

На правах рукописи

РЫЖОВ Виталий Викторович

**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА
СБИВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ХЛЕБА
ИЗ ПШЕНИЧНОЙ МУКИ**

Специальность 05.18.12 - Процессы и аппараты
пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий»(ФГБОУ ВО ВГУИТ)

Научный руководитель: - доктор технических наук, профессор
Магомедов Газибег Омарович
(ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»)

Официальные оппоненты:- **Черных Валерий Яковлевич**
доктор технических наук, профессор
(ФГБНУ «Научно-исследовательский Институт хлебопекарной промышленности»),
Руководитель отдела пищевых сред
Дерканосов Николай Иванович
кандидат технических наук
(Торгово-промышленная палата Воронежской области), руководитель органа По сертификации Центра качества, сертификации и мониторинга Торгово-промышленной палаты Воронежской области

Ведущая организация:- ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет», (ФГБОУ ВО «ПГУ») г. Орел

Защита состоится «17» декабря 2015 года в 10³⁰ 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 на автореферат (в двух экземплярах), заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета университета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети «Интернет» на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» www.vsu.ru «14» октября 2015 г.

Автореферат размещен в сети Интернет на официальном сайте высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ по адресу: <https://vak2.ed.gov.ru> и на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» www.vsu.ru «22» сентября 2015 г.

Автореферат разослан «3» ноября 2015 года.

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.

Решение проблемы качества и безопасности пищевых продуктов зависит не только от изменения состава ингредиентов и сбалансированности структуры питания, но и от оборудования, обеспечивающего требуемые показатели. Особенно остро эта задача стоит в хлебопекарной отрасли при отработке инновационной технологии получения хлебобулочных изделий на основе сбивного теста.

Наиболее энергоемкими процессами при приготовлении сбивного полуфабриката являются процессы перемешивания и сбивания, которые в значительной мере отражают качество и себестоимость готовой продукции.

Разрешение основного технического противоречия между энергозатратами и производительностью при интенсивных замесах открывает реальные возможности в развитии этого процесса при строгих ограничениях, накладываемых на показатели качества готовых изделий.

Научные достижения в данной области подготовили условия для численно-аналитического моделирования этого процесса с возможностью использования полученных результатов при проектировании месильно-сбивальных машин нового поколения.

Существенный вклад в развитие технологии смешивания дисперсных систем, в том числе хлебопекарных и кондитерских внесен отечественными учеными Бакиным И.С., Иванец В.Н., Черных В.Я. Магомедовым Г.О., Пономаревой Е.И., и др. Однако для реализации научных достижений в области процессов смешивания и сбивания при производстве сбивного теста необходимо разработать экспериментальную и промышленную сбивальные установки и исследовать основные режимные параметры процессов и адаптировать их к машинной технологии сбивного хлеба.

Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Технологии хлебопекарного, кондитерского макаронного и зерноперерабатывающего производств» (ТХКМЗП) Воронежского государственного университета инженерных технологий в рамках НИР «Разработка энерго- и ресурсосберегающих чистых технологий переработки сельхоз-сырья в конкурентоспособные хлебобулочные, кондитерские и макаронные функциональные продукты на основе медико-биологических воззрений» (№ г. р. 01970008815, на 2011-2015 гг.).

Цель работы и задачи исследований. Целью работы является создание нового типа сбивальной машины и исследование ее режимов

функционирования для определения рациональных технологических показателей теста.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- 1) Анализ существующего оборудования для приготовления хлебопекарного теста;
- 2) Исследование кинетики процесса пенообразования системы «мука-вода»;
- 3) Определение рациональных режимов приготовления сбивного хлебопекарного теста;
- 4) Разработка математических моделей перемешивания бездрожжевого теста и насыщения теста воздухом;
- 5) Разработка и создание устройства для приготовления сбивного теста механическим способом разрыхления;
- 6) Исследование влияния конструктивных элементов установок на качество сбивного полуфабриката и определение времени его приготовления;
- 7) Применение дополнительных нагревательных элементов для выпечки сбивного хлеба.

Научные положения, выносимые на защиту:

- Кинетика пенообразования в системе «мука-вода» в зависимости от различных технологических параметров.
- Регрессионная модель процесса приготовления сбивного теста.
- Математические модели перемешивания и сбивания бездрожжевого теста.
- Конструкция промышленной сбивальной машины.
- Способ перемешивания рецептурных компонентов с заменой части воды измельченным льдом.
- Выпечка сбивного хлеба с применением кварцевых углеродных нагревателей.

Научная новизна работы.

Обоснована целесообразность получения хлебобулочных изделий в промышленных объемах путем механического разрыхления. Получено экспериментальное соотношение, учитывающее зависимость объемной массы теста и удельного объема хлеба от давления, частоты вращения месильного органа и продолжительности сбивания, обосновывающее получение рациональных режимов приготовления. Доказано, что наиболее эффективным устройством перемешивания сбиваемого теста является мешалка рамного типа с 4 элементами. На основе диффузионных представлений разработана математическая модель процесса перемешивания, позволяющая оценивать в динамике неоднородность перемешиваемого субстрата. Предложена математическая модель насыщения бездрожжевого теста воздухом, позволяющая прогнозировать степень насыщения сбивного

теста воздухом. Для уменьшения времени приготовления сбивного теста с одновременным его охлаждением предложена технология добавления переохлажденного льда с температурой не ниже -20°C .

Новизна технических решений подтверждена 3 патентами РФ №-2457681, 2462036, 2471351.

Практическая ценность.

Разработан действующий опытный образец сбивальной машины для приготовления сбивного хлебопекарного теста, защищенный патентом РФ № 2462036.

Предложена технология приготовления смеси рецептурных компонентов с использованием твердой фазы воды (Пат. РФ №-2471351).

Проведены промышленные апробации производства сбивных хлебобулочных изделий из смеси ржаной и пшеничной муки на ОАО «Хлебозавод № 7» г. Воронеж и ЗАО «Белогорье» г. Шебекино (акты производственных испытаний), подтвердившие положительные результаты исследований.

Объектом исследования является технология, ассортимент сбивных хлебобулочных изделий и процессы перемешивания и пенообразования в сбивальной установке.

Предметом исследования являются технологические параметры получения сбивных хлебобулочных изделий.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены в период с 2009 по 2012 гг. на отчетных научных конференциях Воронежского государственного университета инженерных технологий; Второй научно-технической конференции «Новое в технологии и технике пищевых производств» - (Воронеж, 2010), «Современное состояние и перспективы развития пищевой промышленности и общественного питания» (г. Челябинск, 2009); Международной научно-технической интернет-конференции «Энергосберегающие процессы и аппараты в пищевых и химических производствах (ЭПАХПП-2011)»; Межрегиональной научно-практической конференции «Современное хлебопекарное производство, перспективы его развития» (Екатеринбург, 2010); 49-ой отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГТА (Воронеж, 2010).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 12 научных трудов, в том числе 2 статьи из списка ВАК РФ, получено 3 патента РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, которые посвящены экспериментальным исследованиям, выводов, приложений и представлена на 141 странице машинописного текста, в таблицах и рисунках. Библиография включает 136 наименований, в том числе 19 на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована ее цель, отмечена научная новизна и практическая ценность выполненных исследований.

В первой главе уделено особое внимание приготовлению хлебобулочных изделий различными способами. Дана классификация и рассмотрено оборудование для приготовления хлебопекарного теста, выпускаемое в России и за рубежом. Рассмотрен механизм образования структуры сбивного теста. Приведены основные типы конструкций хлебопекарных печей, представлена их классификация. Рассмотрены перспективные способы использования теплового излучения.

На основании проведенного анализа литературы сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе описаны экспериментальные исследования, которые проводились на кафедре «Технологии хлебопекарного, кондитерского макаронного и зерноперерабатывающего производств» (ТХКМЗП), в условиях филиала кафедры ТХКМЗП на ОАО «Хлебозавод № 7» (г. Воронеж).

Исследовали режимы приготовления сбивного хлебопекарного теста.

Для проведения исследований использовали следующее сырье: муку пшеничную хлебопекарную первого сорта (ГОСТ Р-52189-2003); муку пшеничную хлебопекарную второго сорта (ГОСТ Р-52189-2003); муку ржаную хлебопекарную обдирную (ГОСТ 7045-90); концентрированный яблочный сок (ГОСТ Р-52185-2003); солод сухой ржаной ферментированный (ГОСТ Р 52061 - 2003); соль пищевую поваренную высшего сорта (ГОСТ 13830-84); кислоту лимонную (ГОСТ 908-79), воду питьевую (ГОСТ Р 51232-2003; СанПин 2.1.4.1074-01).

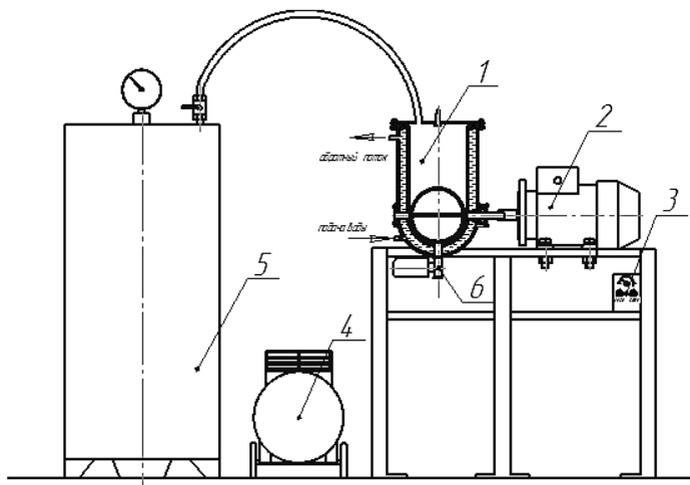
Тесто готовили на лабораторных (рисунок 1) и промышленной (рисунок 10) установках, состоящих: из камеры предварительного замешивания и сбивальной камеры, электродвигателя, компрессора, пульта управления. После формования тестовые заготовки выпекали 45 мин при температуре 195 ± 5 °С.

В работе использовали общепринятые и специальные методы оценки свойств сырья. Органолептические показатели пшеничной и ржаной муки (цвет, запах, вкус и хруст (наличие минеральной примеси) определяли согласно ГОСТ 27558-88, массовую долю влаги (%) - по ГОСТ 9404-88, титруемую кислотность (град) - по ГОСТ 27493-87,

массовую долю (%) и качество (усл. ед. прибора ИДК-1) сырой клейковины – по ГОСТ 27839–88, крупность помола (%) - по ГОСТ 27560-88. Автолитическую активность (с) муки определяли по числу падения «ЧП» по ГОСТ 27676-88 на приборе ПЧП-3.

При механическом разрыхлении теста важным является выбор оптимальных параметров замеса сбивного теста. Цель исследования - выбор режима приготовления теста из пшеничной муки 1-го сорта; определение оптимальных значений давления подаваемого атмосферного воздуха в камеру, частоты вращения вала сбивальной машины, продолжительности сбивания полуфабриката. Установили влияние формы перемешивающего устройства (рисунок 6), на качество полуфабриката и энергетические характеристики замеса (рисунок 9), а также обосновали выбор расположения перемешивающего устройства в камере и расположение самой камеры. Выявляли преимущества и недостатки рассматриваемых установок.

В работе изучено влияние следующих параметров на качество сбивного теста: продолжительность сбивания, давление сжатого воздуха (рисунок 2, 3), частота вращения месильного органа (рисунок 4, 5), форма перемешивающего устройства (рисунок 7, 8), расположение месильной камеры, заполнение камеры.



1 - месильная камера; 2 - электродвигатель; 3 - пульт управления; 4 - компрессор; 5 - ресивер; 6 - устройство для выгрузки теста.

Рисунок 1 - Пилотная установка МС-15 с горизонтально расположенным перемешивающим устройством

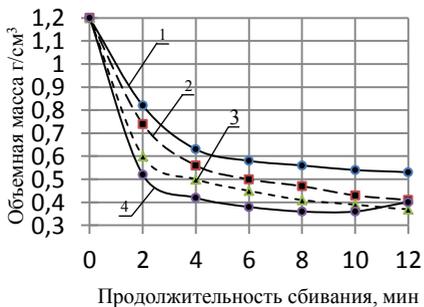


Рисунок 2 - Динамическая зависимость объемной массы теста от продолжительности сбивания, МПа: 1 - 0,1; 2 - 0,2; 3 - 0,3; 4 - 0,4

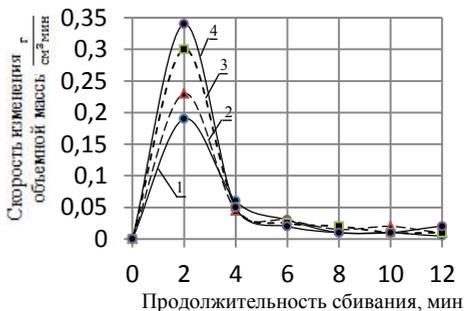


Рисунок 3 - Кинетическая зависимость объемной массы теста от продолжительности сбивания, МПа: 1-0,1; 2 - 0,2; 3 - 0,3; 4 - 0,4

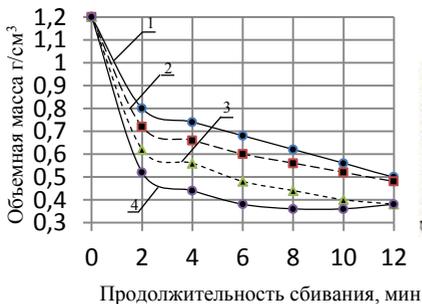


Рисунок 4 - Динамическая зависимость объемной массы теста от продолжительности сбивания, об/мин⁻¹: 1 - 200; 2 - 300; 3 - 400; 5 - 500

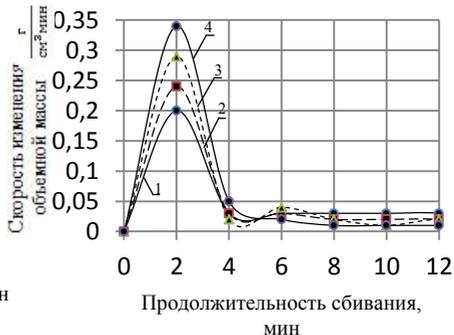


Рисунок 5 - Кинетическая зависимость объемной массы теста от продолжительности сбивания, об/мин⁻¹: 1 - 200, 2 - 300, 3 - 400, 5 - 500

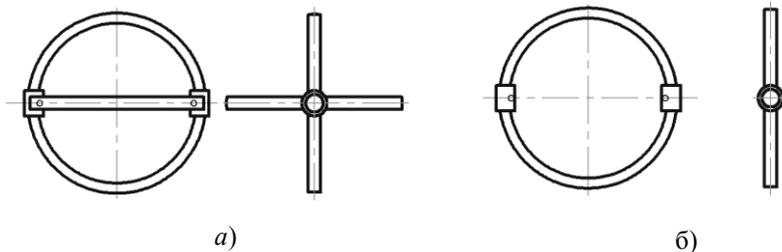
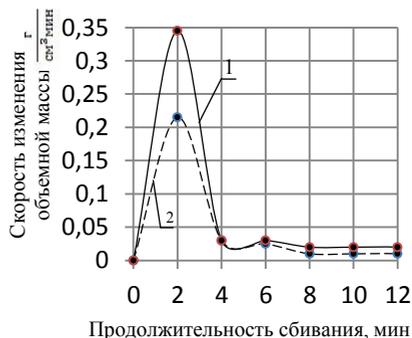


Рисунок 6 - Формы перемешивающих устройств: а - N 1; б - N 2



1 - форма N 1; 2 - форма N 2
Рисунок 7 - Динамическая зависимость объемной массы теста от продолжительности сбивания при различных формах перемешивающего устройства



1 - форма N 1; 2 - форма N 2
Рисунок 8 - Кинетическая зависимость объемной массы теста от продолжительности сбивания при различных формах перемешивающего устройства



1 - форма N 1; 2 - форма N 2
Рисунок 9 - Зависимость удельной мощности от продолжительности сбивания разными перемешивающими устройствами

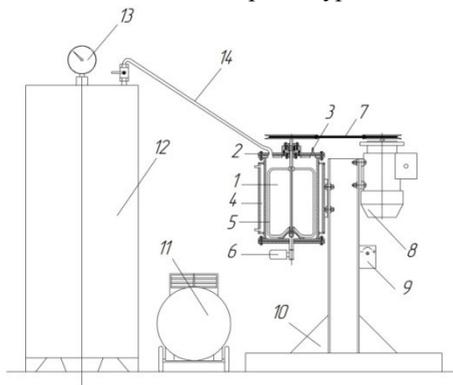
Установка обладает рядом преимуществ перед тестомесами, готовящими тесто традиционным способом. Однако для разработки машин, способных приготовить сбивное тесто в промышленных условиях, необходимо учесть недостатки конструкции данной машины, к которым можно отнести сложность изготовления днища камеры в виде полусферы, крепление крышки к камере несколькими гайками, на завинчивание и отвинчивание которых требуется время.

Однако основным недостатком данной конструкции является то, что для наиболее эффективного получения сбивного полуфабриката с заданными физико-химическими и структурно-механическими свойствами необходимо, чтобы объем, занимаемый рецептурными компонентами, либо не превышал высоту месильного органа, либо, если и превысил ее, то на незначительную высоту, в противном случае, время перемешивания компонентов, а также время приготовления полуфабриката в целом увеличивается, из-за того, что месильный орган не может воздействовать на все компоненты.

Данная конструкция имеет еще один существенный недостаток: по окончании процесса сбивания камеру необходимо максимально разгрузить,

что оказалось невозможным, потому что, выгружая полуфабрикат продувкой сжатого воздуха, в камере остается большая его часть, а это недопустимо.

Из вышесказанного следует, что месильный орган сбивальной машины должен располагаться вертикально и, проходя через камеру, воздействовать на все рецептурные компоненты одновременно (рисунок 10).



- 1 - месильная камера, 2 - крышка,
- 3 - золотник, 4 - рубашка охлаждения,
- 5 - месильный орган,
- 6 - устройство для выгрузки,
- 7 - ременная передача,
- 8 - электродвигатель, 9 - частотный преобразователь,
- 10 - станина,
- 11 - компрессор, 12 - ресивер,
- 13 - манометр, 14 - патрубок.

Рисунок 10 - Пилотная установка МС-25 с вертикально расположенным перемешивающим устройством

Рядом ученых выявлено влияние соли на углеводно-амилазные, белково-протеиназные комплексы муки. Причем, данные отдельных исследований довольно противоречивы. Практически все работы посвящены изучению влияния соли в дрожжевом тесте или тесте без дрожжей, полученном путем обычного перемешивания

В присутствии соли осмотическое набухание клейковины протекает медленно и недостаточно глубоко, что обусловлено плотной и прочной структурой белка. Находящиеся в тесте водорастворимые фракции белка и повышение концентрации NaCl увеличивают осмотическое давление интермицеллярной жидкости, препятствующей набуханию клейковины, то есть действуют дегидратирующе.

Следовательно, соль при интенсивном механическом перемешивании ингредиентов теста влияет на гидратную оболочку как растворимых, так и нерастворимых в воде белковых фракций, а также на их изоэлектрические точки.

Поэтому необходимость исследования зависимости объемной массы теста от оборотов месильного органа с применением в рецептуре соли поваренной пищевой можно объяснить тем, что соль, негативно влияя на процесс пенообразования, является одним из важных вкусовых компонентов, который широко применяется в современном хлебопечении.

Работа строилась следующим образом: по окончании перемешивания в камеру сбивальной установки под избыточным давлением вводили атмосферный воздух, затем тесто с массовой долей влаги 54 % сбивали в камере экспериментальной сбивальной установки при разной частоте вращения в течение 10 мин (рисунок 11, 12).

Установлено, что минимальное значение объемной массы 0,4 г/см³ быстрее всего было достигнуто при 800 об/мин⁻¹.

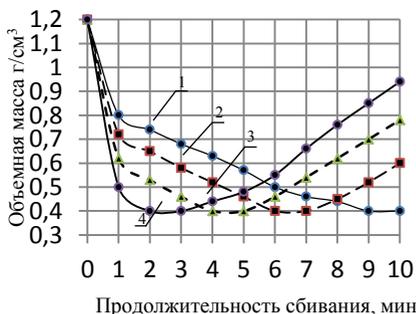


Рисунок 11 - Динамическая зависимость объемной массы теста от продолжительности сбивания, об/мин⁻¹: 1 – 500, 2 - 600, 3 - 700, 5 - 800

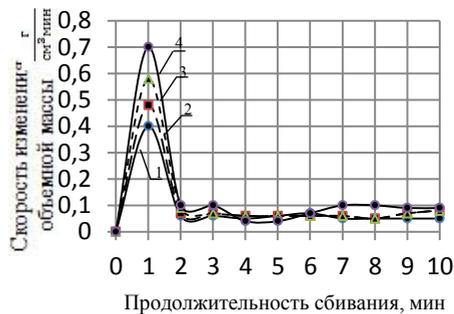


Рисунок 12 - Кинетическая зависимость объемной массы теста от продолжительности сбивания, об/мин⁻¹: 1 – 500, 2 - 600, 3 - 700, 5 - 800

Вследствие того, что мешалка проходит через всю камеру мы имеем возможность максимально разгрузить машину, что является основным ее преимуществом перед установкой, изображенной на рисунке 1. Это дает повод предполагать, что промышленная установка будет иметь аналогичное расположение мешалки. В таком случае месильную камеру необходимо повернуть на некоторый угол для удобства загрузки рецептурных компонентов и выгрузки готового полуфабриката. В связи с этим была изготовлена рама, позволяющая повернуть камеру на 60°.

Следовательно, задачей настоящих исследований явилось сравнение образцов теста, полученных при работе с различным расположением камеры.

Для эксперимента использовали муку пшеничную первого сорта, воду питьевую, соль поваренную пищевую (1,3 % на 100 г муки) и лимонную кислоту (0,2 % к 100 г муки). Смешивание рецептурных компонентов осуществляли в течение 10 мин при частоте вращения месильного органа 5 с⁻¹. По окончании перемешивания в камеру подавали сжатый воздух под давлением 0,4 МПа. Частоту вращения месильного органа устанавливали 13,3 с⁻¹. Далее, через каждые 2 мин сбивания отбирали пробы теста, которые показали, что изменение положения камеры никоим образом не сказывается ни на качестве полуфабриката, ни на времени его приготовления (таблица 1).

Таблица 1- Значения объемной массы теста в зависимости от наклона камеры и продолжительности сбивания

№	Наклон камеры	Продолжительность сбивания, мин				
		2	4	6	8	10
		Объемная масса теста г/см ³				
1	90°	0,40	0,43	0,55	0,76	0,94
2	60°	0,40	0,44	0,54	0,76	0,95

Анализируя результаты экспериментов, можно сказать, что изменение угла расположения камеры тестомесильной машины не влияет на качество полуфабриката и продолжительность его приготовления.

Основываясь на проведенных исследованиях, был разработан и изготовлен промышленный образец машины для приготовления сбивного хлеба (рисунок 13).

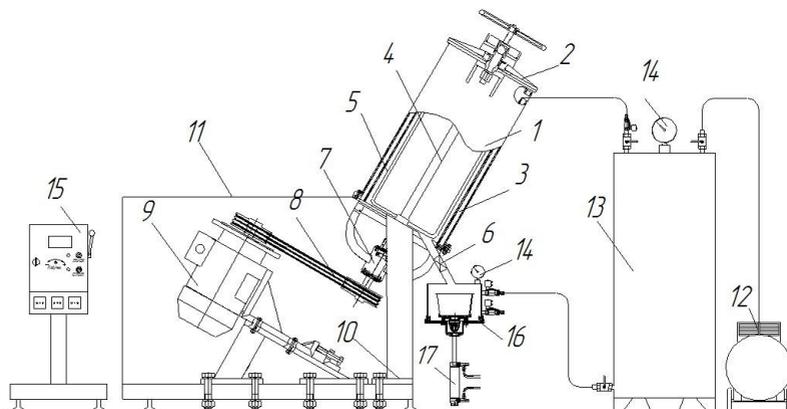


Рисунок 13 - Промышленная машина для приготовления хлебопекарного теста механическим способом разрыхления

Машина состоит из: месильной камеры - 1 с герметичной крышкой - 2; рубашки охлаждения - 3; вала - 4 с рабочим органом - 5; устройства для выгрузки готового продукта - 6; подшипникового узла - 7; эл. двигателя - 9, приводящего в движение вал через ременную передачу - 8; компрессора - 12; ресивера - 13; манометра - 14; пульта управления - 15; узла для деления теста - 16; пневмоцилиндра - 17. Камера -1 с двигателем - 9 закреплены на станине-10, причем ременная передача закрыта защитным кожухом 11.

При изучении структурообразования теста на лабораторных установках было уделено внимание таким факторам, как давление воздуха, частота вращения месильного органа, продолжительность сбивания полуфабриката, его влажность. Однако при работе на промышленной

установке стало очевидно, что на качество сбивного полуфабриката влияет количество теста, находящегося в камере.

Поэтому целью исследований явилось изучение влияния коэффициента заполнения камеры $x_1=30-60$ %, интенсивности сбивания $x_2=600-800$ об/мин⁻¹ и его продолжительности $x_3=4-20$ мин на объемную массу теста y_1 , г/см³, и производительность y_2 , кг/ч.

Тесто влажностью 56 % из муки пшеничной 1-го сорта, соли поваренной пищевой, лимонной кислоты, воды питьевой замешивали на промышленной сбивной машине до получения однородной массы, а затем сбивали под давлением сжатого воздуха 0,4 МПа. Через каждые 2 мин сбивания определяли объёмную массу теста.

В результате обработки экспериментальных данных с применением композиционного планирования получены уравнения регрессии, адекватно описывающие исследуемый процесс:

$$y_1=0,48318 + 0,05375X_1 - 0,00875X_2 - 0,0005X_3 - 0,0125X_1X_3 + 0,01034X_1^2 + 0,004091X_2^2 + 0,0278841X_3^2; \quad (1)$$

$$y_2=60,0189 + 22,176X_1 - 0,469X_2 - 27,637X_3 - 1,55X_1X_2 - 9,875X_1X_3 + 5,125X_2X_3 + 3,486X_1^2 + 1,077X_2^2 + 10,059X_3^2. \quad (2)$$

Воспроизводимость опытов, значимость регрессионных коэффициентов и адекватность уравнений подтверждена статистическими критериями Кохрена, Стьюдента, Фишера.

В результате расчетов найдены оптимальные значения параметров: $x_1=40\%$, $x_2=13,3с-1$, $x_3=8$ мин, которые обеспечивают минимальное значение объемной массы теста.

В третьей главе для интенсификации процесса перемешивания заменили 50 % рецептурного количества воды льдом (таблица 2).

Таблица 2 - Значения температуры теста при перемешивании с применением твердой фазы воды

№	N Об/мин	t пере- меш. мин	Безо льда			t пере- меш. мин	Со льдом		
			t перем. °С		Сила тока А		t перем. °С		Сила тока А
			t нач.	t нач.			t нач.	t нач.	
1	200	20	14	28,5	7,1	6	5	5	4,0
2	300	18	14	30,0	9,6	5	5	5	4,3
3	400	16	14	30,5	11,2	4	5	5	4,8
4	500	14	14	32,0	12,7	-	-	-	-
5	600	12	14	38,0	13,4	-	-	-	-

Установлено, что использование льда для перемешивания рецептурных компонентов положительно сказывается как на качестве готового продукта, так

и на процессе в целом, а именно: время перемешивания 20 кг теста составляет 5 мин, температура полуфабриката не превышает 5 °С, мощность, требуемая на замес, не более 4,5 А.

Разработана математическая модель процесса перемешивания, позволяющая оценивать в динамике неоднородность перемешиваемого субстрата.

Одной из основных задач в технологической цепочке получения сбивных бездрожжевых хлебобулочных изделий является получение однородной смеси муки и воды в реакторе смешения. При этом засыпка муки производится в реактор с водой через свободную поверхность. В настоящее время точно описать этот процесс с использованием фундаментальных уравнений Навье-Стокса не представляется возможным по причине большого количества факторов влияния и наличия существенной турбулентности. В этом случае необходимо применить метод математического моделирования, выбрав в качестве основного закона переноса частиц муки в объеме реактора с выбранной конструкцией мешалки диффузионный механизм Фика.

При этом засыпка муки задана прямоугольным импульсом

$$1(\tau) - 1(\tau - \tau_0), \quad (3)$$

где 1- односторонняя функция Хевисайда; τ_0 -время засыпки, с.

В итоге математическая модель имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right); \quad (4)$$

$$c|_{\tau=0} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z_0} = \frac{\partial c}{\partial r} \Big|_{r_0} = \frac{\partial c}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = 0; \quad (6)$$

$$D \frac{dc}{dz} \Big|_{z=h} = J[1(\tau) - 1(\tau - \tau_0)]. \quad (7)$$

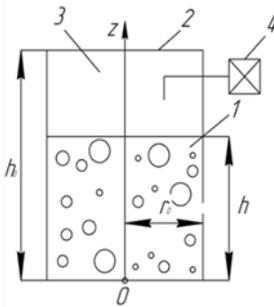
Система уравнений (4)-(7) после приведения к безразмерному виду решена аналитически, и получено полное выражение для нестационарного двумерного поля концентрации муки в объеме сбивальной машины.

Разработана модель насыщения суспензии «вода-мука» воздухом в реакторе перемешивания.

После однородного перемешивания воды и муки полученную суспензию насыщают воздухом, закачивая его компрессором до определенного давления (рисунок 14). По создаваемому давлению и геометрическим характеристикам из уравнения состояния идеального газа определяется концентрация кислорода в паровом пространстве:

$$C_0 = \frac{M}{V} = \frac{P}{RT}, \quad (8)$$

где, P - давление воздуха, Па; R - газовая постоянная воздуха, ДЖ/(кг·К); T - температура воздуха, К:



$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

$$C(Z, r, 0) = 0; \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial C}{\partial Z} \right|_{Z=0} = \left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=0} = \left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=r_0}$$

$$C(h, r, \tau) = C_0. \quad (12)$$

Рис. 14. Расчетная схема
1-Суспензия мука-вода;
2-Реактор перемешивания;
3-Воздушное пространство;
4-Компрессор.

Учитывая отсутствие массового потока через смоченную поверхность реактора смешения, система (8)-(10) переформулирована в однородную нестационарную задачу:

$$\frac{\partial c}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 c}{\partial R^2}; \quad \tilde{C}(Z, \theta) = 0; \quad \frac{\partial \tilde{C}(0, \theta)}{\partial Z} = 0; \quad C(1, \theta) = 1, \quad (13)$$

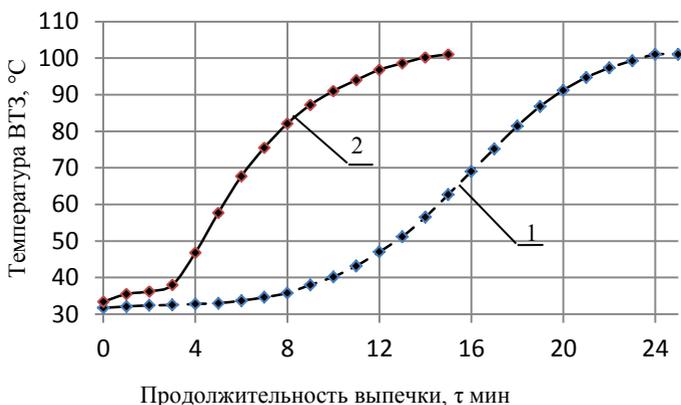
где $\theta = \tau D / h^2$; $Z = z / h$; $C = C / C_0$;
решение, которой получено в следующем виде:

$$C(Z, \theta) = 1 - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos(\mu_n Z)}{\mu_n \sin \mu_n} \exp(-\mu_n^2 \theta), \quad (14)$$

где $\mu_n = \frac{\pi}{2} + \pi n$.

В четвертой главе описаны экспериментальные исследования выпечки сбивного хлеба с применением кварцевых углеродных нагревателей (КУНов) и без них.

Объектом исследования являлось сбивное тесто из смеси ржаной и пшеничной муки в соотношении 50/50, влажностью 56 %, выпекавшееся в печи PFS-9E с использованием кварцевых углеродных нагревателей (КУН) и без них. Испытания проходили следующим образом: к «потолку» пекарной камеры печи были закреплены 2 КУНа на расстоянии 200 мм друг от друга, причем расстояние от них до тестовой заготовки составило 70 мм. Масса тестовых заготовок составляла 500 г. Температура воздуха в печи 180 °С. После проведения контрольной выпечки стало очевидно влияние КУН на длительность процесса и качество готового продукта. (рисунок 15.)



1 – без КУН, 2 – с использованием КУН (100% мощности)
 Рисунок 15 – изменение температуры внутри ВТЗ в процессе выпечки

Очевидно, что применение КУН существенно влияет на скорость выпечки и качество готового продукта. Однако использование КУН на 100 % мощности привело к образованию толстой темноокрашенной (горелой) корки, что можно рассматривать как дефект.

Поэтому было принято решение изменить условия выпечки, а именно: мощность КУН составляла 100 %, но при этом менялось расстояние между нагревателями и тестовой заготовкой, ($h_1=250$ мм, $h_2=160$ мм, $h_3=70$ мм) (рисунок 16).

Исследования показали, что при удалении ВТЗ от источника инфракрасного излучения более чем на 100 мм, нагреватели практически не оказывают никакого воздействия на полуфабрикат, поэтому выпечка происходила за счет тепла, исходящего от штатных ТЭНов, ее время при этом составило не менее 20 мин.

Задачей, стоявшей, перед следующим этапом работы, было изучение влияния изменения напряжения, подаваемого углеродным нагревателям ($U_1=110$ В - 50 %, $U_2=165$ В - 75 %, $U_3=220$ В - 100 %) (рисунок 16), на время выпечки и качество сбивного хлеба. При этом, расстояние между нагревателями и ВТЗ составляло 70 мм, температура воздуха внутри пекарной камеры печи 180 °С.

В результате проведенных опытов можно сделать вывод о том, что образец №3 (рисунок 17) характеризуется наилучшими органолептическими и физико-химическими показателями: привлекательный внешний вид, золотистый цвет корки, темно-коричневая (не горелая) поверхность, пропеченный мелкопористый мякиш, влажность которого составляет 49 %, удельный объем хлеба - 240 см³/100г.

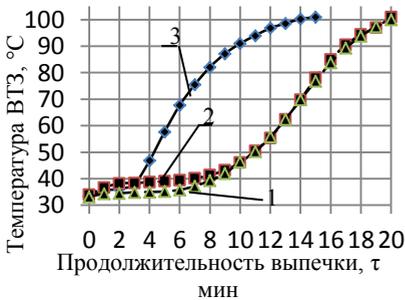


Рисунок 16. Изменение температуры внутри ВТЗ в процессе выпечки, мм:
 h_1 - 250, h_2 - 160, h_3 - 70

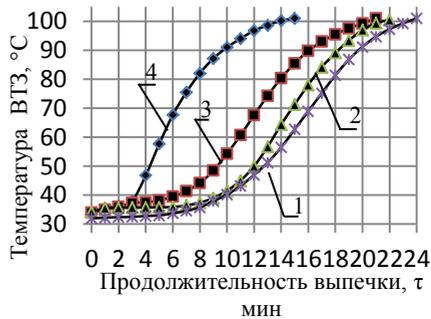


Рисунок 17 - Изменение температуры внутри ВТЗ в процессе выпечки
 1-КУНы не использовались,
 2 - 110 В-50 %, 3 - 165 В-75 %, 4 - 220 В-100 %

Приведенная выше информация свидетельствует о том, что использование кварцевых углеродных нагревателей в значительной степени влияет как на продолжительность выпечки, так и на качество сбивного хлеба.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Определена целесообразность создания технологий и оборудования для приготовления хлебобулочных изделий механическим способом разрыхления.

2. Изучена кинетика процесса пенообразования системы «мука-вода» на экспериментальной сбивальной установке МС-15. Установлено влияние конструкции перемешивающего устройства и коэффициента заполнения камеры на энергозатраты и качество сбивного полуфабриката, при этом обоснован выбор конструкции месильного органа и рабочей камеры.

3. Получены регрессионные зависимости объемной массы сбивного теста из муки 1-го сорта при влажности теста 56 % и коэффициенте заполнения камеры 52 %. Определены при минимальной объемной массе теста $0,42 \text{ г/см}^3$ оптимальные параметры: давление сжатого воздуха 0,4 МПа, интенсивность перемешивания и сбивания 300 об/мин^{-1} , продолжительность перемешивания 10 мин, продолжительность сбивания 10 мин.

4. Построена математическая модель процесса гомогенизации и насыщения суспензии мука-вода воздухом под избыточным давлением в реакторе перемешивания и сбивания. Полученные аналитические решения адекватны экспериментальным данным.

5. Разработан и изготовлен промышленный аэратор. Доказано, что замена половины рецептурного количества воды измельченным

льдом позволяет интенсифицировать процесс перемешивания компонентов и приготовление теста в целом в 2.5 раза, снизить его температуру, уменьшить интенсивность сбивания и удельную мощность привода.

6. Производственные испытания технологии сбивных хлебобулочных изделий с применением промышленного аэратора показали технологичность и экономическую целесообразность, которая заключается в уменьшении производственных площадей, сокращению обслуживающего персонала и оборудования, стоимость которого в 3 – 5 раз ниже, чем при производстве традиционных хлебобулочных изделий.

7. Применение кварцевых углеродных нагревателей в процессе выпечки сбивных полуфабрикатов интенсифицирует процесс и улучшает качество хлебобулочных изделий.

Основные публикации по диссертационной работе

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Магомедов, Г.О. Влияние формы месильной лопасти на энергетические характеристики сбивания и качество бездрожжевого полуфабриката [Текст] / Г.О. Магомедов, Е.И. Пономарева, В.В. Рыжов // Хлебопродукты. – 2011. - № 10. 48-49 с. - 0,2 п.л.

2. Магомедов, Г.О. Разработка рациональной конструкции сбивальной машины для приготовления хлебопекарного теста механическим способом разрыхления в промышленных условиях [Текст] / Г.О. Магомедов, С.Н. Крутских, В.Н. Косинов, В.В. Рыжов // Вестник Воронежской Государственной Технологической Академии. – 2011. - № 3. 86-88 с. - 0,4 п.л.

Статьи и материалы конференций

3. Магомедов, Г.О. Влияние частоты вращения месильной лопасти на качество сбивного теста [Текст] / Г.О. Магомедов, Е.И. Пономарева, В.В. Рыжов // Материалы II научно-технической конференции «Новое в технологии и технике пищевых производств». - Воронеж, 2010. - С. 252.

4. Магомедов, Г.О. Испытание технологии получения бездрожжевого теста на основе инновационного комплекса «АЭРАТОР МИКС-300» [Текст] / Г.О. Магомедов, Е.И. Пономарева, В.И. Вершигора, И.А. Алейник, В.В. Рыжов, А.Ю. Кривошеев, А.С. Шишкин // Хлебопекарное производство. – 2010. – № 1. – 154 С.0,04 п.л.

5. Магомедов, Г.О. Исследование влияния режимов приготовления сбивного теста на его плотность [Текст] / Г.О. Магомедов, В.В. Рыжов, Е.И. Пономарева, А.Ю. Кривошеев, А.С. Шишкин // III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современное

состояние и перспективы развития пищевой промышленности и общественного питания» Том 3. – Воронеж, 2010. 526-528 с. – 0,09 п.л.

6. Магомедов, Г.О. Разработка рациональной конструкции аппарата для приготовления сбивного бездрожжевого теста [Текст] / Г.О. Магомедов, В.В. Рыжов, В.В. Богданов // Материалы XLIX отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГТА за 2010 г. – Воронеж: ВГТА, 2011. - Ч. 1. - С. 74.

7. Магомедов, Г.О. Влияние заполнения месильной камеры промышленной сбивальной машины на качество сбивного полуфабриката [Текст] / Г.О. Магомедов, Е.И. Пономарева, В.В. Рыжов // Энергосберегающие процессы и аппараты в пищевых и химических производствах («ЭПАХПП-2011»): материалы Международной научно-технической интернет-конференции - Воронеж: ВГТА, 2011. - С. 87-89

Изобретения

8. Патент РФ № 2457681. Месильно-сбивальная машина [Текст] / Г.О. Магомедов, В.В. Рыжов, С.Н. Крутских, В.Н. Косинов, Е.И. Пономарева; Заявл. 26.10.2010; Опубл. 10.05.2012, Бюл. № 22.

9. Патент РФ № 2462036. Месильно-сбивальная машина [Текст] / Г.О. Магомедов, В.В. Рыжов, С.Н. Крутских, В.Н. Косинов; Заявл. 23.03.2011; Опубл. 27.09.2012, Бюл. № 27.

10. Патент РФ № 2471351. Способ производства сбивных бездрожжевых хлебулочных изделий [Текст] / Г.О. Магомедов, В.В. Рыжов, С.Н. Крутских, В.Н. Косинов; Заявл. 29.06.2011; Опубл. 10.01.2013, Бюл. № 25.

Подписано в печать 09.10.2015. Формат 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 1.0 Тираж 100 экз.

Заказ

ФГБОУВО «Воронежский государственный университет
инженерных технологий» (ВГУИТ)

Адрес университета и отдела полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»:
394036, Воронеж, пр. Революции, 19