

На правах рукописи



Кольцов Семен Михайлович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ САХАРНОЙ
СВЕКЛЫ С РАЗРАБОТКОЙ РЕЖИМОВ ВЕНТИЛИРОВАНИЯ КАГАТА**

Специальность: 05.20.01 – Технологии и средства
механизации сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мичуринск-наукоград РФ, 2022

Работа выполнена на кафедре «Технологические процессы и техносферная безопасность» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, академик РАН **Завражнов Анатолий Иванович**

Официальные оппоненты: **Кульнева Надежда Григорьевна,** доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», профессор кафедры «Технологии бродильных и сахаристых производств»

Апасов Игорь Владиславович, кандидат технических наук, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара имени А.Л. Мазлумова», директор института

Ведущая организация: ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр»

Защита диссертации состоится 30 июня 2022 г. в 10 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.179.03 в ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101, корпус 1, зал заседаний диссертационных советов, тел./факс (47545) 3-88-13, доб. 3-82, e-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет» и на сайте www.mgau.ru, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации www.vak.ed.gov.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью организации, с указанием индекса, почтового адреса, телефона, электронной почты и сайта организации, фамилии, имени, отчества лица, подготовившего отзыв, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Н.В. Михеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Длительное хранение свеклы в полевых кагатах на полях возделывания сопряжено с повышенными потерями свекломассы до 11-16%.

Сохранность кагатов сахарной свеклы зависит от соотношения массы хранимого сырья к площади поверхности кагата, соприкасающейся с окружающей средой. В полевых кагатах воздействию окружающей среды подвергается до 77% объема насыпи, и при наступлении заморозков они могут подмораживаться целиком.

Одним из способов обеспечения сохранности корнеплодов является увеличение размеров кагатов сахарной свеклы для повышения соотношения массы хранимого сырья к площади поверхности кагата, соприкасающейся с окружающей средой. В больших кагатах, оснащенных системой активной вентиляции, 13–31% насыпи корнеплодов подвержено влиянию окружающей среды.

Длительное хранение в больших кагатах, оснащенных системой активной вентиляции, позволяет снизить потери свекломассы до 3-5%.

Применение технологии активного вентилирования кагатов позволяет увеличить продолжительность работы сахарного завода на 9-22% и снизить себестоимость сахара на 2-4,5%.

Поэтому актуальным является совершенствование технологии хранения сахарной свеклы в больших кагатах оснащенных системой вентиляции при изменяющихся погодных-климатических условиях во время хранения.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в исследование вопроса хранения сахарной свеклы, а также в совершенствование технологии и технических средств внесли многочисленные работы ученых Б.А. Рубина, А.И. Завражнова, М.З. Хелемского, Н.М. Сапронова, В.В. Спичака, В.И. Бодрова, Е.В. Кузнецова, Л.Н. Путилиной, Н.А. Бородянского, М.А. Волкова, С.В. Соловьева, В.А. Князева, Н.Н. Дидыка, А.А. Громковского, В.З. Жадана, В.А. Бойко, Д. Шпаара, А.Н. Морозова и других исследователей.

Большое значение для развития теории, расчета и конструирования систем активной вентиляции внесли такие ученые, как Н.Г. Кульнева, И.В. Апасов, М.К. Пружин, Е.В. Широких, Г.С. Косулин и другие.

Существует немало разнообразных конструкций и типов систем активной вентиляции. Известно, что в большинстве случаев системы активной вентиляции используют для охлаждения растительной продукции в закрытом овощехранилище с ограждающими конструкциями.

В данной работе решаются задачи совершенствования технологии хранения сахарной свеклы сроком более двух месяцев в кагатах, поверхность которых подвержена воздействию окружающей среды, путем разработки режимов работы системы вентиляции с автоматизированным типом управления режимами, а также на основе разработанной математической модели теплообменных процессов.

В известных трудах М.З. Хелемского, В.А. Князева, Н.А. Бородянского, В.А. Бойко и др. теоретически исследованы и практически проверены парамет-

ры системы активной вентиляции, принципиальные схемы устройств вентиляционных систем, теплообменные процессы, протекающие при охлаждении растительной продукции. Но теоретически и экспериментально не обоснованы режимы работы системы активной вентиляции при изменяющихся погодноклиматических условиях во время хранения. В связи с этим необходимо проведение дополнительных исследований по совершенствованию технологии и разработке режимов хранения сахарной свеклы в кагатах.

Цель исследований – повышение эффективности хранения сахарной свеклы в кагатах путем совершенствования технологии и разработки режимов работы системы активной вентиляции.

Задачи исследований:

- провести анализ технологий и технических средств, систем управления работой активной вентиляцией для кагата сахарной свеклы;
- теоретически обосновать режимы работы системы активной вентиляции в кагатах сахарной свеклы при изменяющихся погодноклиматических условиях во время хранения;
- экспериментально исследовать теплообменные процессы, протекающие в кагатах, и определить влияние режимов работы системы активной вентиляции на процесс хранения сахарной свеклы;
- обосновать параметры, характеризующие режимы работы при управлении системой активной вентиляции;
- разработать алгоритм очередности разгрузки кагатов в переработку в зависимости от потери массы кагата в период хранения и продолжительности вентилирования;
- обосновать экономическую эффективность применения системы активной вентиляции в кагатах сахарной свеклы.

Объект исследования – технологический процесс хранения в кагатах сахарной свеклы с применением системы активной вентиляции.

Предмет исследования – закономерности процессов в свекловичной массе при хранении в кагатах с применением системы активной вентиляции.

Научная новизна результатов исследований:

- разработана математическая модель изменения температуры и образующихся потерь свекломассы во время работы активной вентиляции в кагате сахарной свеклы;
- обоснованы величины параметров, характеризующих работу системы активной вентиляции в режиме поддержания, охлаждения и в циклическом;
- обоснованы режимы работы системы активной вентиляции при хранении сахарной свеклы в кагатах;
- разработан алгоритм очередности разгрузки кагатов в переработку в зависимости от продолжительности вентилирования и потери массы кагата в период хранения.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований:

– результаты теоретических исследований являются базой для совершенствования процесса хранения сахарной свеклы в кагатах оборудованных системой активной вентиляции;

– обоснованные выводы и рекомендации по выбору режимов работы и управления системой активной вентиляции позволяют оптимизировать процесс длительного хранения сахарной свеклы;

– разработанная математическая модель процесса охлаждения при вентилировании в кагатах сахарной свеклы позволяет усовершенствовать управление системой вентиляции, как с новым предложенным программным обеспечением, так и при модернизации существующих систем.

– по материалам исследований разработаны рекомендации по использованию разработчиками при проектировании системы вентиляции кагатов и модернизации существующих систем, разработке программного обеспечения управления работой системы активной вентиляции на площадках хранения, а также для студентов высших и средних учебных заведений, слушателей институтов и факультетов повышения квалификации кадров агропромышленного комплекса и сахарных заводов.

Методология и методы исследования. При проведении теоретических исследований использовались основные положения теории тепломассообмена и методов математической статистики. Лабораторные исследования физико-механических свойств корнеплодов сахарной свеклы проводились на кафедре «Технологические процессы и техносферная безопасность» ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ. Лабораторные и полевые исследования работы системы активной вентиляции проведены по методикам в соответствии с действующим ГОСТ, а также с разработанными частными методиками с использованием сертифицированных приборов и оборудования. Создана экспериментальная установка, на которой проведены исследования по изучению тепломассообменных процессов в насыпи при хранении сахарной свеклы с системой активной вентиляции.

Обработка полученных результатов исследований осуществлялась на ЭВМ с помощью прикладных программ: MathCAD 14, Statistica 12.0, Microsoft Excel 2007.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты исследований изменения температуры и массы насыпи кагата сахарной свеклы при работе активной вентиляции;

– результаты исследований по обоснованию режимов работы системы активной вентиляции при хранении сахарной свеклы в кагатах;

– алгоритм работы системы управления системой активной вентиляции при хранении сахарной свеклы в кагатах;

– алгоритм очередности разгрузки кагатов в переработку в зависимости от продолжительности вентилирования и потери массы кагата в период хранения;

– технико-экономическое обоснование применения технологии длительного вентилируемого хранения сахарной свеклы в вентилируемых кагатах с предлагаемой системой управления.

Личный вклад автора. Автором проведен анализ состояния вопроса, результатом которого стала постановка цели и задач исследований. Теоретически и экспериментально обоснованы режимы работы системы активной вентиляции кагата сахарной свеклы. Представленные в работе научные данные получены при непосредственном личном участии автора в период с 2018 по 2021 гг. в результате исследований на базе ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ на кафедре «Технологические процессы и техносферная безопасность» и на базе хозяйства ООО «Промсахар» в Курской области.

Степень достоверности и апробация работы подтверждается достаточным количеством выполненных экспериментов, использованием современных общепринятых методик, ГОСТов, приборов и оборудования, сопоставимостью результатов, полученных теоретическими и экспериментальными исследованиями, с результатами, полученными другими авторами, внедрением полученных результатов в производство, выступлениями с результатами исследований на международных конференциях, одобрением и публикацией материалов в ведущих журналах.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде международных и всероссийских научно-технических конференциях и выставках: Выставка-конкурс научно-технических достижений студентов, аспирантов и молодых ученых Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, 2018 г.); Всероссийской конкурс научных проектов студентов, аспирантов, молодых ученых и сотрудников предприятий и организаций малого и среднего бизнеса «Инновационные проекты для малого и среднего бизнеса» (г. Мичуринск, 2018 г.); Всероссийский конкурс на лучшую работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Министерства сельского хозяйства Российской Федерации в номинации «Технические науки» (г. Москва, 2020 г.); Национальная научно-практическая конференция «Творческое развитие идей В.А. Потапова в условиях интенсификации садоводства» (г. Мичуринск, 2020 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития сельского хозяйства и сельских территорий» (г. Мичуринск, 2020 г.); Международная научно-практическая конференция «Аграрная наука и инновационные сельскохозяйственные технологии» (г. Мичуринск, 2020 г.).

Исследования проводились при поддержке стипендиальной программы благотворительного фонда В. Потанина, а также гранта фонда содействия инновациям по программе «УМНИК». Проведены консультации специалистов свеклосахарной отрасли по вопросам длительного вентилируемого хранения в качестве эксперта секции «Сырье» на технологическом семинаре производителей сахара стран ЕАЭС «Клуб технологов 2021». Передано экономическое обоснование внедрения технологии длительного сырьевого хранения сахарной свеклы в ассоциацию крестьянских (фермерских) хозяйств и сельскохозяй-

ственных кооперативов России (АККОР) по Тамбовской области и в Управление сельского хозяйства по Тамбовской области.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований внедрены на сахарном заводе ООО «Промсахар» пос. им. Куйбышева Курской области.

Материалы исследований используются в ООО «Агрохолд» г. Котовск (Тамбовская область) для совершенствования программного обеспечения по управлению системой активной вентиляции кагатов сахарной свеклы.

Разработаны и переданы руководству ассоциации АККОР Тамбовской области рекомендации по организации вентилируемого хранения кагатов корнеплодов с использованием нового и модернизированного оборудования и программного обеспечения управления работой системы вентиляции.

Публикации.

По материалам исследований опубликовано 19 научных работ, в которых отражено основное содержание диссертационной работы, в том числе из них 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получен патент РФ на изобретение. Общий объем публикаций составляет 7,33 п.л., из них лично соискателю принадлежит 2,86 п.л. Данная работа соответствует паспорту специальности 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства по пункту 2 – «Разработка теории и методов технологического воздействия на среду и объекты сельскохозяйственного производства» и пункту 4 – «Разработка операционных технологий и процессов в растениеводстве, животноводстве и гидрометеорологии».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Работа изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 53 иллюстрации, 10 таблиц. Список используемой литературы включает 141 источник отечественных и зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение включает следующие основные структурные элементы: актуальность темы исследования, степень её разработанности, цель и задачи, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, методологию и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов.

В первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследований хранения корнеплодов сахарной свеклы» представлены комплексный анализ технологии хранения сахарной свеклы как объекта исследований; выполнен анализ теоретических исследований тепловлажностных процессов хранения насыпи растительной продукции; проведен анализ технических средств хранения корнеплодов сахарной свеклы в кагатах, оборудованных системой активной вентиляцией; выполнен анализ систем управления и режимов работы систем активной вентиляции.

В настоящее время в производстве используется несколько типов систем активной вентиляции для кагатов сахарной свеклы, которые различаются по конструкции и функционалу.

На рисунке 1 представлена классификация технических средств активной вентиляции кагатов сахарной свеклы.

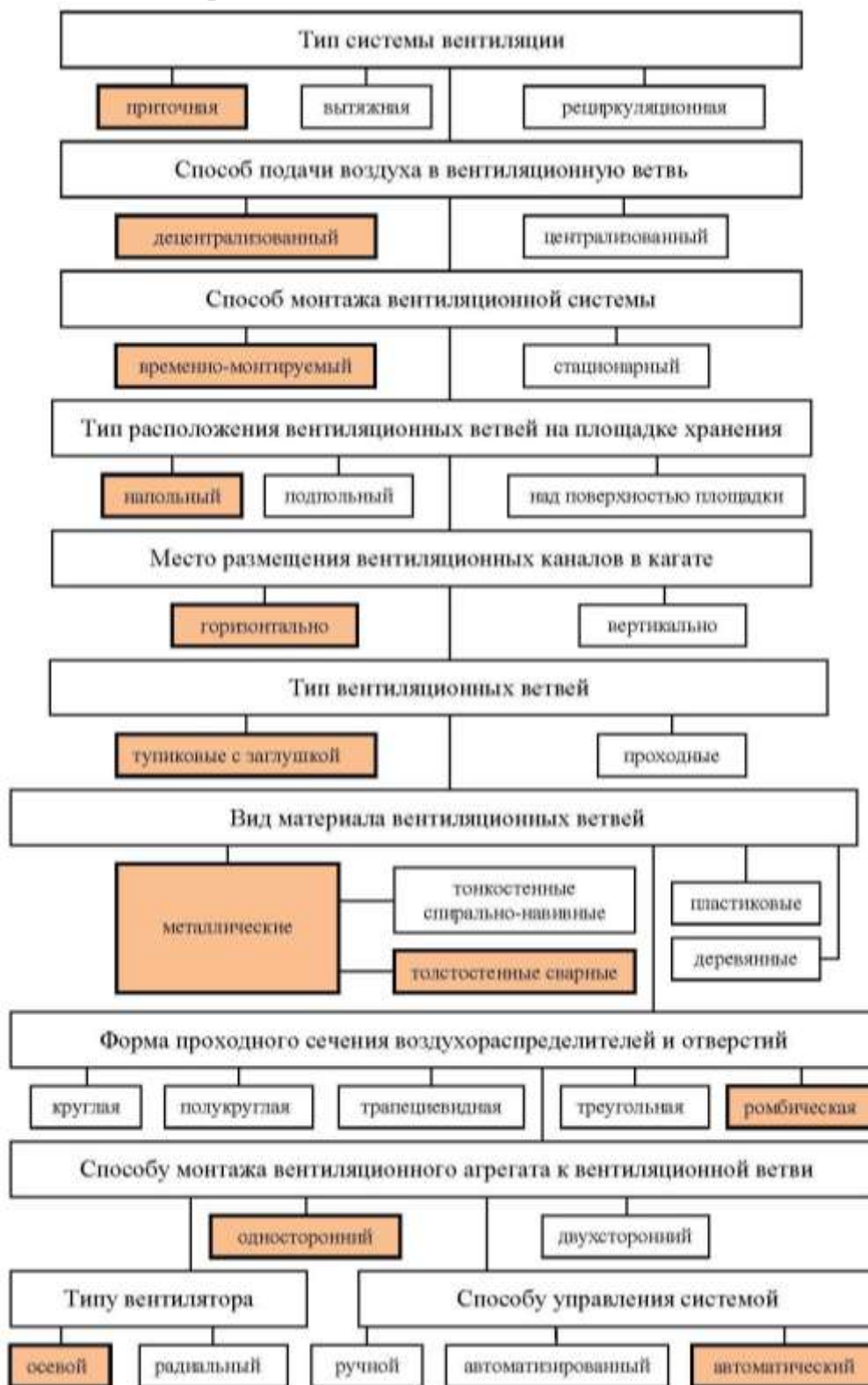
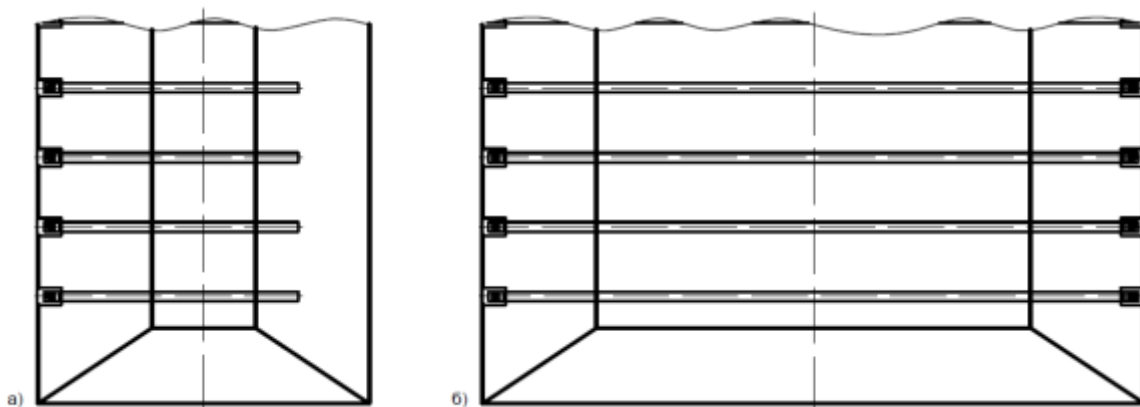


Рисунок 1 – Классификация технических средств активной вентиляции кагатов сахарной свеклы

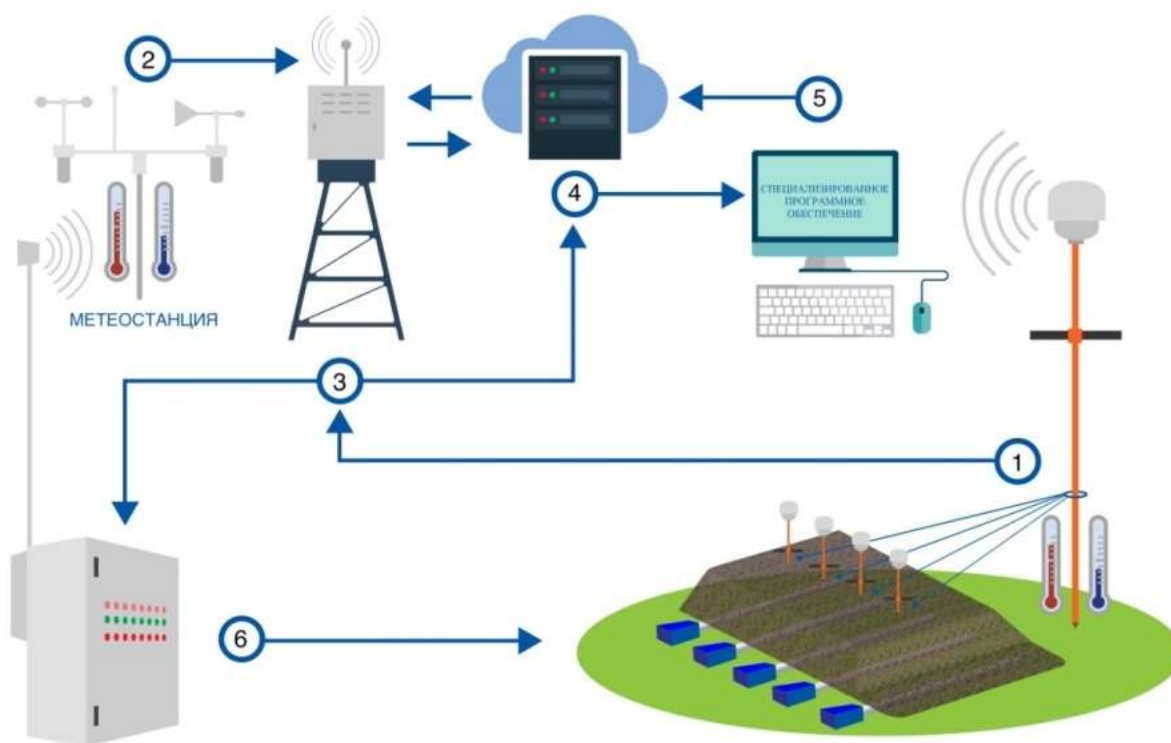
Распространение получили два типа децентрализованных систем с вентиляционными ветвями, расположенными поперек относительно центральной оси кагата. В этих системах используют напольные металлические воздухопроводы с круглым сечением. Отличие в схемах заключается в способе нагнетания воздуха в воздухопровод: с одной или с двух сторон кагата (рисунок 2).



а – подача воздуха с одной стороны для одинарного кагата, б – подача воздуха с двух сторон спаренного кагата

Рисунок 2 – Применяемые системы активной вентиляции

На рисунке 3 показана схема организации аппаратной части системы вентиляции для кагата сахарной свеклы.



1 – беспроводная термоштанга, 2 – локальная метеостанция, 3 – базовая станция, 4 – сервер, 5 – автоматизированное рабочее место оператора, 6 – шкаф управления вентиляцией

Рисунок 3 – Принципиальная схема взаимодействия элементов системы длительного хранения сахарной свеклы

В кагат устанавливались беспроводные термоштанги по определенной схеме привязки к номерам вентиляторов. На базовую станцию 3 поступали сигналы температуры с различных частей кагата от термоштанг 1, а также значения температуры и влажности окружающей среды с метеостанции 2. Со станции по сети Ethernet полученные сигналы передавались на сервер 4, где они обрабатывались. При выполнении условий алгоритма с сервера на базовую станцию поступает сигнал включения вентилятора, откуда направлялся к шкафу управления вентиляцией (ШУВ) 6, где производился пуск вентиляционной системы. Параметры, необходимые для комплексной оценки работы системы отображались на автоматизированном рабочем месте (АРМ) оператора 5.

Снижение зависимости управления работой алгоритмов системы активной вентиляции от операторов возможно за счет усовершенствования программного обеспечения путем уточнения режимов работы системы активной вентиляции при изменяющихся погодных-климатических условиях в период хранения.

Во второй главе «Теоретическое обоснование конструктивных параметров и режимов работы системы активной вентиляции кагатов» исследован тепломассообменный процесс при хранении сахарной свеклы в кагатах; представлена материальная и тепловая модель процесса охлаждения кагата; обоснованы конструктивные параметры системы активной вентиляции с учетом характеристик технологических машин и оборудования; разработаны усовершенствованный алгоритм управления режимами системы активной вентиляции кагатов и алгоритм очередности разгрузки кагатов в переработку.

Тепловой баланс кагата сахарной свеклы при хранении определяется уравнением:

$$Q = Q_{\text{дых}} + Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}} - Q_{\text{и}} - Q_{\text{в}} \quad (1)$$

где $Q_{\text{дых}}$ – тепло, выделяемое при дыхании корнеплодов сахарной свеклы, Дж; $Q_{\text{л}}$ – тепло, поступающее за счет солнечной радиации, Дж; $Q_{\text{к}}$ – тепло, полученное в результате конвективного теплообмена, Дж; $Q_{\text{и}}$ – тепло, затраченное на испарение влаги, Дж; $Q_{\text{в}}$ – тепло, отведенное системой активной вентиляции Дж.

Однако данное уравнение не отражает влияние отдельных составляющих теплового баланса на слои кагата, которые формируются при хранении.

Изменение количества тепла сахарной свеклы, находящейся в кагате, представлено через её теплоемкость C и массу кагата $M_{\text{к}}$:

$$Q = M_{\text{к}} C \Delta T \quad (2)$$

Теплота $Q_{\text{дых}}$, выделяемая при дыхании всей массы свеклы, хранящейся в кагате $M_{\text{к}}$, определяется по уравнению:

$$Q_{\text{дых}} = M_{\text{к}} q_{\text{дых}} \quad (3)$$

где $q_{\text{дых}}$ – количество теплоты, выделяемое 1 т корнеплодов сахарной свеклы за единицу времени, Дж/(т·сут).

Количество тепла, поглощаемое кагатом сахарной свеклы в дневное время за счет солнечной радиации, определяется уравнением:

$$Q_n = \frac{100 - \gamma}{100} q_p S \tau K_u \quad (4)$$

γ – отражательная способность поверхности кагата, %;

q_p – удельный тепловой поток солнечной радиации, (Вт·ч)/м²;

S – площадь поверхности кагата, м²;

τ – длительность воздействия солнечной радиации, ч;

K_u – коэффициент инсоляции.

Конвективная составляющая теплового баланса определяется уравнением теплоотдачи:

$$Q_k = \alpha S \tau (T_{cв} - T_в) \quad (5)$$

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

Количество тепла, расходуемое на испарение влаги из сахарной свеклы Q_u определяется уравнением:

$$Q_u = j S r \tau \quad (6)$$

j – интенсивность испарения, кг/(м²·ч);

r – удельная теплота испарения, Дж/кг.

Количество тепла, уносимое системой активной вентиляции из кагата, определяется уравнением:

$$Q_в = G_в C_в (T_{вк} - T_{вн}) \tau \quad (7)$$

$G_в$ – расход воздуха, м³/ч;

$C_в$ – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°С);

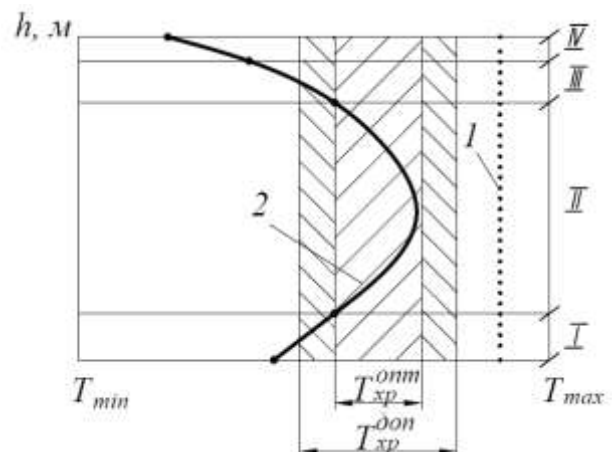
$T_{вк}, T_{вн}$ – температура воздуха до и после прохождения кагата, °С.

Из-за больших размеров вентилируемого кагата длительного хранения сахарной свеклы вышеперечисленные факторы окружающей среды могут оказывать воздействие только на его часть. На основании анализа литературных источников и исследований автора можно утверждать, что в кагате в процессе хранения можно выделить следующие слои:

– **поверхностный** слой толщиной 0,2-0,3 м (IV рисунок 4) – слой безусловных повреждений корнеплодов сахарной свеклы, которые утрачивают свои технологические свойства. Поверхностный слой непосредственно взаимодействует с окружающим воздухом и в нем не формируется собственный тепловлажностной режим хранения. Толщина слоя в процессе хранения изменяется под воздействием окружающего воздуха и в среднем составляет 5% от общей массы кагата.

1 – в момент укладки сахарной свеклы в кагат; 2 – в процессе хранения; T_{xp}^{opt} – оптимальный температурный диапазон хранения; T_{xp}^{don} – допустимый температурный диапазон хранения

Рисунок 4 – Распределение температур внутри кагата сахарной свеклы по высоте



– **промежуточный** толщиной 0,5-0,7 м (*III*) – слой условных поврежденных сахарной свеклы, который расположен под поверхностным слоем. На тепловлажностной режим в этом слое оказывает воздействие, как окружающий воздух, так и основной массив корнеплодов, расположенный в нижележащем слое в зоне сохранности. Корнеплоды теряют влагу и массу из-за низкой относительной влажности межкорневого пространства при сохранении своих технологических свойств. Межкорневое пространство лучше защищено, менее интенсивно взаимодействует с атмосферным воздухом, чем поверхностный слой, толщина которого составляет около 10% от общей массы кагата.

– **зона сохранности** сахарной свеклы (*II*), расположена под указанными слоями и характеризуется устойчивостью тепловлажностного режима, что обеспечивает сохранность корнеплодов. На неё приходится 75% массы кагата, поэтому при определении режима вентилирования следует ориентироваться на зону сохранности.

– **корректирующий** слой (*I*) с постоянной толщиной в 1-1,5 м (10% от общей массы кагата), в котором происходит насыщение влагой приточного воздуха в процессе вентилирования. Данный слой граничит с площадкой хранения.

Рекомендуемый оптимальный температурный диапазон хранения сахарной свеклы составляет +1...+3°C. Обеспечение длительного хранения основного массива корнеплодов в столь узком температурном диапазоне не представляется возможным, поэтому предлагается ввести разделение температурного диапазона хранения на оптимальный и допустимый. При этом верхнюю границу допустимого диапазона расширить до +5°C, а нижнюю границу - ограничить температурой -1°C исходя из температуры замерзания свекловичного сока в пределах -2...-4°C.

Для описания тепломассообменных процессов внутри кагата в процессе вентилирования предложена следующая математическая модель. Уравнение теплового баланса в процессе вентилирования кагата представлено формулой:

$$C_{св} m_{св} \cdot \frac{\partial T_{св}}{\partial \tau} = M_{в} C_{в} (T_{в}^к - T_{в}^о) + \alpha F_{св} (T_{св}^к - T_{в}^о) + j F_{св} \varepsilon_u Sr \quad (8)$$

где $C_{св}$, $C_{в}$ – теплоемкость свеклы и воздуха, Дж/(кг·°C); $m_{св}$, $M_{в}$ – масса насыпи корнеплодов сахарной свеклы и воздуха, кг; $T_{св}$ – температура свеклы, °C; τ – время, с; $T_{в}^о$, $T_{в}^к$ – температура воздуха до и после прохождения насыпи, °C; α – коэффициент теплопередачи между воздухом и свеклой, Вт/(м²·°C); $F_{св}$ – площадь поверхности корнеплодов сахарной свеклы, м²; $T_{св}^к$ – конечная температура свеклы, °C; j – интенсивность испарения, кг/(м²·сек); ε_u – коэффициент испарительной способности продукции; r – теплота парообразования, Дж/кг.

Известно, что корнеплод сахарной свеклы среднего качества состоит из воды (78,3%) и сухих веществ (21,7%), под которыми подразумеваются все вещества, остающиеся после удаления воды из корнеплода высушиванием. В зависимости от технологии и условий возделывания сахарной свеклы состав корнеплодов может изменяться. При формировании кагата кроме сахарной свеклы

поступают примеси, масса которых при хранении практически не изменяется.

Материальный баланс в процессе вентилирования кагата сахарной свеклы представлен системой уравнений (10):

$$\begin{cases} \frac{dM_{св}}{d\tau} = M_{сух.в-ва} + (M_{св}^к - M_{сух.в-ва}) + \delta j F_{св} (d_в^к - d_в^о)(M_в^о - M_{в.п.}^о) \\ \frac{dM_в}{d\tau} = M_в^о + \delta j F_{св} (d_в^к - d_в^о)(M_в^о - M_{в.п.}^о) \end{cases} \quad (9)$$

где $M_{св}$ – масса насыпи корнеплодов сахарной свеклы, кг; $M_{сух.в-ва}$ – составляющая часть сухих веществ в общей массе насыпи корнеплодов сахарной свеклы, кг; $M_{св}^к$ – масса свеклы в конце периода охлаждения, кг; $d_в^о, d_в^к$ – начальное и конечное влагосодержание воздуха, гр/кг; $M_в^о$ – масса воздуха на входе в насыпь корнеплодов сахарной свеклы, кг.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» изложена программа, разработанные методики экспериментальных исследований, принцип работы и характеристики исследуемой системы активной вентиляции кагата сахарной свеклы.

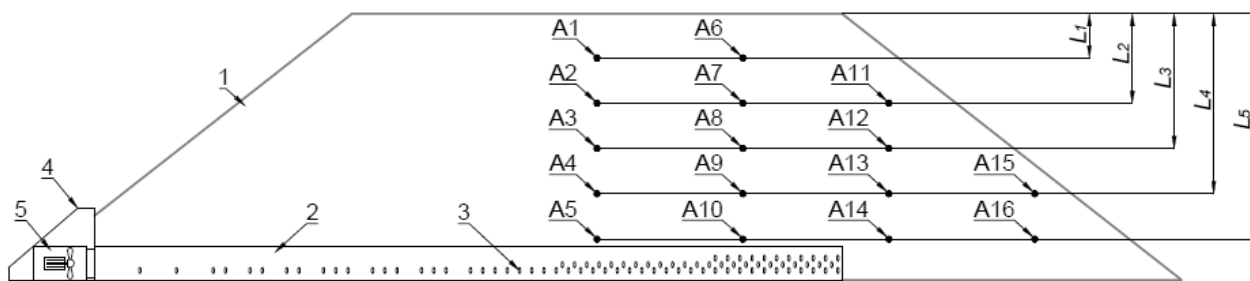
Лабораторные исследования физико-механических свойств корнеплодов сахарной свеклы проводились на кафедре «Технологические процессы и техно-сферная безопасность» ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ.

Исследования тепломассо-обменных процессов с учетом воздействия активной вентиляции проводились на вентилируемом кагате на территории свеклопункта сахарного завода ООО «ПРОМСАХАР» (Курская область).



Рисунок 5 – Кагат и вентиляционная ветвь

Исследования тепломассо-обменных процессов с учетом воздействия активной вентиляции проводились на вентилируемом кагате (рисунок 5).

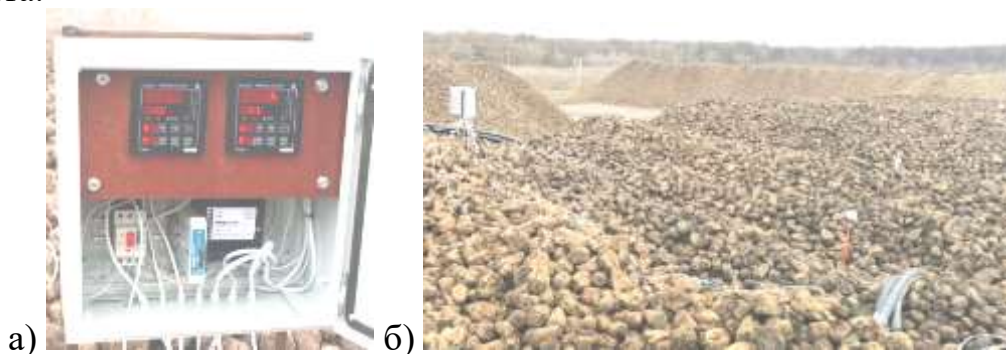


1 – кагат; 2 – вентиляционная ветвь; 3 – воздуховыпускные отверстия; 4 – рама вентиляционного агрегата; 5 – вентилятор; A1...A16 – расположение датчиков измерения температуры

Рисунок 6 – Вентилируемый кагат сахарной свеклы: а – вид сбоку; б – исследуемое сечение

Ширина нижнего основания кагата с активной вентиляцией составляет 30 м, ширина верхней площадки – 12 м, высота – 6,5 м, длина – 120 м, масса – 7 838 т. Вентилируемый кагат имеет форму циклически повторяющуюся: вентиляционные системы находились на расстоянии 6 м друг от друга.

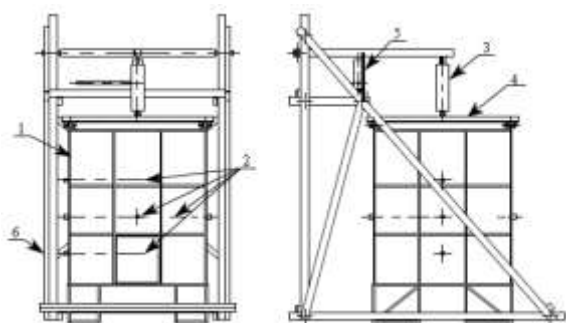
Датчики температуры в фрагменте кагата сахарной свеклы были расположены в количестве 16 штук над вентиляционной ветвью, согласно схеме, приведенной на рисунке 6, где указано расстояние от верхнего основания кагата до расположения датчика: $L_1=1,2$ м; $L_2=2,4$ м; $L_3=3,6$ м; $L_4=4,8$ м; $L_5=6,0$ м. Расположение датчиков обусловлено симметричной формой поперечного сечения кагата.



а – устройство шкафа измерения и записи данных; б – установка шкафа и датчиков температуры в кагате

Рисунок 7 – Аппаратура для измерения температуры в фрагменте кагата

Измерение температуры внутри кагата сахарной свеклы производилось с помощью проводных датчиков ОВЕН ДТС014-50М.В3.25/1,5, которые предназначены для температурных измерений газообразных неагрессивных сред. Считывание показаний осуществлялось измерителем-регулятором ОВЕН ТРМ-138-Р, для записи данных использовался архиватор ОВЕН МСД-200 (рисунок 7).



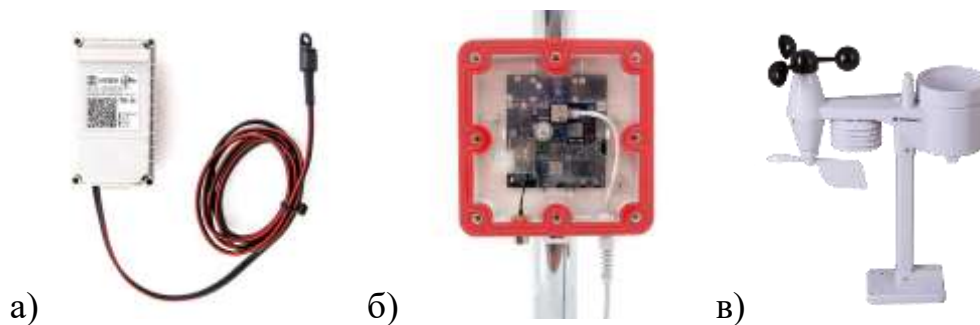
1 – емкость для хранения корнеплодов; 2 – трубы для размещения датчиков; 3 – весы подвесные; 4 – траверса; 5 – подъемный механизм; 6 – каркас;

Рисунок 8 – Схема экспериментальной установки для исследования тепломассообменных процессов

Для изучения тепломассообменных процессов в массиве сахарной свеклы использовалась экспериментальная установка, состоящая из емкости, каркаса, подъемного механизма и траверсы (рисунок 8).

Измерение массы корнеплодов сахарной свеклы осуществлялось взвешиванием емкости на подвесных весах 3. Подъем емко-

сти осуществлялся за траверсу 5 с помощью подъемного механизма 3, закрепленного на каркасе 2.



а – датчик температуры ВЕГА ДТ-11; б – базовая станция ВЕГА БС-1.2; в – локальная метеостанция Bresser 5-in-1

Рисунок 9 – Оборудование для измерения и беспроводной передачи данных

Сигнал с датчиков поступал на базовую станцию ВЕГА БС-1.2 откуда передавался на сервер. Для измерения температуры в массиве корнеплодов датчик ДТ-11 размещался в корпусе термощтанги. Измерение температуры в кагате проводилось весь исследуемый период хранения сахарной свеклы (рисунок 9).

Изменение параметров окружающей среды (температура, влажность, скорость и направление ветра, атмосферное давление) регистрировалось с помощью локальной метеостанции Bresser 5-in-1.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» представлены результаты анализа погодных-климатических условий в период хранения сахарной свеклы, определения значений уставок для обеспечения режимов работы системы активной вентиляции, применения алгоритма для определения очередности разгрузки кагатов в переработку, поправочных коэффициентов для математической модели процесса охлаждения кагата.

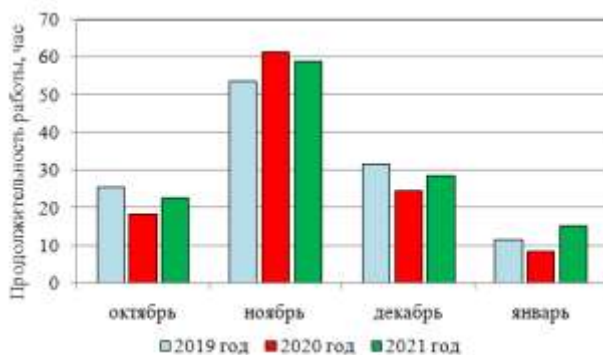
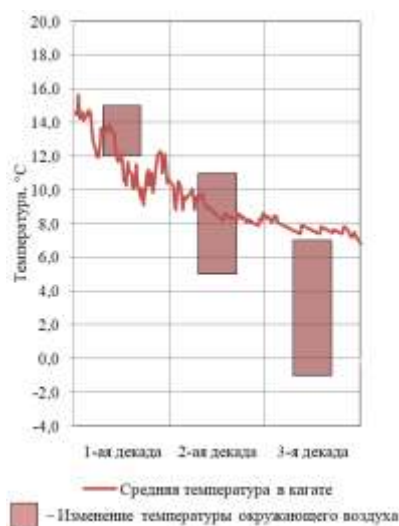


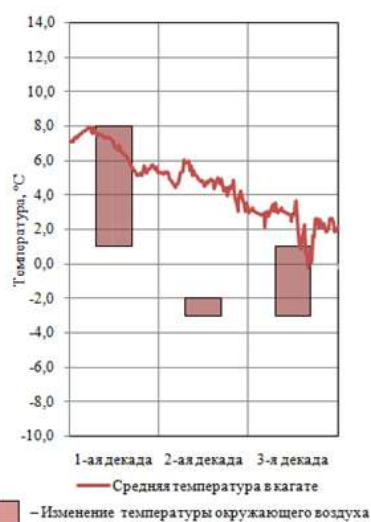
Рисунок 10 – Продолжительность работы системы активной вентиляции по месяцам

Продолжительность работы системы активной вентиляции кагата по месяцам года в течение трех последних лет представлена на рисунке 10.

Из графика следует, что в течение исследуемого периода продолжительность работы системы активной вентиляции по месяцам года распределяется неравномерно, а наибольшая нагрузка приходилась на ноябрь месяц.



а) октябрь



б) ноябрь

Рисунок 11 – Изменение температуры изменение температуры окружающего воздуха и кагата по декадам

По данным статистического анализа в первой декаде октября (рисунок 11-а) диапазон изменения температуры окружающей среды составил от 5 до 20°C. Межквартильный размах температуры окружающего (МКР) составил 12...15°C. При этом температура в кагате в начале декады составляла 14,5°C, в конце – 10,5°C, которая определяла ограниченные условия работы системы активной вентиляции.

Работа активной вентиляции в режиме поддержания температуры кагата должна обеспечиваться включением вентиляторов по уставке разницы температур между кагатом и воздухом окружающей среды.

$$k \geq T_{cg} - T_g \quad (10)$$

где k – величина уставки по разности температур между кагатом сахарной свеклы и воздухом из окружающей среды в режиме поддержания температуры кагата. Пороговые значения параметров, по достижении которых происходит срабатывание оборудования на включение и выключение системы активной вентиляции называются уставками.

В первой декаде ноября за исследуемый период (рисунок 11-б) МКР температуры окружающего воздуха составил 1...8°C, а температура в кагате снизилась с 7 до 5,4°C. Во второй декаде этого месяца наблюдалось смещение МКР до -3...-2°C, что позволило снизить температуру в кагате до 3,2°C, а в третьей декаде МКР изменился до -3...1°C, а температура в кагате снизилась до 2°C.

Изменение разности влагосодержания от разности температур между воздухом из окружающей среды и воздухом в межкорневом пространстве кагата с учетом введенных критериев отбора представлено на рисунке 12.

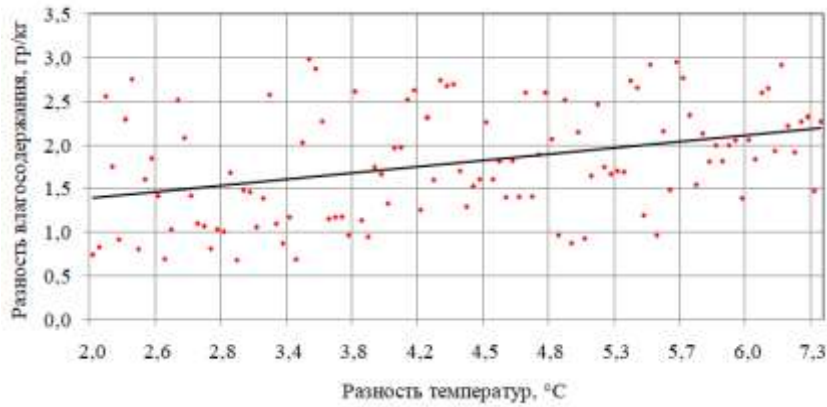


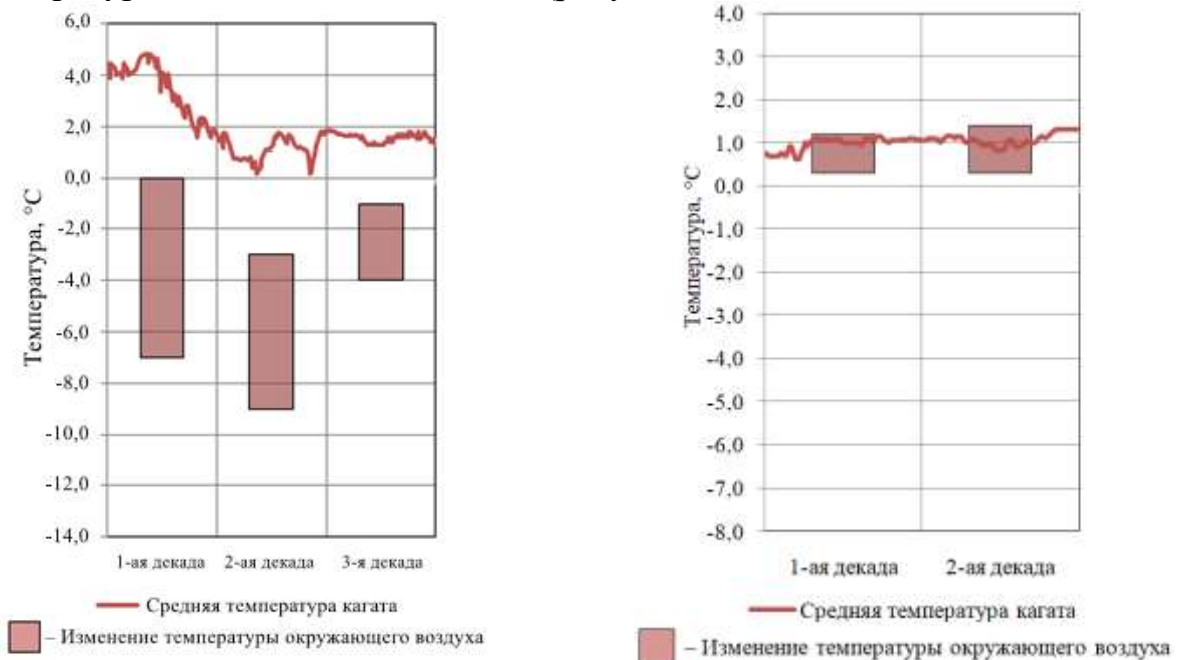
Рисунок 12 – График зависимости изменения разности влагосодержания от разности температур между воздухом из окружающей среды и воздухом в межкорневом пространстве кагата

Работа системы активной вентиляции кагата в режиме охлаждения представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} k \geq T_{св} - T_e \\ m \leq d_{св} - d_e \end{cases} \quad (11)$$

где m – величина уставки определяющая максимально допустимую разность влагосодержания между воздухом из окружающей среды и воздухом в межкорневом пространстве кагата на момент включения системы активной вентиляции и равняется 3 гр/кг.

Период хранения с декабря по январь характеризуется хранением кагатов в температурном диапазоне $-1...+5^{\circ}\text{C}$ (рисунок 13).



а) декабрь

б) январь

Рисунок 13 – Изменение температуры изменение температуры окружающего воздуха и кагата по декадам

В процессе хранения сахарной свеклы в кагате образовывались локальные очаги самосогревания (рисунок 14). Для предотвращения образования этих очагов осуществлялись превентивные меры посредством циклического включения системы активной вентиляции по разработанному алгоритму с учетом величин уставок, представленных системой уравнений:

$$\begin{cases} k \geq T_{cv} - T_g \\ m \leq d_{cv} - d_g \\ \tau_u = f(\tau_{np}; \tau_{раб}) \end{cases} \quad (12)$$

где уставка определяющая цикличность работы системы активной вентиляции τ_u зависит от допустимой величиной простоя вентиляторов τ_{np} и необходимой продолжительности работы $\tau_{раб}$.

Таблица 1 – Значения уставок режимов работы системы активной вентиляции

Режим работы	Интервал периода хранения, сутки	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$T_{min}, ^\circ\text{C}$	$\Delta d, \text{гр/кг}$	$\tau_{np}, \text{час}$	$\tau_{раб}, \text{час}$
Поддержание	1...31	2	-3	–	–	–
Охлаждение	32...72			3	–	–
Циклический	73...110				72	5

Продолжительность работы каждого из режимов определено на основании анализа статистических данных об изменении температуры окружающего воздуха в период хранения сахарной свеклы по декадам. По результатам анализа температур окружающего воздуха с 2019-2021 гг. для Рыльского района Курской области было установлено, что для работы системы активной вентиляции в режиме поддержания оптимальным является период с 1 по 31 октября, в режиме охлаждения – с 1 октября по 10 декабря, в циклическом – с 11 декабря до конца хранения.

Реализация режимов работы системы активной вентиляции осуществлено в программном обеспечении АГХ/САВК-ЕСМАС-1.0, которое было разработано компанией ООО «Агрохолд» (г. Котовск, Тамбовская область).

Программа АГХ/САВК-ЕСМАС-1,0 имеет широкий функционал по настройке управления работой системы активной вентиляции кагатов сахарной свеклы путем корректировки уставок. Работа над совершенствованием АГХ/САВК-ЕСМАС-1,0 осуществлялась с 2017 года, что позволило качественно повысить функционал управления программой.

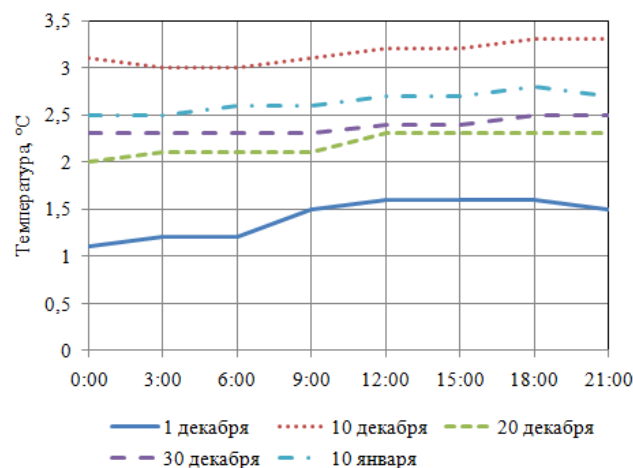


Рисунок 14 – Суточный график роста температуры в кагате

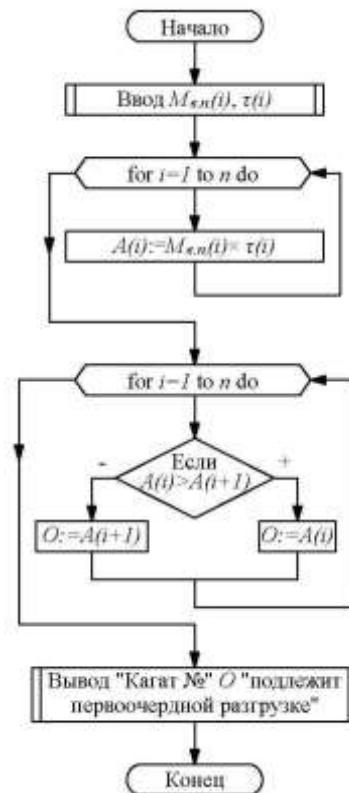


Рисунок 15 –Алгоритм определения очередности разгрузки кагатов в переработку корнеплодов

Разработанный алгоритм очередности разгрузки кагатов в переработку позволяет учитывать совокупную продолжительность работы вентиляционных ветвей, задействованных при хранении кагата, а также совокупные потери свекломассы в процессе охлаждения (рисунок 15).

В пятой главе «Технико-экономическое обоснование применения технологии и оборудования длительного вентилируемого хранения кагатов сахарной свеклы» эффективность рассматриваемой технологии длительного вентилируемого хранения в кагатах, оснащенных системой активной вентиляции, сравнивали технологией хранения в полевых кагатах на полях возделывания. Внедрение технологии длительного вентилируемого хранения кагатов сахарной свеклы с предлагаемой системой управления позволит свеклосеющим хозяйствам сместить срок начала уборки сахарной свеклы с 15 августа на 25 сентября, что способствует увеличению средней массы корнеплода на 227 г и урожайности на 10 т/га, на 1,26% дигестии и на 317 руб./т цены корнеплодов. Удельные прямые эксплуатационные затраты сахарного завода на переработку 1 тонны корнеплодов составили 206,53 руб. Срок окупаемости затрат на оборудование вентилируемого кагата с предлагаемой системой управления, включая инвестиционные, прямые затраты не превысил двух лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из-за низкой эффективности хранения в полевых кагатах, а также сопря-

женными рисками в виде распутицы и заморозков происходит смещение сроков начала пуска завода с рекомендуемого отраслевыми нормами 25 сентября на конец августа, из-за чего сельхозтоваропроизводители несут убытки.

1. На основании выполненного анализа существующих способов и технических средств длительного хранения корнеплодов сахарной свеклы определены направления совершенствования работы системы активной вентиляции кагатов. С целью снижения потерь свекломассы до 1,95-2,7 % необходимо организовать длительное хранение корнеплодов в больших кагатах с системой активной вентиляции, оснащенных высокоэффективным оборудованием управляемым современными программно-аппаратными комплексами. Выявлены отличия теоретического обоснования тепловлажностных процессов происходящих в кагатах при открытом хранении на площадках сахарного завода от хранения продукции в закрытых хранилищах с ограждающими конструкциями.

2. На основании проведенных теоретических исследований:

- получены аналитические выражения теплового и материального балансов в кагате в процессе вентилирования и определены поправочные коэффициенты для математической модели описания тепломассообменных процессов при охлаждении кагата;

- установлено послойное распределение корнеплодов при хранении в кагатах: поверхностный, промежуточный и корректирующий слои, и зона сохранности. Поверхностный слой толщиной 0,2-0,3 м и промежуточный слой - 0,5-0,7 м, корректирующий слой - 1,0-1,5 м. Наиболее благоприятные условия для хранения корнеплодов в кагатах обеспечиваются в зоне сохранности;

- обоснованы размеры кагата (высота, ширина), формируемого буртоукладочной машиной. Определены: длина воздухораспределителя и его расположение в кагате, количество вентиляционных ветвей и расстояние между ними, форма поперечного сечения и площадь воздуховыпускных отверстий, расход воздуха для одной вентиляционной ветви;

- обоснованы конструктивные параметры системы активной вентиляции с учетом размеров и размещения кагатов на площадке и характеристик технологических машин и оборудования;

- определены режимы работы системы активной вентиляции: поддержания текущей температуры, охлаждения для снижения температуры в кагате до $-1...+5^{\circ}\text{C}$ и циклический включаемый периодически с определенной продолжительностью для поддержания температуры хранения.

- разработан алгоритм управления активной вентиляцией кагата с учетом изменяющихся погодноклиматических условий и продолжительности хранения корнеплодов.

3. На основании проведенных экспериментальных исследований:

- определены способы, и фактические сроки хранения корнеплодов в кагатах в зависимости от погодноклиматических условий;

- определены профили распределения температур и их диапазоны по высоте кагата в процессе хранения корнеплодов: оптимальный установлен в пределах $+1...+3^{\circ}\text{C}$, предложено расширить верхнюю границу температурного диа-

пазона до +5°C, а нижнюю границу до -1°C;

- обоснован набор уставок, характеризующий режимы работы системы активной вентиляции (поддержание, охлаждение и циклический) и определены их значения: разница температур между кагатом корнеплодов и воздухом из окружающей среды составляет 2°C; максимально допустимая разность влажностенности между воздухом из окружающей среды и воздухом в межкорневом пространстве кагата на момент включения системы активной вентиляции составляет 3 г/кг; продолжительность периода возрастания температуры в локальном очаге самосогревания 72 часа; продолжительностью работы вентилятора в течение одного периода 5 часов;

- усовершенствовано программное обеспечение управления системой активной вентиляции кагатов с учетом их количества на площадке и режимов работы при изменяющихся погодноклиматических условиях в период длительного хранения корнеплодов;

- разработан алгоритм очередности разгрузки кагатов в переработку в зависимости от продолжительности вентилирования и потери массы кагата в период хранения.

4. Внедрение технологии длительного вентилируемого хранения кагатов сахарной свеклы с предлагаемой системой управления позволит свеклосеющим хозяйствам сместить срок начала уборки сахарной свеклы с 15 августа на 25 сентября, что поспособствует увеличению средней массы корнеплода на 227 гр и урожайности на 10 т/га, на 1,26% дигестии и на 317 руб./т цены корнеплодов. Удельные прямые эксплуатационные затраты сахарного завода на переработку 1 тонны корнеплодов составили 206,53 руб. Срок окупаемости затрат на оборудование вентилируемого кагата с предлагаемой системой управления, включая инвестиционные, прямые затраты не превысил двух лет.

Рекомендации к производству. Полученные результаты рекомендуется использовать для совершенствования существующих, а также для разрабатываемых систем управления активной вентиляцией кагатов сахарной свеклы.

Перспективы дальнейшей разработки темы. С целью полной автоматизации технологического процесса хранения сахарной свеклы требуется дальнейшее совершенствование полученных режимов работы системы активной вентиляции и технологии хранения, изучение инерционных процессов в кагате сахарной свеклы; применение химических препаратов для обработки кагатов; изучение влияния временных укрытий, адаптированных для применения на вентилируемых кагатах для повышения сохранности свекломассы; совершенствование конструкции элементов системы активной вентиляции.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ:

1. **Кольцов С.М.** Снижение потерь сахарной свеклы при хранении / Завражнов А.И., Завражнов А.А., Кольцов С.М., Толстошеин С.С. // Сельский механизатор. – 2020. – № 5-6. – С. 35-36.

2. **Кольцов С.М.** Обоснование и разработка технологии хранения сахарной свёклы в кагатах в условиях Центрально-Чернозёмного региона / Кольцов, С.М., Завражнов, А.И. // Сахар. – 2020. – № 1. – С. 38–44.

3. **Кольцов С.М.** Методика исследований хранения сахарной свеклы в кагатах / Завражнов А.И., Кольцов С.М. // Наука в центральной России. – 2020. – № 6 (48). – С. 30-36.

4. **Кольцов С.М.** Управление режимами вентиляции при хранении сахарной свеклы в кагатах / Кольцов С.М., Завражнов А.И., Елизаров И.А., Толстошеин С.С. // Сельский механизатор. – 2021. – №8 – С.20-21.

5. **Кольцов С.М.** Эффективность вентилируемого хранения сахарной свёклы в условиях центрально-чернозёмного региона / Завражнов А.И., Шрамко Р.А., Сабетова Л.А., Завражнов А.А., Кольцов С.М // Сахар. – 2020. – № 8. – С. 20-26.

6. **Кольцов С.М.** Вентилируемое хранение сырья как одно из направлений модернизации свеклосахарного производства / Кольцов С.М., Завражнов А.И., Шрамко Р.А., Коломыцева О.Ю., Завражнов А.А. // - Сахар. – 2021. – №1. С. 46-52.

7. **Кольцов, С.М.** Кратное снижение энергопотребления систем активной вентиляции кагатов сахарной свёклы / Кольцов, С.М., Василевский, К.С., Толстошеин С.С., Мамонтов Р.А., Иржавцев К.Ю. // Сахар. – 2019. – №4. – С. 70-75.

публикации в сборниках научных трудов и материалах конференций:

8. **Koltsov S.M.** Mathematical modeling of the temperature regime in a ventilated pile of sugar beet - IOP conference series: materials science and engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. // Zavrazhnov A.I., Zuglenok N.V., Zavrazhnov A.A., Tolstoshein S.S., Koltsov S.M. / Krasnoyarsk, Russia, 2020. – P. 62067.

9. **Koltsov S.M.** Investigating natural cooling of piled sugar beet - IOP conference series: earth and environmental science // Zavrazhnov A.I., Koltsov S.M., Zazulya A.N., Vedishchev S.M., Tolstoshein S.S. / Michurinsk, Russia, 2021. – P. 012089.

10. **Кольцов, С. М.** Повышение эффективности вентиляции овощехранилищ открытого типа в свеклосахарном производстве / Кольцов С. М., Жерлыкина М. Н. // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2018. – № 3(6). – С. 51-56.

11. **Кольцов, С. М.** К вопросу разработки инженерных систем для хранения сырья в свеклосахарном производстве / Кольцов С. М., Жерлыкина М. Н. // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2018. – № 1(4). – С. 36-46.

12. **Кольцов, С. М.** Вентилируемое хранение сахарной свеклы на открытом грунте / Материалы конференции Импортозамещающие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья // Тамбов. – 2019. – С.389-394

13. **Кольцов, С.М.** Методика исследований показателей свекольной мас-

сы при хранении в кагатах / Кольцов С.М., Завражнов А.И. // Материалы научно-практической конференции: Развитие производственного и научного потенциала отрасли садоводства и питомниководства в Российской Федерации / Мичуринск-наукоград. – 2019. – С.267-273

14. **Кольцов С.М.** Анализ существующих технических средств активной вентиляции кагатов сахарной свеклы / Кольцов, С.М., Ястребков, П.Д. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции: Инновационные подходы к разработке технологий производства, хранения и переработки продукции растениеводческого кластера // Мичуринск. – 2020. – С.173-177

15. **Кольцов С.М.** Исследование вопроса потери свекломассы при хранении сахарной свеклы в кагате / Материалы 73-ей международной научно-практической конференции: «Современная аграрная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации» // Мичуринск. – 2021. – №2 – С.66-72

16. **Кольцов С.М.** Влияние физико-химических показателей сахарной свеклы на продолжительность работы системы активной вентиляции кагатов / Материалы национальной с международным участием научно-практической конференции, посвященной 70-летию юбилею инженерного факультета ФГБОУ ВО Оренбургского ГАУ / Кольцов С.М., Завражнов А.И. // Оренбург. – 2021. – С.66-70

17. **Кольцов С.М.** Оптимизация температурного режима в вентилируемом кагате сахарной свеклы / Завражнов А.И., Завражнов А.А., Ланцев В.Ю., Ведищев С.М., Толстошеин С.С., Кольцов С.М. // Материалы международной научно-практической конференции Цифровизация агропромышленного комплекса // Мичуринск. – 2020. – С.295-299.

18. **Кольцов С.М.** Разработка программно-аппаратного комплекса для управления системой вентиляции корнеплодов сахарной свеклы в кагатах / Кольцов С.М., Завражнов А.И., Балашов А.В. // Материалы конференции по повышению эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции // Мичуринск. – 2021. – С.26-30

патент на изобретение:

19. Пат. 2713790 Российская Федерация МПК А01F 25/22 Рама вентиляционного агрегата / С.М. Кольцов; автор и патентообладатель. – № 2018140924, заявл. 20.11.2018

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ
Подписано в печать 19.04.2022 г. Формат 60x84 1/16,
Бумага офсетная № 1. Усл.печ.л. 1,3 Тираж 100 экз. Ризограф
Заказ № 20846

Издательско-полиграфический центр
Мичуринского государственного аграрного университета
393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101,
тел. +7 (47545) 3-88-34, доб.211