилучшие показатели хрупкости выпекаемых вафельных листов достигаются при поддержании в тестосмесителе давления 30 кПа, вязкости теста после замеса 0,85 Па\*с и времени доставки теста до выпечки не более 5 минут.

Проведен сравнительный анализ структурно-механических и органолептических характеристик вафельных листов, выпеченных из теста, приготовленного в трех тестомесильных устройствах периодического действия: с поворотной дежой, турбомиксере ТМ-60 и в разработанном вакуумированном тестосмесителе.

Для сравниваемых устройств масса замешиваемого теста составляла соответственно 60; 66 и 7,5 кг, время замеса одной порции теста – 20; 3 и 0,5 минут, время использования последней порции теста для выпечки вафельных листов – 35; 35 и 5 минут. Результаты сравнительного анализа приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты сравнительного анализа эффективности замеса вафельного теста в различных тестомесильных устройствах

Наименование параметра	Тип тестомесильного устройства		
	С поворотной дежой	Турбомиксер ТМ-60	Вакуумированный тестосмеситель
Время доставки последней порции теста, $\tau_{\text{дос}}$ , мин	35	35	5
Вязкость теста после замеса, $\mu_0$ , Па*с	4,5	2,0	0,845
Предел прочности, $\delta_{\text{пч}}$ , МПа	2,61	2,44	1,44
Относительная деформации, $\varepsilon$ , %	2,1	1,92	1,24

Как видно из представленных в таблице 6 результатов, предложенный тестосмеситель дает возможность, по сравнению с существующими аналогами, готовить тесто малыми порциями и доставлять его на выпечку в течение 5 минут.

Это позволяет поддерживать вязкость теста на оптимальном уровне, обеспечивать хорошую заполняемость вафельных форм без отеков и получать вафельные листы с более высокими структурно-механическими и органолептическими показателями (степень однородности, относительная деформация, предел прочности, пористость, хрупкость).

Результаты экспериментального исследования процесса замеса вафельного теста использованы также для разработки инженерной методики расчета вакуумированных тестосмесителей, которая изложена в диссертации.

## **Глава 6. Разработка автоматической станции для приготовления вафельного теста**

Разработана и защищена патентом РФ на изобретение конструкция автоматической станции для приготовления вафельного теста. Фотография станции приведена на рисунке 9.



Рисунок 9 - Общий вид автоматической станции для приготовления вафельного теста

Автоматическая станция позволяет получать вафельное тесто малыми порциями до 10 кг в режиме непрерывного замеса.

Номинальная производительность станции составляет 330кг/ч, масса – 272 кг, длина – 1,2 м, ширина – 0,7м, высота – 2,4м.

На станции все операции, включая подачу муки, выполняются автоматически без участия обслуживающего персонала с

помощью микропроцессорной системы контроля и управления технологическим процессом. Станция прошла опытно - промышленные испытания и показала высокую эксплуатационную и энергетическую эффективность.

### **Заключение**

1. Установлено, что наиболее перспективным типом оборудования для приготовления вафельного теста являются ротационно-вихревые смесители, работающие в условиях контролируемого вакуумирования системы.

2. Предложены способ получения вафельного теста и устройство для его осуществления, защищённые патентом РФ на изобретение.

3. Разработана конструкция дозирочно-смесительного устройства для сыпучих компонентов рецептуры вафельного теста, обеспечивающего

высокую точность дозирования и получение однородной смеси. Предложена методика определения его оптимальных параметров.

4. Разработана конструкция тестосмесителя для приготовления вафельного теста, обеспечивающего интенсификацию процесса замеса теста, уменьшение времени и энергозатрат на замес. Экспериментально отработаны оптимальные технологические и конструктивно-кинематические параметры тестосмесителя. Предложена и апробирована методика инженерного расчета вакуумированных тестосмесителей. Показано, что удельные затраты электрической мощности на замес вафельного теста в разработанном тестосмесителе на 28,6% меньше чем в турбомиксере – прототипе.

5. Выполнен сравнительный анализ структурно-механических и органолептических показателей вафельных листов, выпеченных из теста, приготовленного с помощью разработанного тестосмесителя и существующих аналогов. Показано, что наилучшие показатели выпекаемой продукции обеспечивает предложенный в диссертации тестосмеситель.

6. Разработана и защищена патентом РФ на изобретение автоматическая станция для приготовления вафельного теста. Станция прошла опытно-промышленные испытания и показала высокую эксплуатационную и экономическую эффективность. Общие удельные энергозатраты станции в 2,67 раза меньше по сравнению с наиболее совершенным отечественным прототипом.

### Условные обозначения

$D_1$  – диаметр вращающегося диска дозатора, мм;  $D_2$  – диаметр неподвижного диска дозатора, мм;  $D_3$  – диаметр выпускного отверстия дозатора, мм;  $D_4$  – диаметр траектории вращения оси выпускного отверстия дозатора, мм;  $n_d$  – частота вращения подвижного диска,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $\Delta P$  – перепад давления между загрузочным бункером и емкостью смесителя сухих компонентов, кПа;  $m_3$  – экспериментальная масса одной дозы сыпучего компонента, кг;  $m_p$  – расчетная масса одной дозы сыпучего компонента, кг;  $P_1$  – давление в загрузочном бункере дозатора, кПа;  $V$  – расчетная скорость истечения компонентов, м/с;  $P_2$  – давление в смесителе сухих компонентов, кПа;  $P_3$  – давление в тестосмесителе, кПа;  $\mu$  – динамическая вязкость,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\mu_0$  – начальная динамическая вязкость,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\tau_{\text{зам}}$  – время замеса теста, мин;  $d_p$  – диаметр ротора турбины, м;  $n_p$  – частоте вращения ротора турбины тестосмесителя,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\omega_p$  – окружная скорость вращения ротора турбины, м/с;  $\tau_{\text{дос}}$  – время доставки последней порции готового теста на выпечку вафельных листов, мин;  $\rho$  – плотность теста,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $N_{\text{уд}}$  – удельная мощность замеса теста,  $\text{Вт}/\text{кг}$ ;  $\varepsilon$  – относительная деформация, %;  $\sigma_{\text{пч}}$  – предел прочности, МПа;  $E$  – модуль Юнга, МПа.

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Старшов Д.Г., Исследование и разработка вакуумной тестомесильной машины [Текст]/ Д.Г. Старшов, В.М.Седелкин, Г.И Старшов// Техника и технология пищевых производств. – 2017, -Т.45.– №2. – С.99-105

2. Старшов Д.Г., Исследование и разработка автоматизированного устройства для дозирования и смешивания сыпучих компонентов [Текст]/ Д.Г. Старшов, В.М.Седелкин, Г.И Старшов, А.И. Никитин// XXI век итоги прошлого и проблемы настоящего *плюс*. – 2017, 02(36)/03(37) –С.58-63

3. **Старшов Д.Г.**, Разработка автоматической станции для приготовления вафельного теста [Текст]/ Д.Г. Старшов, В.М.Седелкин, Г.И Старшов, А.И. Никитин// Вестник ВГАУ, Воронеж, 2018, - Том 11, №1(56) – С.165-179

#### Патенты

4. Пат. №2566784 Российская Федерация, МПК В01F 3/12, В01F 5/00, В01F 5/12, В01F 7/18, В01F 3306, Способ получения вязко-пластичной смеси и устройство для его осуществления [Текст] / В.Н.Сопляченко, Г.И.Старшов, **Д.Г.Старшов**, А.И.Никитин, С.Н.Никоноров, Л.Н.Потехина, В.М.Седелкин, К.М.Далузян; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Сопляченко Вячеслав Николаевич. - №201411293/05; заявл. 02.04.14 г.; опубл. 27.10.15, Бюл. №30 – 2 с.: ил

5. Пат. №2581483 Российская Федерация, МПК А 21С 1/02, Автоматическая станция для приготовления вязко-текучей смеси [Текст] / В.Н.Сопляченко, Г.И.Старшов, **Д.Г.Старшов**, А.И.Никитин, С.Н.Никоноров, Л.Н.Потехина, В.М.Седелкин, К.М.Далузян; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Сопляченко Вячеслав Николаевич. - №2015100735/13; заявл. 12.01.15 г.; опубл. 20.04.16, Бюл.- №11. – 9с.: ил

#### Публикации в других изданиях

6. Сопляченко В.Н., Автоматическая станция приготовления вафельного теста [Текст]/ В.Н. Сопляченко, В.М. Седелкин, С.Н. Никоноров, Г.И. Старшов, А.Н. Черников, **Д.Г. Старшов**, Л.Н. Потехина // Восьмой Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций: Сб.. – Саратов: Буква. - 2013. – С. 119-120. – ISBN 978-5-905472-24-8

7. **Старшов Д.Г.** Исследование и разработка автоматизированного смесителя для приготовления многокомпонентных вязко-пластичных смесей [Текст] / Д.Г. Старшов, В.М. Седелкин // Молодые ученые – науке и производству: Сборник трудов по итогам региональной научно-практической конференции с международным участием. – Энгельс: ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А. - 2014. – С. 83-87. – ISBN 978-5-9905521-5-9

8. **Старшов Д.Г.** Исследование и разработка автоматической станции для приготовления вафельного теста [Текст] / Д.Г. Старшов, В.М. Седелкин // XXVII Международная научная конференция, «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ - 27, «Участник школы молодых ученых и программы УМНИК», в 12 т. Т. 12: в 2 ч. Часть 2. – Саратов: Сарат. Гос. Техн. ун – т, 2014. – С. 243-246. – ISBN 978-5-7433-2386-9.

9. **Старшов Д.Г.**, Исследование и разработка тестосмесителя для приготовления вафельного теста [Текст] / Д.Г. Старшов, В.М. Седелкин, Г.И Старшов, В.Н. Сопляченко /Пищевые инновации и биотехнологии: материалы Международной научной конференции. 28 апреля 2015 г. – Кемерово: ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет), 2015. – С. 214-216.

Подписано в печать 07.10.2019 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 142.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.  
410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77