

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ВАФЕЛЬНОГО ТЕСТА

Дмитрий Геннадьевич Старшов
Валентин Михайлович Седелкин
Геннадий Иванович Старшов
Андрей Иванович Никитин

Энгельсский технологический институт (филиал)
Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Рассмотрены достоинства и недостатки существующего технологического оборудования для непрерывного замеса вафельного теста. Представлено описание конструкции автоматической станции, защищенной двумя патентами. Для обеспечения непрерывной подачи вафельного теста на выпечку в вафельную печь использована схема полугибкой связи узлов автоматической станции, что позволяет создать непрерывную поточную линию по приготовлению вафельного теста. Описана конструкция станции и ее основных узлов. Разработан алгоритм управления станцией, позволяющий в автоматическом режиме обеспечить процесс замеса вафельного теста. Определены рациональные технологические параметры для приготовления вафельного теста в вакуумированной воздушной среде. Наличие вакуума обеспечивает создание перепада давления для транспортирования компонентов теста, эмульсии и готового теста из одной емкости в другую, а также интенсифицирует замес теста, уменьшает время его замеса и снижает удельные энергозатраты, устраняет невозвратные отходы. Вакуумирование воздушной среды позволяет регулировать аэрацию вафельного теста, за счет чего оптимизируется время замеса теста, повышается его качество и, следовательно, качество готовой продукции. Установлено оптимальное время замеса одной порции теста – 30–40 секунд, рабочее давление в вакуум-системе – 30 кПа. Эксперименты показали, что время полного цикла замеса порции вафельного теста составляет 80 секунд. (с учетом загрузки исходных компонентов и разгрузки готового теста). В течение часа на предлагаемой автоматической станции можно провести 44 полных цикла замеса вафельного теста, при этом ее производительность составляет 330 кг/ч. Показано, что по сравнению с прототипом удельные энергозатраты снижаются в 2,67 раза, что подтверждает ее высокую энергоэффективность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вафельное тесто, автоматическая станция, алгоритм, компоненты, вакуум, энергозатраты.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC STATION FOR WAFER DOUGH PRODUCTION

Dmitriy G. Starshov
Valentin M. Sedelkin
Gennadiy I. Starshov
Andrey I. Nikitin

Engels Technological Institute (Branch), Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

The authors consider the advantages and disadvantages of the existing technological equipment for continuous kneading of wafer dough and describe the design of an automatic station protected by two patents. In order to ensure a continuous supply of wafer dough for baking in the wafer oven, the authors use the scheme of semi-flexible connection of units of the automatic station, which allows creating a continuous production line for the preparation of wafer dough. The design of the station and its main units is described in this article. The authors have developed an algorithm for operating the station, which ensures an automatic process of wafer dough kneading. The rational technological parameters for the preparation of wafer dough in vacuumed air medium were determined. The presence of vacuum provides a differential pressure for transporting the dough components, emulsion and finished dough from one container to another, and also intensifies the dough kneading, reduces the mixing time and specific energy consumption, and eliminates the non-recyclable wastes. Vacuuming the air medium allows regulating the aeration of wafer dough, thereby optimizing the kneading time and improving the quality of dough and finished products. The optimal kneading time for one portion of dough is determined to be 30–40 seconds, and the working pressure in the vacuum system is 30 kPa. Experiments have shown that the time for a complete cycle of kneading a portion of wafer dough was 80 seconds (taking into account the loading of

the original components and unloading of the finished dough). Within an hour the proposed automatic station can perform 44 complete cycles of wafer dough kneading, while its productivity is 330 kg/h. It is shown that compared to the prototype the specific energy consumption is reduced by 2.67 times, which confirms a high energy efficiency.

KEY WORDS: wafer dough, automatic station, algorithm, components, vacuum, energy consumption.

Введение

В хлебопекарной и кондитерской отраслях пищевой промышленности для приготовления однородных масс, в частности для замеса теста, используются различные тестосмесительные машины [8, 9].

Приготовление теста является одним из самых ответственных процессов в технологии производства вафель [5]. Состояние и свойства готового теста в значительной мере определяют режимы выпечки вафельных листов и качество готовой продукции.

Консистенция теста для вафельных листов значительно отличается от консистенции теста для других видов мучных кондитерских изделий. Это тесто представляет собой дисперсную систему со сравнительно низкой вязкостью. Влажность вафельного теста доходит до 65%.

При замесе теста, для того чтобы уменьшить возможность слипания отдельных частичек муки в комки, создаются определенные условия. Нужно, чтобы в момент соприкосновения муки с водой вокруг каждой ее частицы образовалась гидратная оболочка. Такая оболочка противодействует слипанию набухших частиц муки. Для этого муку вводят в смесь небольшими порциями в несколько приемов. Предпочтительнее готовить тесто на эмульсии, состоящей из всех компонентов теста, за исключением муки. В эмульсию обычно вводят желток или меланж, растительное масло, фосфатиды, растворы гидрокарбоната натрия и соли [1].

Особое значение имеет влажность теста. Снижение влажности ведет к значительному увеличению вязкости теста и, как следствие, затрудняет дозирование и заполнение вафельных форм. С другой стороны, увеличение влажности теста приводит к существенному снижению производительности печи и увеличению количества оттеков вафельных листов [3].

На отечественных и зарубежных кондитерских производствах используются станции непрерывного приготовления вафельного теста с постоянным приготовлением эмульсии. В этих станциях реализуется способ приготовления теста при атмосферном давлении воздуха в системе [4].

Известный способ приготовления теста имеет следующие недостатки:

- низкая точность дозирования компонентов смеси;
- малая интенсивность и большая продолжительность перемешивания компонентов;
- наличие в рецептурной смеси и в готовом тесте большого количества воздушных пузырьков, ухудшающих качество продукции;
- нестыковка технологических режимов приготовления теста и выпечки готовых изделий, приводящая к снижению их качества и производительности оборудования;
- высокая энергоемкость получаемой продукции.

Для устранения вышеперечисленных недостатков предложен автоматизированный аппаратный комплекс для приготовления вязко-пластичных смесей, в котором все технологические процессы происходят в параллельно-последовательном режиме в три стадии [8, 9].

Целью настоящей работы являлось совершенствование технологического процесса и разработка конструкции автоматической станции для приготовления вафельного теста.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- исследовать влияние технологических и кинематических параметров процесса замеса на реологические свойства и аэрацию вафельного теста, на продолжительность и удельные энергозатраты замеса, а также на качество готовой продукции;
- разработать алгоритм управления автоматической станцией для приготовления вафельного теста.

Методы исследований

В работе применяли методы исследования, позволяющие анализировать технологические и кинематические параметры станции, а также структурно-механические свойства вафельного теста [7].

Вязкость теста определялась на вискозиметре «Реотест-2» по стандартной методике при градиенте скорости $5,4 \text{ с}^{-1}$.

Для приготовления вафельного теста разработана конструкция вакуумного смесителя всех компонентов, которая обеспечивает интенсивное смешение сухих компонентов с эмульсией и получение гомогенного вафельного теста в короткие сроки [10].

В смесителе технологические операции по дозированию сыпучих и жидких компонентов, приготовление рецептурной смеси и получение вязко-пластичных смесей происходят в вакуумированной воздушной среде. Это значительно сокращает время смешения компонентов, исключает любые их потери, снижает вязкость получаемой смеси, уменьшает сопротивление движению потоков, существенно снижает удельные энергозатраты на единицу продукции, позволяет регулировать содержание воздуха в смеси и повышает ее качество.

Для обеспечения непрерывной подачи вафельного теста на выпечку в вафельную печь использована схема полугибкой связи узлов автоматической станции, что позволяет создать непрерывную поточную линию по приготовлению вафельного теста.

Автоматическая станция предназначена для работы в комплексе с автоматической печью для выпечки вафельных листов и позволяет получать вафельное тесто по технологии непрерывного замеса малыми порциями.

Основным требованием к дозаторам является обеспечение подачи в смесь установленного по рецептуре количества компонентов. Предлагаемая конструкция дозатора объемного типа основана на дозировании сыпучих компонентов малыми порциями через калиброванное отверстие с необходимым диаметром, через которое за счет перепада давления за определенное время проходит необходимое количество сыпучего компонента.

Основным технологическим параметром дозирования является разность давлений среды перед выпускным отверстием и после выпускного отверстия, которая в основном влияет на точность дозирования и производительность дозатора. Кроме того, эта разность давлений используется для перемещения сухих компонентов и рецептурной смеси из одной емкости в другую, что позволяет заменить механический транспорт на пневмотранспорт и уменьшить габариты установки.

Объемный дозатор работает следующим образом. Дозируемые сыпучие компоненты малыми порциями подаются в вакуумированную емкость в виде распыленного факела, что позволяет производить смешивание сыпучих компонентов с момента их попадания в емкость. Это значительно сокращает время приготовления одной порции рецептурной смеси и удельные энергозатраты за счет снижения сопротивления воздушной среды и исключает любые потери сыпучих компонентов рецептурной смеси.

Приготовление эмульсии, состоящей из жидких компонентов, растворов и рецептурной смеси из сыпучих компонентов, происходит параллельно при атмосферном давлении воздуха.

Замес вафельного теста из рецептурной смеси и эмульсии происходит последовательно, причем все эти технологические операции проводятся в вакуумированных

герметичных емкостях, что снижает затраты энергии при смешивании за счет снижения сопротивления воздушной среды и исключает любые потери сыпучих компонентов, рецептурной смеси и готового теста. Наличие вакуума обеспечивает освобождение смешиваемых масс от пузырьков воздуха, которые неизбежно образовались бы при интенсивном перемешивании масс в воздушной среде.

Применение для приготовления теста смесителей периодического действия обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с непрерывно действующими устройствами: более высокую точность дозирования компонентов, удобство изменения производственной рецептуры, возможность автоматизации процессов на всех этапах замеса.

В работе [12] рассмотрены конструкция и принцип действия тестосмесителя для приготовления вязко-пластичных масс [10].

С использованием запатентованного способа получения вязко-пластичной смеси и устройства для его осуществления (смесителя) [10] была разработана автоматическая станция для приготовления вязко-текучей смеси (вафельного теста) [11].

Принципиальная схема автоматической станции приведена на рисунке 1.

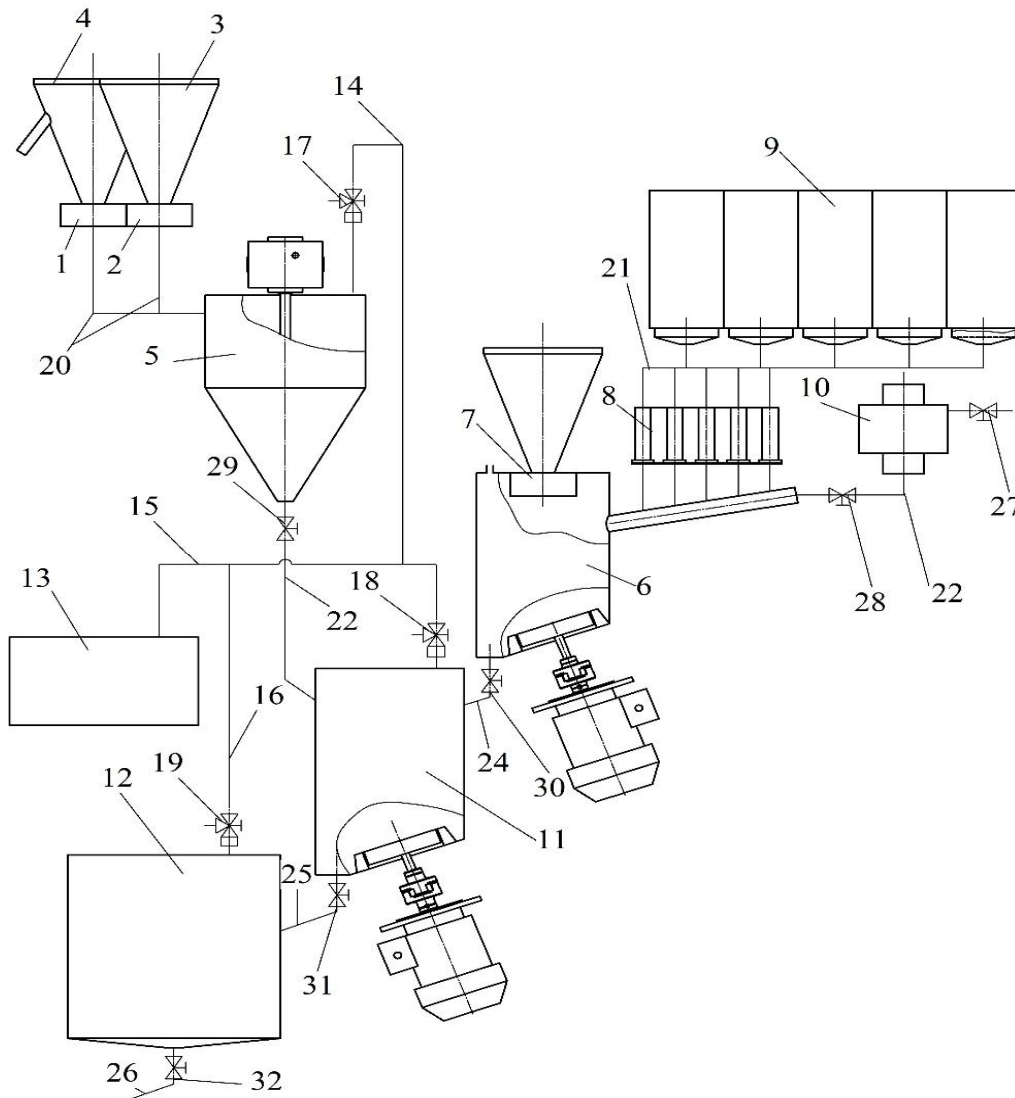


Рис. 1. Принципиальная схема автоматической станции: 1, 2, 7 – дозаторы сухих компонентов; 3, 4 – расходные бункеры; 5 – смеситель для рецептурной смеси; 6 – эмульсатор; 8 – дозаторы жидких компонентов; 9 – расходные емкости; 10 – дозатор воды; 11 – тестомесильная машина; 12 – емкость для готового теста; 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

Автоматическая станция содержит тестомесильный модуль, в который входит бункер-смеситель с дозаторами и расходными емкостями сухих компонентов, эмульгатор для получения гомогенной эмульсии и жидких компонентов с дозаторами и расходными емкостями, тестомесильная машина для смешения сухих компонентов с эмульсией и буферную емкость с фильтром теста. Все операции, включая подачу муки, выполняются автоматически без участия обслуживающего персонала с помощью микропроцессорной системы контроля и управления технологическим процессом [11].

Автоматическая станция обеспечивает интенсивное смешивание сухих компонентов с эмульсией и получение гомогенного вафельного теста в течение 40 с. Общее время замеса одной порции вафельного теста, с учетом времени загрузки и разгрузки, составляет около 80 с. При этом масса разовой порции приготовленного теста не превышает 7,5 кг. Затем тесто подается в печь для выпечки и вырабатывается там за время не более 5 мин. Это исключает затягивание и потерю гомогенности теста при выпечке, что обеспечивает получение стабильно высокого качества вафельной продукции.

Автоматическая станция состоит из дозаторов 1 и 2 для сухих компонентов с расходными бункерами 3 и 4, промежуточного смесителя 5 для приготовления рецептурной смеси, эмульсатора 6 для получения гомогенной эмульсии с дозатором сухих компонентов 7 и дозаторами жидких компонентов 8 с расходными емкостями 9, дозатора воды 10, тестомесильной машины 11 для смешивания сухих компонентов с эмульсией, промежуточной буферной емкости 12 для готового теста, пневмосистемы, включающей вакуум-насос с ресивером 13, вакуум-трубопроводы 14, 15, 16 с трехходовыми управляемыми от блока управления клапанами 17, 18, 19 для соединения промежуточного смесителя 5 тестомесильной машины 11 и промежуточной емкости 12 с ресивером вакуум-насоса 13, продуктопроводы 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 с клапанами 27, 28, 29, 30, 31, 32, управляемыми блоком управления для подачи сыпучих, жидких компонентов, полуфабрикатов и теста, причем все емкости, дозаторы, бункеры, смесители, эмульсатор и тестомесильная машина снабжены датчиками для связи с блоком управления.

На рисунке 2 представлена блок-схема алгоритма управления автоматической станцией.

Пуск в работу автоматической станции приготовления вафельного теста осуществляется после включения вакуумного насоса и подключения к водопроводной сети. Перед этим емкости дозаторов жидких и сухих компонентов должны быть заполнены до уровня не менее чем на 1/3 от максимального объема; наличие компонентов контролируется датчиками.

Затем производится установка доз жидких и сыпучих компонентов в соответствии с заданной рецептурой.

Нажатием кнопки «Пуск программы» блок управления начинает выполнять программу в соответствии с заложенным алгоритмом. Параллельно происходит приготовление суспензии в модуле I и рецептурной смеси в модуле II.

Для приготовления суспензии открывается клапан 27 и вода поступает в мерную емкость дозатора воды 10, при достижении заданной дозы клапан 27 закрывается, прекращая подачу воды. Затем открывается клапан 28, и вода по продуктопроводу 22 подается в емкость эмульсатора 6. Жидкие компоненты (растительное масло, лецитин, водный раствор поваренной соли, водный раствор соли аммония и др.) дозаторами 8 через продуктопроводы 21 из емкости 9 подаются в эмульсатор 6. При этом датчик дозатора воды дает управляющий сигнал в блок управления, который прекращает подачу воды и возвращает механизмы в исходное положение.

Одновременно с дозированием жидких компонентов дозируется сухой компонент – яичный порошок. При включении дозатора 7 яичного порошка одновременно включается вибратор дозатора 7, предотвращающий зависание порошка в ячейках дозатора.

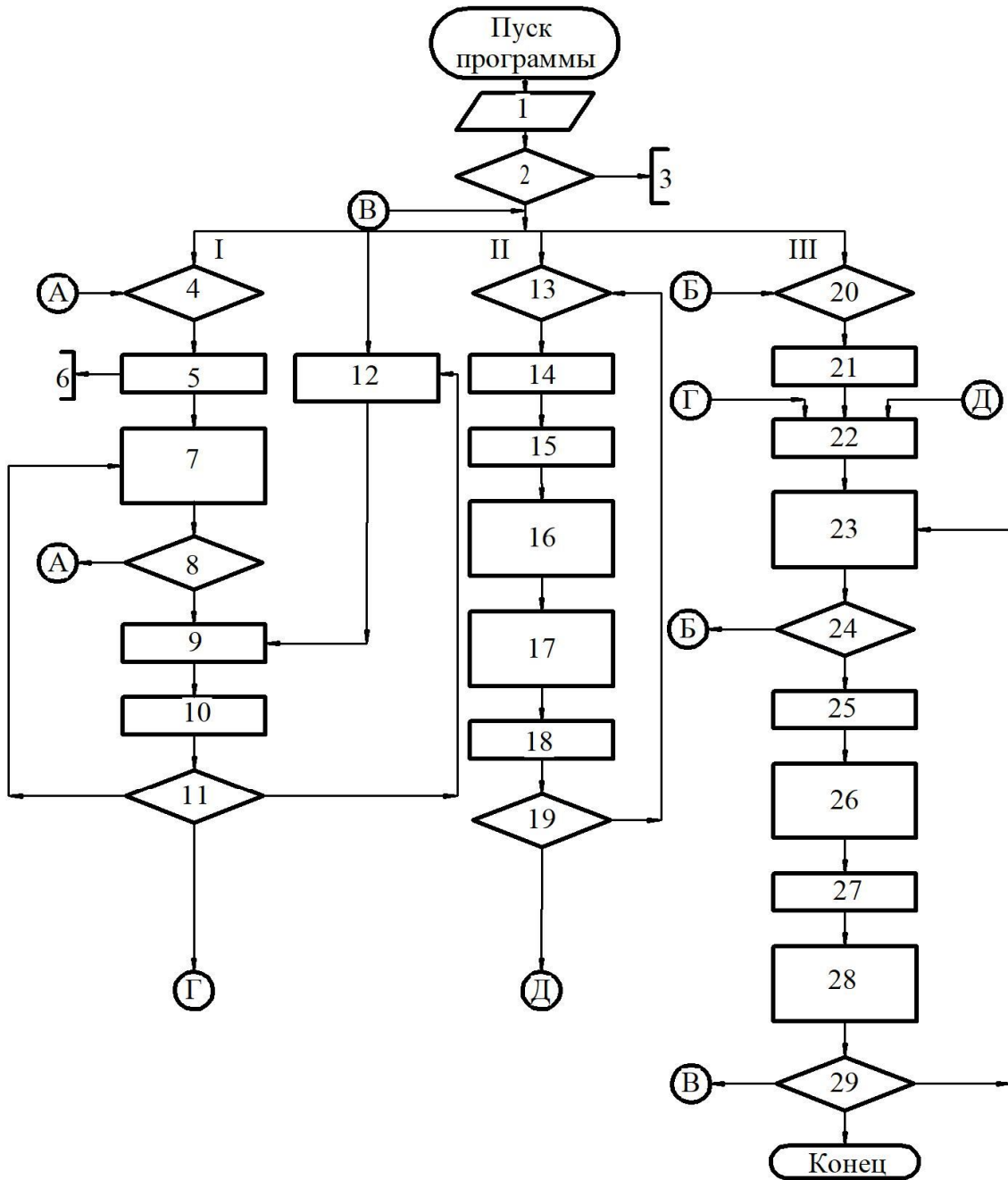


Рис. 2. Блок-схема алгоритма управления автоматической станцией:

- 1 – установить количество доз сыпучих и жидких компонентов; 2 – проверить уровень теста в емкости; 3 – подать звуковой и световой сигналы наличия компонентов в емкостях; 4 – проверить готовность работы эмульсатора; 5 – подать воду в дозатор воды; 6 – открыть и закрыть клапаны подачи воды; 7 – подать сжатый воздух для транспортировки воды в эмульсатор; 8 – проверить уровень воды в дозаторе; 9 – приготовить эмульсию в эмульсаторе по времени; 10 – открыть и закрыть клапан выхода эмульсии; 11 – проверить готовность работы эмульсатора; 12 – включить дозаторы жидких и сыпучих компонентов для изготовления эмульсии; 13 – проверить готовность работы бункера-смесителя; 14 – создать вакуум в бункере-смесителе; 15 – включить дозаторы сыпучих компонентов; 16 – приготовить рецептурную смесь в бункере-смесителе по времени; 17 – подать воздух в бункер-смеситель; 18 – открыть и закрыть клапан выхода рецептурной смеси; 19 – проверить наличие смеси в бункере-смесителе; 20 – проверить готовность работы тестосмесителя; 21 – создать вакуум в тестосмесителе; 22 – замесить вафельное тесто по времени; 23 – отключить вакуум в тестосмесителе и включить клапан выхода готового теста; 24 – проверить наличие теста в тестосмесителе; 25 – создать вакуум в буферной емкости; 26 – слить тесто в буферную емкость; 27 – подать воздух в буферную емкость; 28 – включить насос и подать готовое тесто по сигналу датчика в приемную емкость печи; 29 – контролировать уровень теста в буферной емкости

Одновременно с приготовлением суспензии идет подготовка сыпучей рецептурной смеси в модуле II. По команде блока управления открывается клапан 17 на вакуум-трубопроводе 14, который соединяет емкость промежуточного смесителя 5 с ресивером вакуум-насоса 13. При этом в емкости промежуточного смесителя 5 создается разрежение. При включении дозатора муки 1, по команде блока управления, мука из бункера 4 по продуктопроводам 20 за счет перепада давления дискретными порциями поступает в промежуточный смеситель 5. Другие сыпучие компоненты (крахмал, пищевая сода и др.) подаются дозаторами 2 из бункеров 5 по продуктопроводам 20 также за счет перепада давления дискретными порциями в соответствии с рецептурой в промежуточный смеситель 5.

Подача сыпучих компонентов дискретными порциями интенсифицирует процесс их перемешивания.

После завершения процесса дозирования и перемешивания сухих компонентов и приготовления эмульсии производится замес вафельного теста в модуле III.

По команде от блока управления выключаются дозаторы сухих компонентов и включается клапан 17, который отключает вакуум-трубопровод 14 и соединяет емкость промежуточного смесителя 5 с атмосферой. По команде от блока управления открывается также клапан 8 на вакуум-трубопроводе 15, который соединяет емкость тестомесильной машины 11 с ресивером вакуум-насоса 13. При этом в емкости тестомесильной машины 11 создается разрежение. После этого открываются клапаны 30 и 29 на выходе эмульгатора 6 и промежуточного смесителя 5, которые позволяют эмульсии и смеси сухих компонентов по продуктопроводам 24 и 22, за счет перепада давления, поступать в емкость тестомесильной машины 11. После опорожнения емкостей эмульгатора и промежуточного смесителя по команде блока управления включается клапан 18, который отключает вакуум-трубопровод 15 и соединяет емкость тестомесильной машины 11 с атмосферой. Затем закрываются клапаны 30 и 29 и процесс приготовления эмульсии и смеси сыпучих компонентов повторяется.

По окончании замеса вафельного теста в тестомесильной машине 11 по команде от блока управления открывается клапан 19 на вакуум-трубопроводе 16, соединяющем промежуточную емкость 12 для теста с ресивером вакуум-насоса 13. При этом в емкости создается разрежение. Затем открывается клапан 31 на продуктопроводе 25, соединяющем емкость тестомесильной машины 11 и промежуточную емкость для теста 12, что позволяет готовому тесту по продуктопроводу 25 за счет перепада давления подаваться в промежуточную емкость 12 для готового теста.

После опорожнения емкости тестомесильной машины 11 по команде от блока управления включается клапан 19, который отключает вакуум-трубопровод 16 и соединяет промежуточную емкость 12 с атмосферой. После этого закрывается клапан 31, процесс приготовления теста повторяется.

Готовое тесто фильтруется на сите и перекачивается при разрешающем сигнале от датчика уровня теста в емкости 12, из этой емкости через клапан 32 по продуктопроводу 26 в расходную емкость вафельной печи. Наличие или отсутствие сухих и жидких компонентов полуфабриката и готового продукта контролируется датчиками, установленными в бункерах и емкостях всех устройств автоматической станции.

Для отработки кинематических и технологических параметров автоматической станции была создана экспериментальная установка. В ходе экспериментов определялись время замеса, энергозатраты и качественные показатели готового теста.

Эксперименты проводились следующим образом.

В емкость тестосмесителя 11, при включенном приводе вращения ротора, одновременно подавалась через продуктопровод 13 рецептурная смесь сыпучих компонентов, а через продуктопровод 14 – эмульсия. Замес вафельного теста проводился как при атмо-

сферном давлении P_1 , так и при вакуумировании емкости тестосмесителя до $P_2 = 30$ кПа. Влажность теста составляла 62–65%. Через кран 17 отбирались девять образцов теста во время замеса с интервалом через 10 с. Среднее значение плотности вафельного теста составило $\rho = 1120$ кг/м³. Одновременно ваттметром измерялась потребляемая мощность электродвигателя. Величина разрежения определялась вакуумметром. Опыты повторялись не менее пяти раз.

Результаты и их обсуждение

Состояние и свойства готового теста в значительной мере определяют технологию выпечки вафельных листов и качество готовой продукции [7].

В таблице 1 приведены результаты экспериментального исследования влияния давления в емкости тестосмесителя и продолжительности замеса вафельного теста на его вязкость.

Таблица 1. Влияние давления в емкости тестосмесителя и продолжительности замеса вафельного теста на его динамическую вязкость, Па × с

Давление, кПа	Время замеса, t, с								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
100	1,20	1,10	1,00	0,90	0,84	0,90	1,00	1,10	1,30
80	1,20	1,05	0,95	0,90	0,85	0,84	0,90	1,10	1,20
60	1,10	1,05	0,90	0,87	0,85	0,84	0,90	1,05	1,10
40	1,05	0,95	0,85	0,84	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05
20	1,05	0,90	0,84	0,85	0,84	0,85	0,95	1,00	1,05

Как видно из данных, представленных в таблице 1, экспериментальные значения динамической вязкости с увеличением времени замеса сначала уменьшаются, а затем начинают возрастать. При вакуумировании емкости тестосмесителя значения вязкости меньше и выравниваются быстрее, чем при атмосферном давлении. Таким образом, вакуумирование емкости тестосмесителя позволяет интенсифицировать процесс замеса вафельного теста и сократить время замеса. Например, при давлении $P = 60$ кПа вязкость теста приобретает минимальное значение через 50 с замеса, при давлении $P = 20$ кПа готовность вафельного теста достигается уже после 30 с замеса.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при углублении вакуума в емкости тестосмесителя смешивание компонентов, входящих в состав теста, интенсифицируется. Это можно объяснить тем, что смешивание происходит в вакууме и определяется его величиной.

Сыпучие массы мгновенно разделяются на отдельные частицы и под действием сил тяжести опускаются в быстро движущиеся вязко-текучие массы, которые, в свою очередь, перемещаются в горизонтальной и вертикальной плоскости под действием центробежных сил, возникающих при вращении ротора турбины.

Вследствие отсутствия воздушной прослойки в исходной смеси в момент соприкосновения частиц муки с водой вокруг них быстрее образуется гидратная оболочка, что противодействует слипанию набухших частиц муки, снижает сопротивление внутри тестосмесителя и способствует уменьшению времени замеса теста. Это соответственно приводит к снижению удельных энергозатрат на замес теста.

При более длительном замесе теста повышается его вязкость; кроме того, увеличение вязкости вафельного теста также затрудняет дозирование и заполнение вафельных форм. Это объясняется увеличением набухаемости клейковины и ростом внутреннего трения, что, в свою очередь, снижает качество вафельных листов.

Одним из важнейших кинематических параметров тестосмесителя является окружная скорость рабочего органа – турбины. Исследования показали, что оптимальная окружная скорость турбины смесителя должна составлять 3,0–7,0 м/с.

Эти значения окружной скорости турбины возможны при частоте вращения вала приводного электродвигателя 630 мин⁻¹, 950 мин⁻¹ и диаметре турбин, равном соответственно 0,077 м, 0,115 и 0,134 м.

Удельную мощность привода мешалки (Вт × с/кг), необходимую для замеса одного кг теста, определяем по формуле [2]

$$N_{уд} = \frac{P_{эл} \times t}{3600 \times G}, \quad (1)$$

где $P_{эл}$ – мощность, измеренная при помощи ваттметра, Вт;

G – масса одной дозы замешанного теста, $G = 7,5$ кг;

t – время замеса теста, с.

На рисунке 3 показано влияние кинематических параметров ротора турбины тестосмесителя на вязкость вафельного теста и удельную мощность привода при частоте вращения ротора $n = 10,5$ с⁻¹.

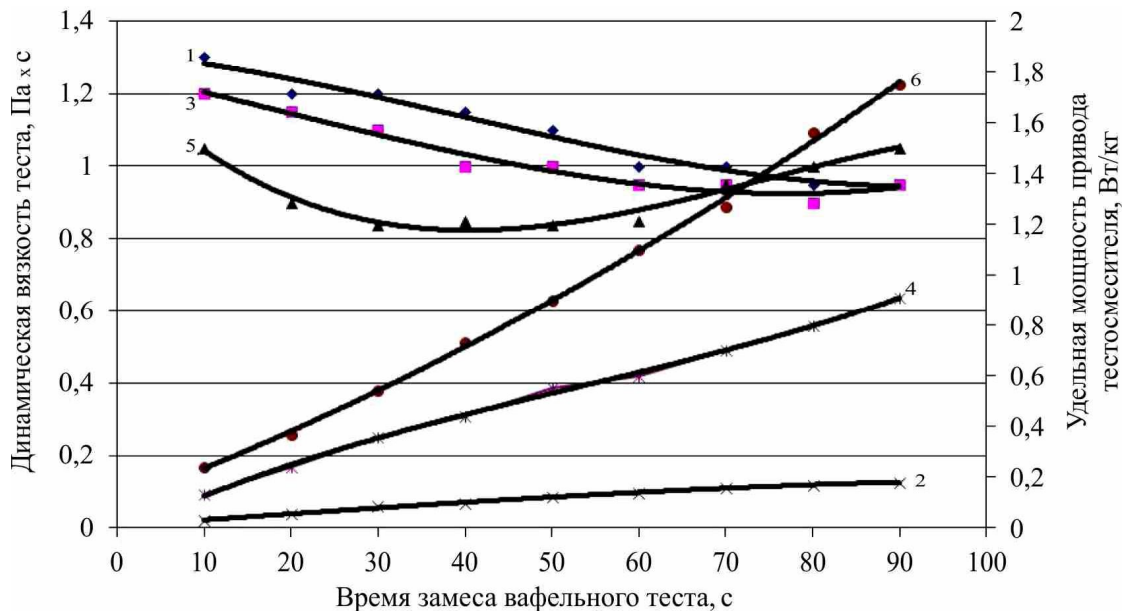


Рис. 3. Изменение вязкости вафельного теста и удельной мощности от времени замеса при частоте вращения ротора турбины тестосмесителя $n = 10,5$ с⁻¹: 1 и 2 – сменные диаметры турбин 0,077 м; 3 и 4 – 0,115 м; 5 и 6 – 0,134 м

Экспериментальные значения динамической вязкости и удельной потребляемой мощности зависят от кинематических параметров ротора турбины тестосмесителя.

На рисунке 3 показано изменение вязкости теста и удельной мощности от окружной скорости турбины. При небольшой окружной скорости, равной 2,54 м/с, и при $n = 10,5$ с⁻¹ и $d = 0,077$ м время замеса теста значительно увеличивается, а вязкость теста изменяется незначительно. Однако при этих режимах не достигается полной готовности теста при установленном времени замеса. Это можно объяснить тем, что при данной окружной скорости гидратная оболочка, которая противодействует слипанию набухших частиц, повышает сопротивление при движении смеси внутри тестосмесителя. Кроме того, повышается набухаемость клейковины и увеличивается внутреннее трение, что, в свою очередь, способствует увеличению времени замеса теста. Это, соответственно, приводит к снижению качественных показателей теста. Увеличение вязкости вафельного теста также затрудняет дозирование и заполнение вафельных форм.

При повышении окружной скорости турбины до 3,8 м/с ($n = 10,5 \text{ с}^{-1}$, $d = 0,115 \text{ м}$) удельная мощность, а также время замеса теста незначительно увеличиваются. При этом вязкость теста изменяется также незначительно. Однако при этих режимах не достигается полной готовности теста. Это можно объяснить тем, что при данной окружной скорости гидратная оболочка, которая противодействует слипанию набухших частиц, повышает сопротивление при движении смеси внутри тестосмесителя; кроме того, повышается набухаемость клейковины и увеличивается внутреннее трение, что, в свою очередь, способствует увеличению времени замеса теста, что и приводит к снижению качественных показателей теста. При дальнейшем повышении окружной скорости турбины до 4,42 м/с ($n = 10,5 \text{ с}^{-1}$, $d = 0,134 \text{ м}$). Видно, что удельная мощность также увеличивается, однако вязкость теста стабилизируется в течение 40 с. и имеет минимальное значение. Видно, что при этом достигается полная готовность теста. Это можно объяснить тем, что при данной окружной скорости гидратная оболочка, которая противодействует слипанию набухших частиц, меньше влияет на сопротивление при движении смеси внутри тестосмесителя, что приводит к интенсификации и уменьшению времени замеса теста. Это, соответственно, приводит к повышению качественных показателей теста.

На рисунке 4 показано влияние кинематических параметров ротора турбины тестосмесителя на вязкость вафельного теста и удельную мощность привода при частоте вращения ротора $n = 15,8 \text{ с}^{-1}$.

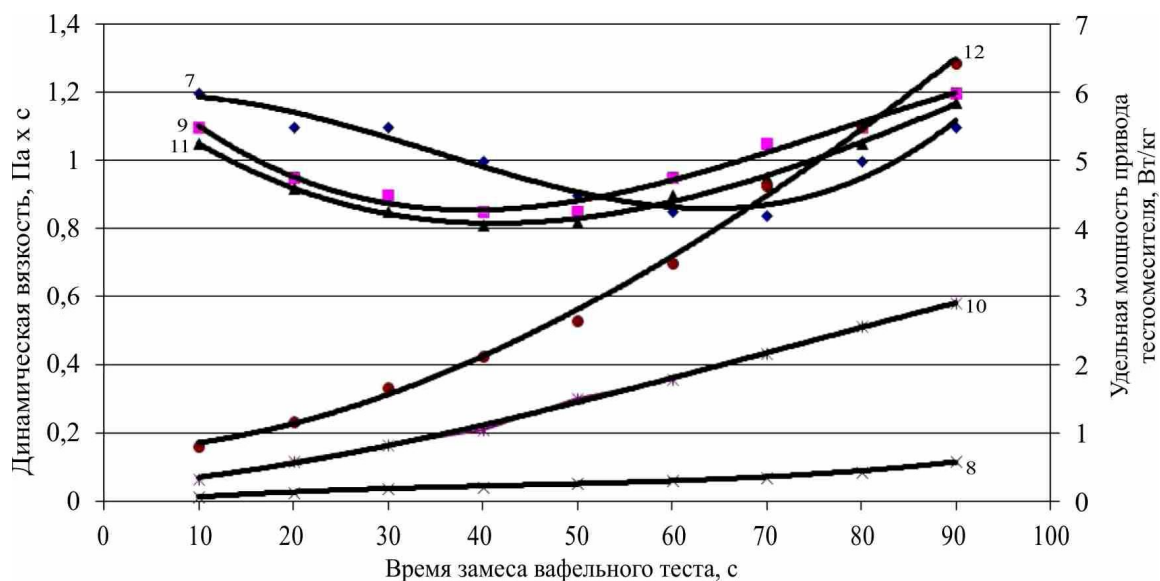


Рис. 4. Изменение вязкости вафельного теста и удельной мощности от времени замеса при частоте вращения ротора турбины тестосмесителя $n = 15,8 \text{ с}^{-1}$: 7 и 8 – сменные диаметры турбин 0,077 м; 9 и 10 – 0,115 м; 11 и 12 – 0,134 м

При небольшой окружной скорости, равной 3,83 м/с, и при $n = 15,8 \text{ с}^{-1}$ и $d = 0,077 \text{ м}$ удельная мощность увеличивается, однако минимальное значение вязкости теста достигается только через 70 с замеса. Это можно объяснить тем, что при данной окружной скорости сопротивление при движении смеси внутри тестосмесителя уменьшается за счет увеличения центробежных сил.

При повышении окружной скорости турбины до 5,72 м/с ($n = 15,8 \text{ с}^{-1}$, $d = 0,115 \text{ м}$) расход удельной мощности замеса теста значительно увеличивается, время процесса замеса уменьшается, вязкость теста достигает минимального значения за 50 с. Это можно объяснить тем, что при данной окружной скорости увеличиваются центробежные силы, которые способствуют повышению скорости смешивания компонентов теста, однако при этом значительно увеличивается расход удельной мощности.

При повышении окружной скорости турбины до 6,66 м/с ($n = 15,8 \text{ с}^{-1}$, $d = 0,134 \text{ м}$) расход удельной мощности на замес теста значительно возрастает, вязкость теста принимает минимальное значение через 50 с замеса. В этом варианте время замеса теста сокращается, однако удельные затраты мощности на замес увеличиваются в несколько раз, что, видимо, вызвано сильным изменением структуры теста.

Таким образом, исследования показали, что оптимальным значением скорости ротора турбины является 4,42 м/с ($n = 10,5 \text{ с}^{-1}$, $d = 0,134 \text{ м}$). При данных кинематических параметрах вязкость вафельного теста быстрее достигает минимального значения, что приводит к минимизации энергозатрат на привод тестосмесителя.

В таблице 2 дано сравнение экспериментальных данных по влиянию времени замеса вафельного теста и давления в емкости тестосмесителя на плотность и вязкость вафельного теста.

Таблица 2. Влияние времени замеса вафельного теста и давления в емкости тестосмесителя на вязкость (Па × с) и плотность (г/см³) теста

Давление, кПа	Время замеса, t, с								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
100	1,20	1,05	0,950	0,900	0,84	0,900	1,00	1,10	1,300
	1,13	1,13	1,120	1,120	1,12	1,110	1,11	1,11	1,110
30	1,05	0,90	0,840	0,850	0,84	0,850	0,95	1,00	1,050
	1,13	1,13	1,135	1,135	1,14	1,145	1,15	1,15	1,154
30; 100*	1,05	0,90	0,840	0,850	0,84*	0,950*	0,95*	1,10*	1,200*
	1,13	1,13	1,135	1,135	1,13*	1,125*	1,12*	1,20*	1,110*

Примечание: Р* – атмосферное давление в емкости тестосмесителя, равное 100 кПа; Р – давление в емкости тестосмесителя, равное 30 кПа

Из данных, представленных в таблице 2, видно, что экспериментальные значения динамической вязкости при атмосферном давлении с увеличением времени замеса сначала уменьшаются, а затем начинают возрастать. Плотность теста во время его замеса постоянно уменьшается, что свидетельствует о дополнительной аэрации теста.

При вакуумировании емкости тестосмесителя эти параметры меньше и выравниваются быстрее, чем при атмосферном давлении. Плотность теста в начальный момент времени его замеса не изменяется, а затем ее значение увеличивается. Это говорит о том, что из теста часть воздуха уходит в процессе вакуумирования емкости тестосмесителя. При этом уменьшается время замеса и интенсифицируется процесс замеса вафельного теста.

При переменном давлении в емкости тестосмесителя первые 20 с замес теста проводится при вакуумировании емкости тестосмесителя. В этот период экспериментальные значения динамической вязкости с увеличением времени замеса уменьшаются и выравниваются быстрее, чем при атмосферном давлении. Плотность теста при этом не изменяется.

При увеличении давления в емкости тестосмесителя до атмосферного динамическая вязкость теста начинает возрастать, а плотность вафельного теста уменьшается.

Полученные результаты показывают, что при вакуумировании емкости тестосмесителя во время замеса из теста удаляется часть воздуха и плотность теста незначи-

тельно увеличивается. Затем при атмосферном давлении тесто подвергается дополнительной аэрации, что подтверждается снижением его плотности. При этом общее время замеса теста уменьшается, что говорит об интенсификации процесса замеса. Изменение давления в емкости тестосмесителя позволяет регулировать степень аэрации вафельного теста.

Таким образом, изменяя давление в емкости тестосмесителя, можно регулировать степень аэрации вафельного теста. За счет уменьшения степени аэрации теста также существенно снижается окисление перемешиваемых масс.

На вязкость теста и, соответственно, на его качество влияет также время его доставки на выпечку.

В сравнительных экспериментах исследовали вафельное тесто, полученное при традиционном замесе, длительность которого в среднем составляла 20 минут, а также тесто, замешанное в турбосмесителе ТМ-60 [13] в течение 3 минут, и тесто, приготовленное в предлагаемом тестосмесителе в течение 40 секунд.

В таблице 3 показано влияние времени доставки вафельного теста на выпечку на его вязкость при замесе теста на различных тестосмесителях.

Таблица 3. Влияние величины времени доставки вафельного теста в вафельную печь на его вязкость, Па × с

Способ замеса	Время доставки готового теста на выпечку вафельных листов, t, мин								
	1	3	5	10	15	20	25	30	35
Традиционный замес	2,5	2,5	2,5	3,0	3,2	3,30	3,5	4,0	4,5
Замес в турбосмесителе ТМ-60	1,0	1,0	1,1	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	3,0
Замес на предлагаемом тестосмесителе	0,84	0,84	0,85	0,9	0,95	1,5	2,0	2,2	2,5

Как видно из данных, представленных в таблице 3, начальная вязкость вафельного теста при разных способах его приготовления различна. Масса одной порции замешиваемого теста при традиционном замесе и в турбосмесителе ТМ-60 составляет 66 кг, а в предлагаемом тестосмесителе масса одной дозы составляет 7,5 кг, при общей производительности тестосмесителя 330 кг/ч.

Так, при производительности вафельной печи 100 кг/ч последняя порция замешанного теста при традиционном замесе и замесе в турбосмесителе ТМ-60 достигнет форм вафельной печи через 40 минут, тогда как в предлагаемом тестосмесителе порция замешанного теста достигает форм вафельной печи в течение 5 минут.

Как уже было сказано выше, вязкость вафельного теста не является постоянной величиной и зависит от касательного напряжения и скорости сдвига. При исследовании конкретного образца теста с увеличением скорости сдвига действующие напряжения на тесто повышаются, его структура изменяется и происходит снижение вязкости. При дальнейшем снижении скорости сдвига вязкость может снижаться, а затем опять восстанавливаться. Результатом этого является увеличение вязкости теста по окончании воздействия рабочих органов тестосмесителей. Это явление (гистерезис) рассмотрено в работе [6]. Показано, что гистерезис происходит потому, что после некоторой выдержки вафельного теста в нем восстанавливаются разрушенные структурные связи.

Итак, чем длительнее хранение вафельного теста перед выпечкой, тем больше его вязкость, что приводит к снижению его текучести, ухудшению заполняемости ва-

фельных форм, расслаиванию теста. Все это в конечном итоге ухудшает качество выпекаемых вафельных листов и, соответственно, качество готовой продукции.

Таким образом, при приготовлении вафельного теста необходимо создавать слабоструктурированную, агрегативно устойчивую дисперсную систему с заданными показателями влажности и вязкости.

В разработанной автоматической станции для приготовления вафельного теста предлагаются новые конструкции дозатора для сыпучих компонентов и смесителя для вязко-пластичных смесей, отличающиеся интенсивным смешиванием рецептурной смеси с эмульсией и получением гомогенного вафельного теста в короткие сроки.

Предлагаемый способ приготовления вязко-текучей смеси [10] позволяет использовать преимущества машин периодического действия и доставлять непрерывно к вафельной печи свежую порцию готового вафельного теста. Это исключает затягивание и потерю гомогенности теста при выпечке, что способствует получению стабильно высокого качества вафельной продукции.

Как было установлено ранее, основными параметрами, влияющими на качество вафельного теста, являются как технологические (величина вакуума в емкости тестосмесителя; время замеса теста; время доставки теста от момента его готовности до момента подачи теста в вафельную печь), так и кинематические параметры (окружная скорость, частота вращения и диаметр турбины).

Проведенные исследования позволили определить рациональные технологические и кинематические параметры вакуумного тестосмесителя.

Установлено, что при вакуумировании емкости тестосмесителя эти параметры отличаются от аналогичных параметров, полученных при атмосферном давлении. Так, при величине давления в емкости тестосмесителя $P = 30$ кПа уже после 40 с замеса вязкость теста имеет минимальное значение. Кроме того, структура теста в этом случае также имеет полную однородность, что указывает на готовность вафельного теста к дальнейшему использованию для выпечки вафельных листов. Наличие регулируемого вакуума в емкости тестосмесителя обеспечивает регулирование аэрации смешиваемых масс путем варьирования времени замеса теста при вакуумировании и атмосферном давлении.

Таким образом, изменяя давление в емкости тестосмесителя, можно регулировать степень аэрации смешиваемой смеси.

Эксперименты показали, что наиболее рациональная скорость вращения ротора турбины тестосмесителя составляет 4,42 м/с ($n = 10,5$ с⁻¹, $d = 0,134$ м). При указанных параметрах вязкость вафельного теста и удельная мощность, необходимая для замеса вафельного теста, имеют минимальные значения.

В результате проведенных исследований установлены также рациональные параметры работы автоматической станции для приготовления вафельного теста: время замеса теста – 30–40 с; рабочее давление в вакуум-системе – 30 кПа. При этом динамическая вязкость при влажности теста, равной 64%, составляла 0,84 Па·с. Предел прочности образцов выпеченных вафельных листов составил 1,46 МПа, величина относительной деформации – 1,08%, модуль Юнга – 94–104 МПа. Полученные показатели соответствуют высокому качеству вафельных листов.

Эксперименты также показали, что время полного цикла замеса вафельного теста, с учетом загрузки исходных компонентов в тестосмеситель и разгрузки готового теста, составляет 80 с. Таким образом, в течение часа на предлагаемой автоматической станции можно провести 44 полных цикла замеса вафельного теста. При этом ее производительность составит 330 кг/ч.

Технические характеристики предлагаемой автоматической станции и станции непрерывного приготовления вафельного теста (прототип) [4] представлены в таблице 4.

Таблица 4. Сравнительные технические характеристики предлагаемой станции и прототипа

Характеристика	Станция непрерывного приготовления вафельного теста (прототип)	Предлагаемая автоматическая станция для приготовления вафельного теста
Производительность, кг/ч	330	330
Необходимая производственная площадь, м ²	10	0,84
Общая мощность электродвигателей, кВт	12	4,5
Соотношение удельных энергозатрат, Нуд ₁ / Нуд ₂	2,67	

Удельные энергозатраты для замеса вафельного теста в рассматриваемых станциях определялись по формуле

$$N_{уд} = \frac{N}{Q}, \quad (2)$$

где N – мощность, затрачиваемая на замес вафельного теста, кВт;

Q – производительность станции, кг/ч.

Выводы

В станции-прототипе непрерывного приготовления вафельного теста удельные энергозатраты замеса вафельного теста составляют 36,4 Вт/кг, в предлагаемой автоматической станции – 13,63 Вт/кг.

Таким образом, при использовании предлагаемой станции замеса вафельного теста удельные энергозатраты снижаются в 2,67 раза, что свидетельствует о высокой энергоэффективности разработанной конструкции.

Библиографический список

1. Аминаева И.Я. Разработка рецептур и совершенствование технологии вафельных изделий функционального назначения / И.Я. Аминаева // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2012. – № 2–3. – С. 100.
2. Драгилев А.И. Практикум по расчетам оборудования кондитерского производства: учеб. пособие для техникумов / А.И. Драгилев, Г.М. Невзоров: – Москва : Агропромиздат, 1990. – 176 с.
3. Драгилев А.И. Производство мучных кондитерских изделий : учеб. пособие для вузов / А.И. Драгилев, Я.М. Сезанаев. – Москва : Дели, 2000. – 446 с.
4. Драгилев А.И. Технологическое оборудование кондитерского производства : учеб. пособие / А.И. Драгилев, Ф.М. Хамидулин. – Санкт-Петербург : Троицкий мост, 2011. – 360 с.

5. Иванова И.Б. «Вафельные грезы» / И.Б. Иванова // Рекламно-информационный журнал PROD & PROD продвижение продовольствия. – 2012. – № 6 (32). – С. 8.
6. Казонен Ю.А. Совершенствование технологии и разработка рецептур изделий из вафельного теста : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.15 / Ю.А. Казонен. – Санкт-Петербург, 2004. – 137 с.
7. Муратова Е.И. Реология кондитерских масс : монография / Е.И. Муратова, П.М. Смолихина. – Тамбов : ФГБОУ ВПО ТГТУ, 2013. – 188 с.
8. Пат. 2 379 893 Российская Федерация, МПК А21С 1/02 (2006.01). Тестомесильная машина / Невзоров В.Н., Мацкевич И.В. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет». – № 2008124858/13; заявл. 17.06.2008; опубл. 27.01.2010, Бюл. № 3. – 4 с.
9. Пат. 2 475 027 Российская Федерация, МПК А21С 1/02 (2006.01). Тестомесильная машина / Самойлов В.А., Ярум А.И. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет». – № 2011136498/13; заявл. 01.09.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5. – 4 с.
10. Пат. №2 566 784 Российская Федерация, МПК В01F 3/12, В01F 5/00, В01F 5/12, В01F 7/18, В01F 33/06 (2006.01). Способ получения вязко-пластичной смеси и устройство для его осуществления / Сопляченко В.Н. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Сопляченко Вячеслав Николаевич. – № 201411293/05; заявл. 02.04.2014; опубл. 27.10.2015, Бюл. № 30. – 8 с.
11. Пат. 2 581 483 Российская Федерация, МПК А21С 1/02 (2006.01). Автоматическая станция для приготовления вязко-текучей смеси / Сопляченко В.Н. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.». – № 2015100735/13; заявл. 12.01.2015; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11. – 9 с.
12. Старшов Д.Г. Исследование и разработка вакуумной тестомесильной машины / Д.Г. Старшов, В.М. Седелкин, Г.И. Старшов // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – Т. 45, № 2. – С. 99–105.
13. Турбомиксер ТМ-60 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.3f-eng.ru/products/smeshivanie/turbomikser_tm_60.html (дата обращения: 21.02.2017).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Дмитрий Геннадьевич Старшов – аспирант кафедры «Технология и оборудование химических, нефтегазовых и пищевых производств» Энгельсского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Российская Федерация, г. Энгельс, тел. 8(8453) 95-35-53, e-mail: starshov49@rambler.ru.

Валентин Михайлович Седелкин – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование химических, нефтегазовых и пищевых производств» Энгельсского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Российская Федерация, г. Энгельс, тел. 8(8453) 95-35-53, e-mail: eti@techn.sstu.ru.

Геннадий Иванович Старшов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование химических, нефтегазовых и пищевых производств» Энгельсского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Российская Федерация, г. Энгельс, тел. 8(8453) 95-35-53, e-mail: starshov49@rambler.ru.

Андрей Иванович Никитин – старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование химических, нефтегазовых и пищевых производств» Энгельсского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Российская Федерация, г. Энгельс, тел. 8(8453) 95-35-53, e-mail: mppnik@rambler.ru.

Дата поступления в редакцию 03.01.2018

Дата принятия к печати 26.01.2018

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Dmitriy G. Starshov – Post-Graduate Student, the Dept. of Processes and Equipment of Chemical, Oil & Gas and Food Industries, Engels Technological Institute (Branch), Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Engels, Russian Federation, tel. 8(8453) 95-35-53, e-mail: starshov49@rambler.ru.

Valentin M. Sedelkin – Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Processes and Equipment of Chemical, Oil & Gas and Food Industries, Engels Technological Institute (Branch), Yuri Gagarin State Technical University of Saratov Engels, Russian Federation, tel. 8(8453) 95-35-53, e-mail: eti@techn.sstu.ru.

Gennadiy I. Starshov – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Processes and Equipment of Chemical, Oil & Gas and Food Industries, Engels Technological Institute (Branch), Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Engels, Russian Federation, tel. 8(8453) 95-35-53, e-mail: starshov49@rambler.ru.

Andrey I. Nikitin – Senior Lecturer, the Dept. of Processes and Equipment of Chemical, Oil & Gas and Food Industries, Engels Technological Institute (Branch), Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Engels, Russian Federation, tel. 8(8453) 95-35-53, e-mail: mppnik@rambler.ru.

Received January 03, 2018

Accepted January 26, 2018