

На правах рукописи

Кечкин

КЕЧКИН ИВАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

«Повышение эффективности процессов охлаждения зерна при активном вентилировании в металлических силосах большой ёмкости»

Специальность 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Беляева Марина Александровна

Официальные оппоненты: **Орешина Марина Николаевна**,
доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет управления», кафедра «Информационных систем», доцент

Кандроков Роман Хажсетович,
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет пищевых производств», кафедра «Зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение Научно-исследовательский институт проблем хранения Федерального агентства по государственным резервам

Защита состоится «19» ноября 2020 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.196.07 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова» по адресу: 117997, Москва, Стремянный пер., д. 36., ауд. 353.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Научно-информационном библиотечном центре им. академика Л.И. Абалкина ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Зацепа, д. 43 и на сайте организации: <http://ords.rea.ru>

Автореферат разослан « » октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор химических наук, профессор

 Чалых Татьяна Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Вопрос повышения эффективности процессов охлаждения зерна при активном вентилировании в металлических силосах большой ёмкости на сегодняшний день мало изучен, нет достоверных, научно обоснованных данных, относящихся к изменениям теплофизических параметров воздуха.

Процесс вентилирования зерна в металлических силосах большой емкости представляется весьма трудоёмким, необходимо определить: время вентилирования, периоды образования конденсата в верхнем слое зерна и под крышей силоса, температуру охлажденного зерна, допустимые кондиции воздуха для охлаждения, поэтому применение систем активного вентилирования (САВ) в МСБЕ с учётом контроля необходимых параметров является актуальной задачей.

Многочисленные работы, как в РФ, так и за рубежом, посвященные применению активного вентилирования, не затрагивают вопросы воздухораспределения, учета относительной влажности воздуха в металлических силосах больших емкостей: 2 000, 3 000, 5 000 и 10 000 тонн. Поэтому можно сказать, что для МСБЕ вместимостью от 2 000 до 10 000 тонн процесс охлаждения зерновой массы при помощи активного вентилирования мало изучен.

Основным способом хранения в МСБЕ, согласно нормативным документам (Инструкция по хранению зерна в металлических зернохранилищах и инструкция № 9-7-88 по хранению зерна, маслосемян, муки и крупы) является хранение зерна в сухом и очищенном состояниях. Известно, что на сроки хранения влияют не только влажность и чистота зерновой массы, но и температура зерна, закладываемого на хранение. Требуемые состояния зерна по влажности и чистоте достигают в процессе послеуборочной обработки зерна (сушка, очистка и т. д.). Охлаждают зерно, как правило, в силосе с помощью установок активного вентилирования наружным воздухом.

Эффективное использование разнообразных установок для активного вентилирования зерна может быть достигнуто лишь на основе применения научно обоснованных режимов обработки зерна с учётом периодов безопасного хранения различных культур. Применяемая САВ в МСБЕ является принудительным продуванием массы наружным воздухом. В отличие от естественной вентиляции, активное вентилирование позволяет создать и поддерживать равные оптимальные условия сохранения качества зерновой продукции в больших объёмах и, благодаря этому, снизить их потери при хранении и более эффективно использовать объём зернохранилищ. Вентилирование зерновой насыпи воздухом с низкой относительной влажностью позволяет подсушить зерно и ускоряет процесс послеуборочного дозревания, повышая энергию прорастания, всхожесть и улучшая хлебопекарные свойства зерна. Охлаждение и подсушивание зерна создают в зерновой насыпи условия, неблагоприятные для развития вредителей и микроорганизмов. Являясь высокомеханизированным, а в некоторых случаях и автоматизированным процессом обработки неподвижных зерновых партий, активное вентилирование относят к числу производительных и эффективных

способов обработки зерна, как в технологическом, так и экономическом отношениях.

Обеспечение подачи нормативного объема воздуха ($10 \text{ м}^3/\text{час}\times\text{т}$) в силосе достигается за счет изменения массы хранящегося зерна. Силосы, в которых можно охлаждать больший объем зерна при меньших затратах на электрическую энергию будут более рентабельными.

Действующими нормативными документами допускается хранение в металлическом силосе сухого (влажностью не более 14 %), чистого, не зараженного и охлажденного зерна. Доведение зерна до сухого и чистого состояния обеспечивается технологиями послеуборочной обработки (сушка, сепарирование и пр.). Охлаждают зерно наружным воздухом, с помощью установок активного вентилирования. Затраты на вентилирование составляют основную долю затрат на хранение зерна и складываются из двух составляющих: основной, полезной работы на преодоление сопротивления слоя зерна и, второстепенной, связанной с доставкой воздуха к зерновой массе и вывода его из силоса, а также с утечками воздуха в основании силоса и местах крепления его вертикальных стенок к фундаменту.

Минимально допустимая удельная подача воздуха при вентилировании зерна с целью его охлаждения принята равной $10 \text{ м}^3/\text{ч}\times\text{т}$. Обеспечение подачи нормативного объема воздуха в зерновую массу для ее охлаждения является основным условием сохранности зерна, исключая развитие плесеней хранения. Исследования Казахского филиала ВНИИЗ и зернового треста Венгрии показали, что удельные подачи воздуха ($5 \text{ м}^3/\text{ч}\times\text{т}$) в режиме вентилирования в малых объемах не обеспечивают эффективного охлаждения зерна и способствуют развитию плесеней хранения и ухудшению его качества.

Нормативные параметры для определения объема нагнетаемого воздуха в силос в зависимости от массы зерна не учитывает скорости подачи воздуха. При вентилировании в одном и том же силосе разных масс зерна будут наблюдаться различные скоростные воздушные режимы. Влияние скорости прохождения воздуха через зерновую массу на процесс охлаждения зерна был изучен ранее, но только для зерна после сушки и для специальной охлаждающей колонки, высота которой не превышает 6 м. В проведенных исследованиях зерно имело следующие исходные параметры: влажность от 15 до 18,5 %; температуру от 37 до 55 °С. Скорость фильтрации воздуха изменялась от 0,04 до 0,22 м/с.

Степень разработки темы. Большой вклад в изучение повышения качества пищевой продукции, процессов хранения и охлаждения зерна при активном вентилировании, продовольственной безопасности, энерго и ресурсосбережении в пищевой промышленности внесли исследования многих отечественных и зарубежных ученых: А.В. Лыков, В.А. Резчиков, И.П. Гинзбург, Н.П. Козьмина, А.С. Цыплаков, В.Ф. Самочетов, Г.А. Джорогян, Л.А. Трисвятский, В.Ф. Сорочинский, Л.Г. Елисеева, А.А. Гажур, В.П. Кирпичников, М.А. Беляева, А. Sugahara, U. Larsson, S. García-Ortega, M. Odriozola-Maritorena и других. Вместе с тем, исследования, направленные на разработку комплексной системы, позволяющей увеличить сроки и качество хранимой продукции в МСБЕ

практически не проводятся, в связи с чем данное направление является перспективным и инновационным.

Целью настоящей диссертационной работы является разработка системы, позволяющей повысить эффективность процессов охлаждения зерна за счет контроля значений параметров температуры, перепада давления, скорости фильтрации и относительной влажности воздуха в зерновой массе, хранящейся в МСБЕ в режиме реального времени.

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

1. Разработать методику наладки установок для вентилирования зерна в металлических силосах большой емкости с обеспечением подачи нормативного объема воздуха и апробировать разработанную методику в производственных условиях.

2. Разработать технические устройства, позволяющие оценить эффективность применения САВ в силосах большой емкости.

3. Спрогнозировать оптимальные режимы вентилирования и оценить риски, возникающие при вентилировании зерновой массы в МСБЕ.

4. Оценить возможность образования конденсата в верхнем слое зерна и под крышей силоса, контроль температуры и охлажденного зерна, допустимые динамические характеристики воздуха для охлаждения зерна и сформулировать требования по эксплуатации МСБЕ для хранения зерна с применением САВ.

5. Определить скорости фильтрации, при которых избыточная влага удаляется из зерновой массы при минимальных энергозатратах и скорректировать сроки хранения зерна в МСБЕ.

6. Разработать экспериментальную установку для подготовки зерновой массы в объеме 250 кг заданным условиям по температуре и относительной влажности.

7. Исследовать тепломассообменные процессы при хранении зерна в МСБЕ с применением системы САВ.

8. Разработать математическую модель тепломассообмена при активном вентилировании зерна в МСБЕ.

Научная новизна заключается в проведенном комплексе теоретических и экспериментальных исследований:

- оценены технологические риски, возникающие при вентилировании зерновой массы в МСБЕ;

- определено оптимальное время вентилирования, при котором происходит максимально быстрое охлаждение зерновой массы и спрогнозированы эффективные режимы вентилирования;

- на основе проведенных экспериментальных исследований были скорректированы сроки хранения зерна в МСБЕ;

- определены оптимальные скорости фильтрации, при которых лишняя влага удаляется из зерновой массы при минимальных энергетических затратах;

- осуществлен переход от нормативного расхода воздуха, нагнетаемого вентиляторами в МСБЕ, к скорости фильтрации воздуха, проходящего через зерновую массу и, в зависимости от значений скорости фильтрации воздуха,

адаптирована работа САВ, позволяющая с меньшими энергозатратами увеличивать сроки хранения продукции;

- разработана и установлена система дополнительного вентилирования верхней части силоса, позволяющая избежать образование «корки» верхнего зернового слоя шириной 0,1 м.

- сформулированы требования по эксплуатации МСБЕ в производственных условиях;

- разработана математическая модель тепломассообмена при активном вентилировании зерна в МСБЕ.

Практическая значимость работы.

По результатам изучения процессов, происходящих в МСБЕ:

- установлена возможность прогнозирования продолжительности вентилирования зерновой массы, образования конденсата в верхнем слое зерна и под крышей силоса, контроль температуры охлажденного зерна, а также допустимые параметрические характеристики воздуха для охлаждения зерна;

- сформулированы требования по эксплуатации МСБЕ, предназначенных для хранения зерна с применением САВ, допустимые характеристики воздуха для охлаждения зерна, контроль температурных режимов охлажденного зерна и апробирование разработанной методики в производственных условиях;

- установлена возможность перехода от минимально допустимого объема подачи воздуха к скорости фильтрации в зерновой массе;

- предложена возможность оснащения силоса промышленным дифманометром, с помощью которого можно измерять перепад давления внутри силоса в слое зерна фиксированной толщины. При этом установлено, что перепад давления для данного слоя будет являться функцией одной переменной - скорости фильтрации;

- разработана экспериментальная установка и оригинальные методики, позволяющие определять скорость фильтрации воздуха в зерновой массе и подготавливать зерновую массу в объеме 250 кг заданным условиям по температуре и относительной влажности воздуха, которые применяются в учебном процессе при контроле качественных показателей зерновой массы;

- разработана система, позволяющая определять перепад давления с помощью манометров при прохождении воздуха через зерновой слой, которая была апробирована на предприятии АО «Биотехнологии» в Тамбовской области (Акт промышленных испытаний прилагается);

- на разработанный способ определения скорости фильтрации воздуха в МСБЕ получен патент RU 2716288 C1, заявка № 201911304 от 26.04.2019;

- на разработанное устройство для определения скорости фильтрации воздуха в металлическом силосе оформлена заявка на патент РФ №2019129761 от 23.09.2019

Научные положения, выносимые на защиту:

- вентилирование зерна в МСБЕ с обеспечением подачи нормативного объема воздуха;

- оценка возможности образования конденсата в верхнем слое зерна и под крышей силоса с контролем параметрических характеристик воздуха;

- технические устройства, позволяющие оценить эффективность применения САВ в МСБЕ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует пунктам 1,2,3,4 паспорта специальности 05.18.12 – «Процессы и аппараты пищевых производств».

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов проведенных исследований базируется на строгих доказательствах и использовании апробированных математических методов. Полученные расчетные соотношения подвергнуты тщательной экспериментальной проверке. Выявленные теоретические положения непосредственно согласуются с общепризнанными результатами в других областях науки и техники.

Все научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертации, обоснованы и подтверждены экспериментальными исследованиями и материалами, которые полностью соответствуют данным протоколов опытов.

Основные результаты выполненных исследований были представлены на международных и научно-практических конференциях: «Инновационные процессы в пищевых технологиях: наука и практика», Москва, 2019; «Интенсификация пищевых производств: от идеи к практике: тезисы докладов научно-практической конференции», Москва, 2018; «Международная конференция сельскохозяйственных наук РАН», Москва, 2016; «Пищевые системы: теория, методология, практика: тезисы докладов научно-практической конференции», Москва, 2017; «Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова», Москва, 2018; «Сельское хозяйство и продовольственная безопасность: технологии, инновации, рынки, кадры: тезисы докладов научно-практической конференции», Самара, 2019; «Инновационные исследования и разработки для научного обеспечения производства и хранения экологически безопасной сельскохозяйственной и пищевой продукции», Краснодар, 2019.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 25 работ в российских и зарубежных изданиях, в том числе 1 монография, 4 статьи в журналах, включенных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования РФ (далее – ВАК) в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук; 9 статей в ведущих российских и зарубежных журналах; 9 тезисов докладов; получен патент RU 2716288 C1 № 2019113044 от 26.04.2019; оформлена заявка на патент РФ №2019129761 от 23.09.2019. Результаты научного исследования отмечены дипломами и грантами ФАНО и РАН.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, экспериментальной части, выводов, экономической части, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 172 страницах компьютерного текста, содержит 16 таблиц и 59 рисунков. Список литературы включает 121 источник., в том числе 40 – на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены вопросы технического развития предприятий послеуборочной обработки зерна на современном этапе, играющие решающую роль в улучшении качества семян и сохранения пищевой ценности зерна. Обоснованы перспективы внедрения системы дополнительного вентилирования верхней части силоса, позволяющей избежать образования «корки» верхнего зернового слоя шириной 0,1 м и возможности оснащения металлических силосов большой ёмкости системой дифманометров, позволяющих определять перепад давления при прохождении воздуха через зерновой слой фиксированной толщины.

В первой главе «Исследование и практика длительного хранения зерна пшеницы в металлических силосах большой емкости» на основании лабораторных опытов были определены сроки безопасного хранения зерна пшеницы при различных значениях влажности и температуры, которые представлены в табл.1.

Таблица 1 – Сроки безопасного хранения зерна пшеницы при различных значениях влажности и температуры.

Влажность зерна, %	Температура зерна, °С	Срок безопасного хранения, мес.
13,0–15,5	10	12
до 14,5	20	12
14,5–15,5	20	10–11
13,0–13,9	30	3
14,0–14,5	30	2

Исследования проводились по комплексу показателей, в том числе по качественному и количественному составу микрофлоры (бактерии и плесневые грибы).

Взаимодействие зерновой массы с окружающей средой представляет собой сложную систему взаимозависимых факторов, сочетание которых определяют качество и эффективность хранения зерна.

Необходимость охлаждения зерна обосновывают результаты исследований качества пшеницы при хранении в МСБЕ диаметром 15,2 м, выполненных ВНИИЗ (2009). Исследователями установлено, что пшеница с влажностью от 11 % до 15 % может храниться до двенадцати месяцев без изменения показателей качества при температуре 10 °С. При температуре 20 °С пшеница может храниться двенадцать месяцев с влажностью не более 12 % без изменения качества. В зерне влажностью от 13 до 14 % после трех месяцев хранения наблюдается ухудшение некоторых качественных показателей (ухудшение посевных свойств, уменьшение активности дегидрогеназ, увеличение кислотного числа жира), а к девяти месяцам хранения увеличивается интенсивность дыхания приблизительно в два раза. При температуре 30 °С, хранение зерна без ухудшения качества наблюдали в течение двух месяцев с влажностью не более 13 %. При влажности зерна от 13 до 14%, ухудшение качества происходило уже в первый месяц хранения. К трем месяцам хранения качественные показатели значительно ухудшились: снизилась натурная

масса, энергия прорастания и всхожесть, увеличилось кислотное число жира, интенсивность дыхания, резко снизилось качество клейковины.

Для практических расчетов, с учетом текущих значений температуры (t) и относительной влажности воздуха (φ), можно воспользоваться следующими формулами, которые нами были получены на основе данных влагосодержания воздуха d г/м³ при различных значениях температуры и относительной влажности воздуха.

где d - влагосодержание воздуха, в г/м³;

$$d = k \times e^{0,07t} \quad (1)$$

t – текущее значение температуры воздуха, в °С;

k – коэффициент, учитывающий значение относительной влажности воздуха, для которого проводится расчет влагосодержания

$$k = 0,045 \times \varphi - 0,02 \quad (2)$$

e – основание натурального логарифма (2,72).

Среднеквадратичное отклонение в интервале значений температур от 35 до минус 15 °С для d составляет 0,9887, а для k – 1,0000, что подтверждает точность аппроксимации и формулы могут быть использованы для практических расчетов.

Выполнен анализ удельных затрат электроэнергии на вентилярование зерна при разных удельных расходах воздуха. Так при удельном расходе воздуха 10 м³/ч×т затраты электроэнергии составляют 0,12 кВт×ч/т, а при 20 м³/ч×т возрастают до 0,18 кВт×ч/т. Приведенные значения соответствуют перепаду температуры в десять градусов. При больших значениях разности температур удельные затраты электроэнергии снижаются более, чем в два раза.

Сформировавшиеся подходы анализа причин, считающих МСБЕ менее пригодными в сравнении с железобетонными емкостями для длительного хранения зерна - не уделяют должного внимания процессам, протекающим в подкровельном пространстве металлического силоса, и, вследствие этого, не рассматривают все возможные мероприятия, корректирующие эту ситуацию.

Наиболее простой и менее затратный способ улучшения условий обеспечения сохранения качества зерна при длительном хранении в МСБЕ: необходимость загружать металлический силос полностью, желательно под горловину, оставляя как можно меньше свободного надзернового пространства. Это минимизирует площадь внутренних поверхностей металлического силоса, на которых возможна конденсация влаги и последующее ее попадание в зерно. При этом следует иметь в виду, что не все конструкции металлических силосов допускают загружать зерно под горловину.

Другим эффективным приемом снижения возможной конденсации влаги на внутренней поверхности кровли силоса является правильная организация ее конвективного вентилирования.

Еще одним, пассивным приемом, способным снизить риски конденсационного увлажнения, является теплоизоляция поверхностей МСБЕ.

Причем, данную теплоизоляцию в первую очередь целесообразно проводить именно у кровли силоса.



Рисунок 1 – Структурная схема исследований

Во второй главе «Объекты и методы исследований» представлена характеристика объектов и методов исследований, организация постановки эксперимента.

Для разработки системы, позволяющей контролировать значения параметров температуры, перепада давления, скорости фильтрации и относительной влажности воздуха в зерновой массе, хранящейся в МСБЕ в режиме реального времени, была разработана структурная схема испытаний, представленная на рис. 1.

В процессе исследования была разработана и предложена методика расчета нагрева зерновой массы, результаты которой прошли апробацию на экспериментальной установке ФГБНУ «ВНИИМП им. В.М. Горбатова» филиала «ВНИИЗ», была разработана и апробирована методика проведения работ по вентилированию зерна в металлических силосах 10 тыс. тонн на действующих предприятиях АО «Биотехнологии», Тамбовская область и ООО «Тесницкое», Тульская область.

Для исследования процесса охлаждения зерна в МСБЕ зерновую массу необходимо предварительно подготовить. Для решения этой задачи и изучения процесса активного вентилирования был создан экспериментальный учебно-методический стенд, представленный на рис. 2.

Нагрев зерновой массы, продолжается 4 часа, за это время температура увеличивается с 19 до 30 °С (на 11 °С). Дальнейший нагрев зерновой массы производить нецелесообразно, так как на практике, зерно на хранение после уборки, особенно в южных районах страны поступает с температурой от 25 до 30 °С и влажностью от 13 до 13,5 %, а в некоторых случаях, после предварительной сушки в зерносушилках.

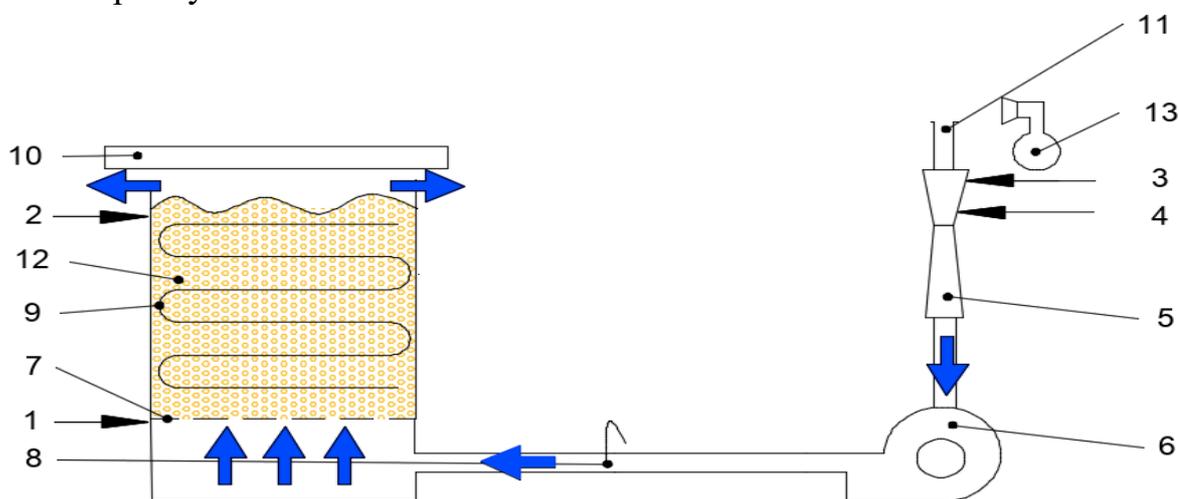


Рисунок 2 - Схема экспериментальной установки

1, 2 – нижний и верхний штуцер на установке; 3, 4 – верхний и нижний штуцер на трубе Вентури; 5 – труба Вентури; 6 – нагнетающий воздушный вентилятор; 7 – воздухораспределительная решетка; 8 – винтовая заслонка; 9 – зерновая масса; 10 – крышка установки; 11 – воздухозаборник; 12 – нагревательный кабель; 13 – увлажнитель

Схема вентилирования зерна в металлическом силосе

Была разработана и апробирована методика наладки установок для вентилирования зерна в металлических силосах с обеспечением подачи

нормативного объема воздуха в производственных условиях. Известно, что сопротивление зернового слоя движению воздушного потока является, функцией двух переменных - толщины слоя и скорости фильтрации, и описывается формулой Рамзина.

$$\Delta P = 9,81 \times A \times H \times v^n, \quad (3)$$

где ΔP – перепад давления в слое зерна, Па;

H – толщина слоя, мм, в данном случае $H = 3$ м;

v – скорость фильтрации или расход воздуха, отнесенный к площади силоса, м/с;

A, n – постоянные коэффициенты, зависящие от размеров, формы и степени уплотнения зерен в насыпи.

Для обеспечения и контролирования подачи нормативного объема воздуха в зерновую массу предлагается оснастить силос промышленным дифманометром, с помощью которого измеряют перепад давления внутри силоса в слое фиксированной толщиной три метра, тогда перепад давления для этого слоя будет функцией одной переменной - скорости фильтрации.

Исходя из массы вентилируемого зерна, площади сечения силоса и нормативной удельной подачи воздуха вычисляют минимальное значение скорости фильтрации. Затем по формуле (3) вычисляют минимально-допустимый перепад давления, значение которого отмечают на циферблате дифманометра (рис. 3)

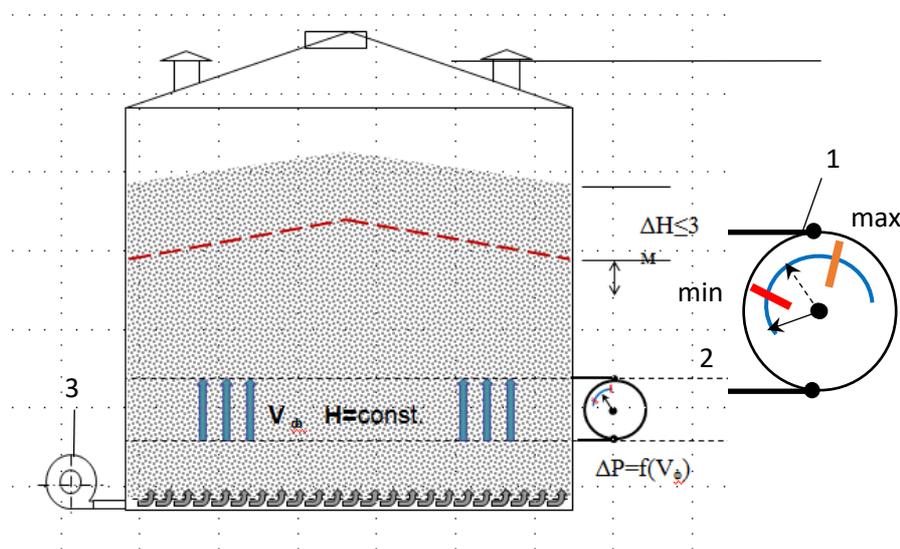


Рисунок 3 - Схема вентилирования зерна в металлическом силосе

1 – циферблат дифференциального манометра; 2 – воздухоотводные каналы; 3 – осевой вентилятор

Вентилятор включают, если показания дифманометра будут меньше отметки min на циферблате. При этом необходимо уменьшать массу вентилируемого зерна до тех пор, пока показания дифманометра не совпадут с отметкой, лежащей в диапазоне min - max. Только в этом случае будет обеспечена нормативная подача воздуха в зерновую массу и эффективно проведено

охлаждения зерна, а зерно не будет подвержено развитию плесеней в период хранения.

Методика проведения работ по вентилированию зерна в металлических силосах большой емкости

Увеличение сроков хранения в МСБЕ невозможно без применения принудительного вентилирования зерна.

Для вентилирования зерна в силосе вместимостью 10 000 тонн используется четыре одинаковых вентилятора. Каждый из вентиляторов подает воздух в отдельную систему воздухораспределительных каналов, расположенных в $\frac{1}{4}$ части площади силоса.

Места контрольного отбора давлений воздуха внутри силоса большой ёмкости осуществляли при помощи штуцеров, расположенных на трех уровнях по высоте (рис. 4). На каждом из уровней было установлено по четыре штуцера на отметках 0° , 90° , 180° и 360° .

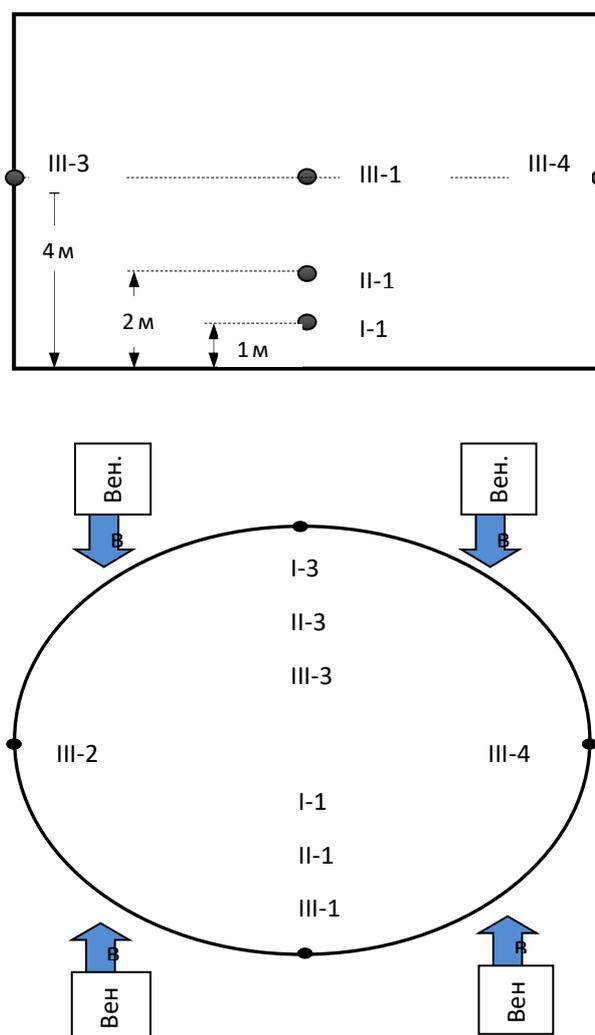


Рисунок 4 - Схема расположения точек замера на стенке силоса

Скорость фильтрации вычисляли по формуле:

$$v = \sqrt[n]{\frac{\Delta P \times A \times H}{9,81}} \quad (4)$$

Расход воздуха, проходящего через зерновой слой, вычисляли по формуле:

$$Q_з = 3600 \times v \times F, \quad (5)$$

где $Q_з$ – расход воздуха через зерновой слой, м³/ч.

F – площадь сечения силоса, м².

Утечки воздуха из силоса вычисляли как разность расходов воздуха, нагнетаемого вентиляторами и проходящего через зерновой слой.

$$\Delta Q = Q_в - Q_з, \quad (6)$$

где $Q_в$ – расход воздуха, нагнетаемый вентиляторами в силос, м³/ч.

Удельные затраты энергии определяли по следующей формуле.

$$\Delta g = \frac{N}{M}, \quad (7)$$

где N – мощность эл. двигателей вентиляторов, кВт;

M – масса зерна вентилируемого в силосе, т.

Методики контроля, оценки и мониторинга установок для вентилирования зерна в МСБЕ с обеспечением подачи нормативного объема воздуха

Для контроля эксплуатации установок были использованы следующие методики с применением математических моделей:

1. Методика получения данных о переходных процессах изменения температуры зерна по слоям зерновой массы при включении системы активного вентилирования и обработки данных с целью получения соответствующих динамических моделей.

2. Методика оценки критических изменений граничных условий при хранении зерна в металлическом силосе.

3. Методика разработки корректирующих воздействий.

В третьей главе «Результаты экспериментальных исследований» была определена относительная влажность воздуха межзернового пространства и температура зерновой массы при различных скоростях фильтрации.

Для увлажнения зерновой массы перед воздухозаборником (рис. 2) установлен увлажнитель, распыляющий 1000 мл жидкости в час. Для того, чтобы происходило увлажнение зерновой массы, а не её сушка очень важно подобрать режим работы оборудования или скорость прохождения воздуха через зерно. При расходе воздуха 410 м³/ч и, как следствие, высоких скоростях прохождения воздуха через зерновую массу 0,34 м/с, наблюдается вынос влаги из зерна. (рис.5)

Исходя из анализа графической зависимости увлажнения зерна не произошло, так как скорость прохождения воздуха через зерновую массу была высокой, и влага не смогла задержаться на поверхности зерна. Взятые пробы зерна из разных слоев зерновой массы и определение их влажности в лабораторных условиях согласно ГОСТ 13586.5-2015 показали, что влажность зерна уменьшилась с 10,5 до 10,2 %. Продолжительность увлажнения зерновой массы на стендовой установке составила три часа.

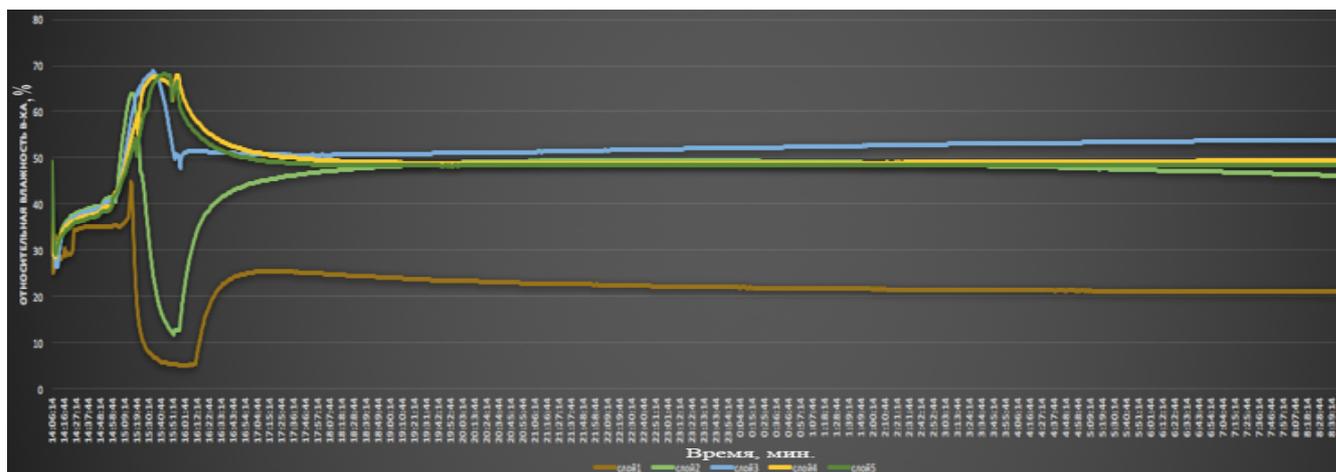


Рисунок 5 - Увлажнение зерновой массы по слоям

«слой 1» – слой зерна, соприкасающийся с вентиляционной решеткой; «слой 2» – слой зерна, находящийся на 0,25 м над вентиляционной решеткой; «слой 3» – слой зерна, находящийся на 0,5 м над вентиляционной решеткой; «слой 4» – слой зерна, находящийся на 0,75 м над вентиляционной решеткой; «слой 5» – слой зерна, находящийся на 1 м над вентиляционной решеткой

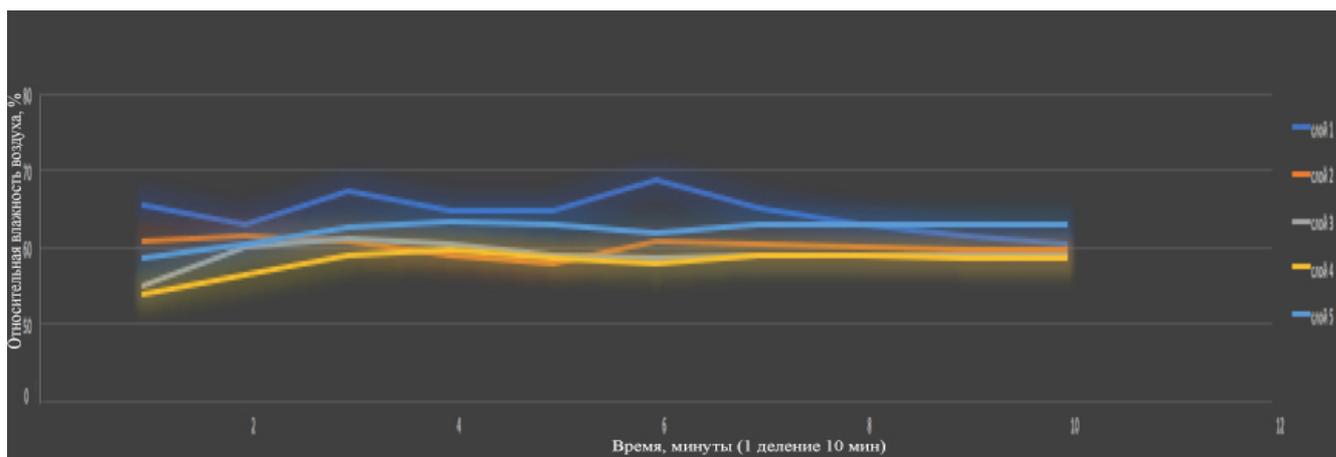


Рисунок 6 - Увлажнение зерновой массы по слоям при указанной скорости фильтрации воздуха

«слой 1» – слой зерна, соприкасающийся с вентиляционной решеткой; «слой 2» – слой зерна, находящийся на 0,25 м над вентиляционной решеткой; «слой 3» – слой зерна, находящийся на 0,5 м над вентиляционной решеткой; «слой 4» – слой зерна, находящийся на 0,75 м над вентиляционной решеткой; «слой 5» – слой зерна, находящийся на 1 м над вентиляционной решеткой

Чтобы избежать указанного выше эффекта, необходимо правильно подобрать режим подачи воздуха. При проведении эксперимента на стендовой установке скорость фильтрации воздуха в зерновой массе $\approx 0,063$ см/с, что близко к нормативным значениям подачи воздуха. В результате проведенного эксперимента был получен прирост относительной влажности воздуха межзернового пространства на 5 %, с 58 % до 63 % за 100 минут, а разброс относительной влажности по слоям составил менее 5 % (рис. 6).

Определение влажности зерна по слоям в лаборатории показали ее увеличение с 10,5 % до 11 %, что лежит в пределах погрешности метода измерения влажности, согласно ГОСТ 13586.5-2015.

На экспериментальной установке были подробно рассмотрены режимы подачи воздуха, при которых скорость фильтрации находилась в диапазоне от 0,001 до 0,06 м/с.

Таблица 2 – Охлаждение зерновой массы на экспериментальной установке

Влажность зерна, °С	Относительная влажность воздуха межзернового пространства, %	Время работы, мин.	Температура зерновой массы, °С
13,5	55	1	30
13,3	42	240	11
13,3	47	1800	12,5

При применении САВ на экспериментальной установке расход воздуха составил 42 м³/ч, скорость фильтрации – 0,035 м/с, температура уличного воздуха – 0 °С, а его относительная влажность 35 %. В данном режиме установка работала на протяжении 240 минут, за это время удалось понизить температуру зерновой массы с 30 до 11 °С, относительная влажность воздуха межзернового пространства уменьшилась с 55 до 42 %, влажность зерна практически не изменилась и составила 13,3 %. После остановки вентилирования зерновая масса была оставлена на 1800 минут, в течение этого времени температура зерновой массы составила 12,5 °С, относительная влажность воздуха межзернового пространства – 47 %, а влажность зерна - 13,3 % (табл. 2).

Математически обработанные данные по слоям зерновой массы представлены на рисунке 7, из которого можно сделать выводы, что при заданной скорости фильтрации 0,035 м/с происходит эффективное охлаждение зерна, а лишняя влага не остается на стенках и крышке хранилища, что не приводит к увлажнению поверхностного слоя зерна, а лишняя удаляется через воздухоотводные каналы.

При скорости фильтрации менее 0,025 м/с происходит увлажнение верхних слоев зерновой массы. За счет движения воздушных масс снизу-вверх при активном вентилировании переносимая влага от нижних слоев к верхним поднимается над зерном, но выталкивающей силы не хватает для её выведения через воздухоотводные каналы. Вследствие чего происходит отложение конденсата на верхней крышке и боковых стенках, и последующее увлажнение верхних слоёв зерновой массы.

Анализируя полученные данные (рис.8), можно сделать вывод, при скорости фильтрации менее 0,025 м/с необходимо принимать меры для её увеличения. Сделать это можно уменьшив сопротивление зернового слоя, улучшив систему воздухораспределения, модернизировав решетку за счет

изменения геометрических размеров ячеек или установив дополнительную систему воздухоотведения в верхней части силоса.

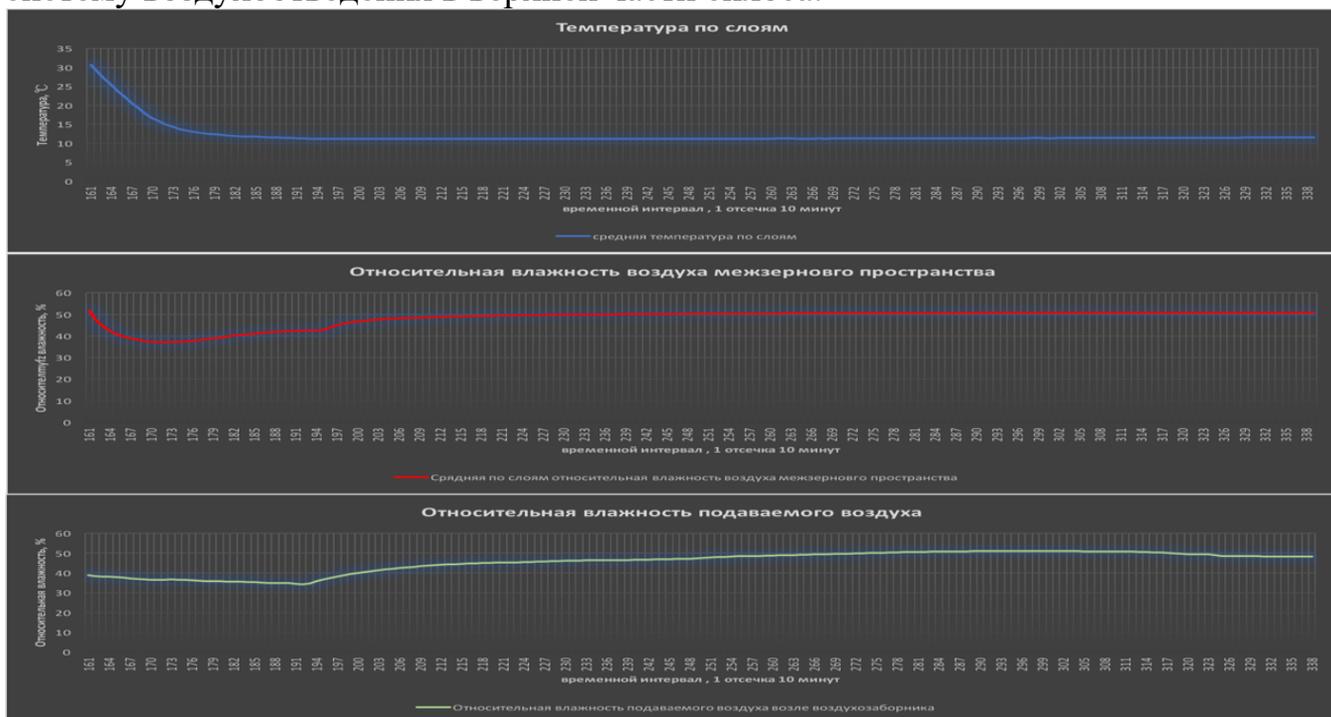


Рисунок 7 - Средние значения по слоям в зерновой массе температуры и относительной влажности воздуха при скорости фильтрации 0,03 м/с

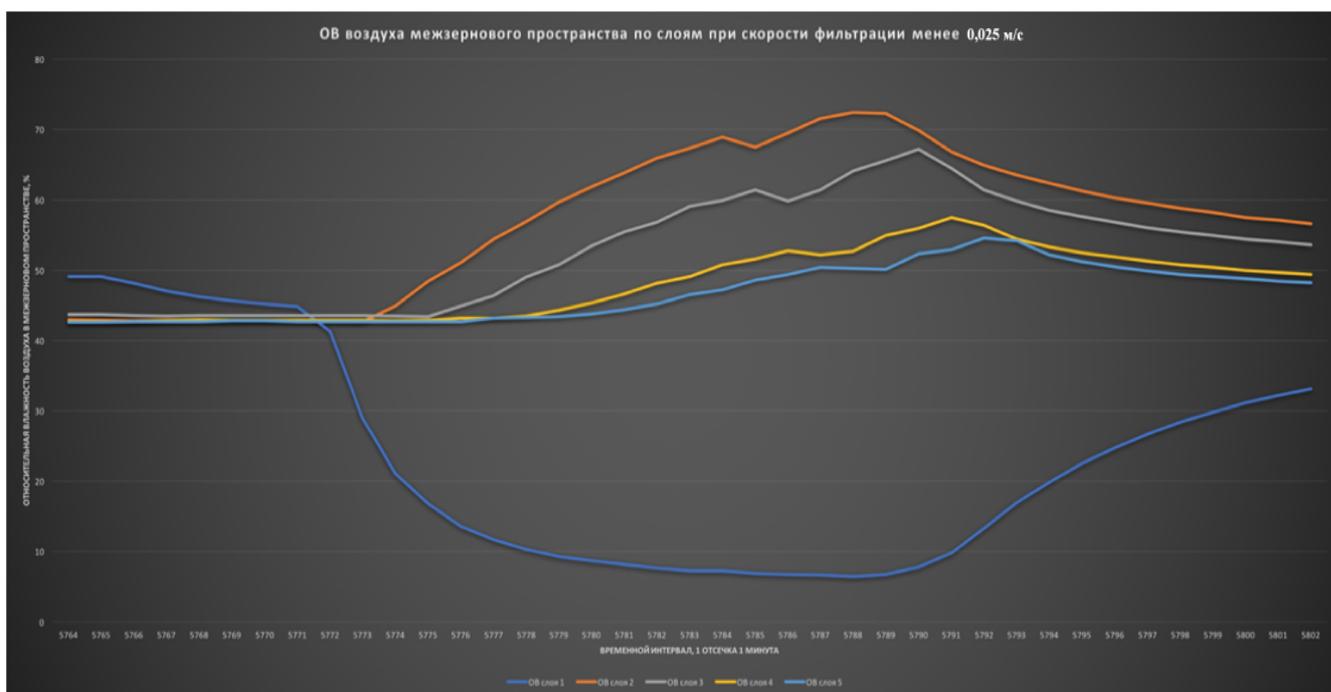


Рисунок 8 - Относительная влажность воздуха межзернового пространства при скорости фильтрации менее 0,025 м/с

«слой 1» – слой зерна, соприкасающийся с вентиляционной решеткой; «слой 2» – слой зерна, находящийся на 0,25 м над вентиляционной решеткой; «слой 3» – слой зерна, находящийся на 0,5 м над вентиляционной решеткой; «слой 4» – слой зерна, находящийся на 0,75 м над вентиляционной решеткой; «слой 5» – слой зерна, находящийся на 1 м над вентиляционной решеткой

Нагрев зерновой массы

На экспериментальной установке удалось добиться равномерного нагрева зерновой массы. Конечная температура зерновой массы составила 30 °С. Прирост температуры зерна составил 11 °С за четыре часа, а разброс температуры по слоям составил не более 2 °С (рис. 9). Благодаря заданной системе параметров удалось установить закономерность нагрева зерновой массы для данного стенда – 2,75 °С в час.

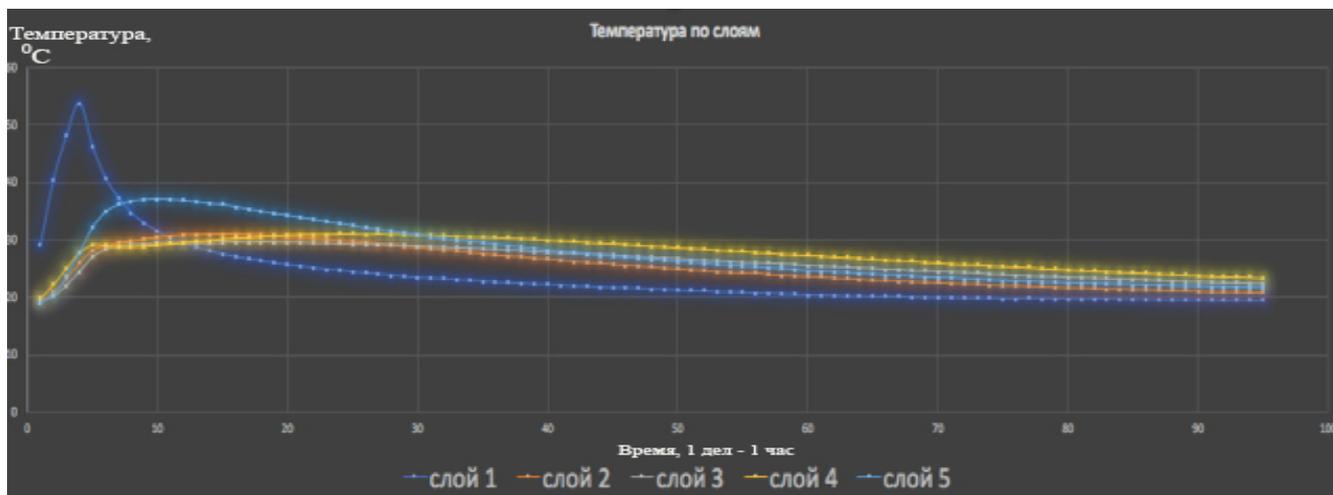


Рисунок 9 – Усредненные значения изменения температуры по слоям и по времени зерновой массы при нагреве

«слой 1» – слой зерна, соприкасающийся с вентиляционной решеткой; «слой 2» – слой зерна, находящийся на 0,25 м над вентиляционной решеткой; «слой 3» – слой зерна, находящийся на 0,5 м над вентиляционной решеткой; «слой 4» – слой зерна, находящийся на 0,75 м над вентиляционной решеткой; «слой 5» – слой зерна, находящийся на 1 м над вентиляционной решеткой

Вентилирование верхней части металлического силоса

Металлические силосы, предназначенные для длительного хранения, оснащены установками для вентиляции зерна. Как показывают исследования, поток воздуха, подаваемый вентилятором в зерновую массу, равномерно распределяется по площади сечения силоса практически сразу. Статическое давление воздуха по поперечному сечению силоса одинаково.

На рисунке 10 представлены изменения параметров воздуха внутри силоса при вентиляции в течение трех часов. На протяжении всего периода вентиляции увеличились значения параметров воздуха в межзерновом пространстве верхнего слоя и в надзерновом пространстве. Увеличение относительной влажности воздуха в надзерновом пространстве достигло критического уровня 95 % и близкого к насыщению ($\approx 100\%$). Дальнейшее вентиляция привело в дальнейшем к увлажнению поверхностного слоя и ухудшению качественных показателей зерна. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при несбалансированных режимах вентиляции можно получить условия, ухудшающие сохранность качества зерна. Поэтому перед выполнением этой технологической операции необходимо оценить степень ее риска.

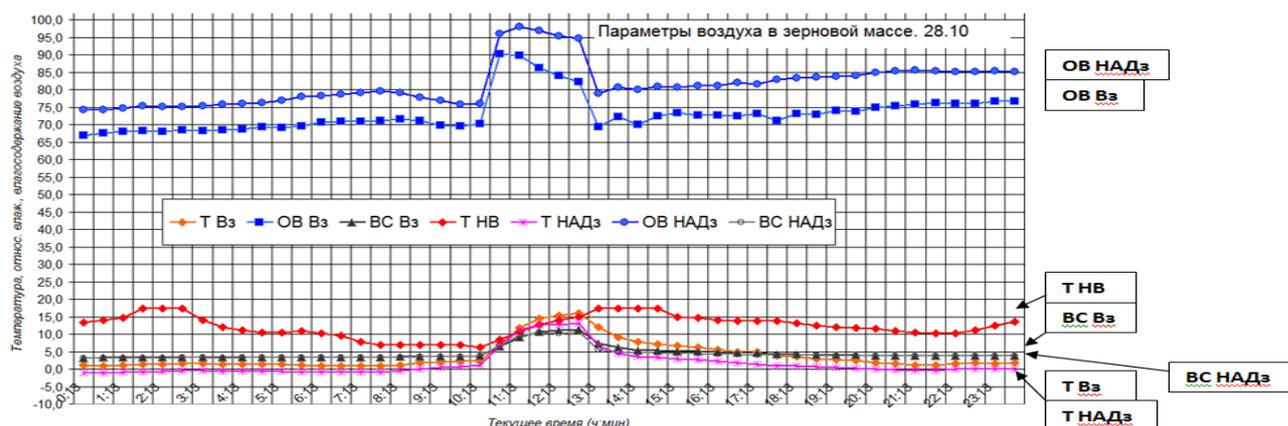


Рисунок 10 - Изменение параметров воздуха в зерновой массе при активном вентилировании с 10:00 до 13:00

ТВ_з – температура в зерне; ОВ В_з – относительная влажность воздуха в зерне; ВС В_з – влагосодержание в зерне; Т НВ – температура наружного воздуха; Т НАД_з – температура над зерном на расстоянии 1 метра; ОВ НАД_з – относительная влажность воздуха надзернового пространства; ВС НАД_з – влагосодержание воздуха в надзерновом пространстве

Для предотвращения образования конденсата вентилировать зерно следует воздухом, имеющим параметры, при которых равновесная влажность меньше значения фактической влажности хранящегося зерна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам экспериментальных исследований были сделаны следующие выводы.

1. Разработаны и апробированы в производственных условиях методики наладки установок для вентилирования зерна в МСБЕ с обеспечением подачи нормативного объема воздуха и установлена возможность прогнозирования продолжительности вентилирования зерновой массы.

2. Разработаны технические устройства, позволяющие оценить эффективность применения САВ в МСБЕ, предложена возможность оснащения силоса промышленными дифманометрами, с помощью которых возможно измерять перепад давления внутри силоса в слое зерна фиксируемой толщины. При этом перепад давления для данного слоя будет являться функцией одной переменной – скорости фильтрации.

3. Спрогнозированы оптимальные режимы вентилирования и оценены риски, возникающие при вентилировании зерновой массы в МСБЕ, а также установлена возможность перехода от объема минимально допустимой подачи воздуха к скорости фильтрации в зерновой массе.

4. Определена скорость фильтрации, при которой избыточная влага удаляется из зерновой массы при минимальных энергозатратах и адаптирована работа САВ, позволяющая с меньшими энергозатратами увеличивать и корректировать сроки хранения продукции.

5. Осуществлена оценка возможности образования конденсата в верхнем слое зерна и под крышей силоса, контроль температуры охлажденного зерна, допустимые характеристики воздуха для охлаждения зерна и сформулированы требования по эксплуатации МСБЕ для хранения зерна с применением САВ.

6. Разработана экспериментальная установка и методики для подготовки зерновой массы в объеме 250 кг заданным условиям по температуре и относительной влажности, которые возможно применять в учебном процессе при контроле качественных показателей зерновой массы.

7. Разработана математическая модель тепломассообмена при активном вентилировании зерна в МСБЕ.

8. Результаты работы были испытаны и прошли апробацию на АО «БиоТехнологии», Тамбовская область.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Кечкин, И. А. Режимы хранения и вентилирования зерна пшеницы в металлических силосах большой вместимости / И. А. Кечкин, А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченко // Хлебопродукты. - 2017. - Вып. № 11. - С. 58-61. – 0,19 печ.л. (авторских – 0,06 печ.л.).

2. Кечкин, И. А. Разработка экспериментального стенда для исследований очагов самосогревания в сыпучих средах / И. А. Кечкин, Д. И. Борисенко, А. С. Исаев, Н. С. Грибова // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2016. - Вып. №4. - С. 848-853. – 0,38 печ.л. (авторских – 0,06 печ.л.).

3. Кечкин, И. А. Технологическая схема хранения зерна в металлических силосах большой емкости / И. А. Кечкин, М. А. Беляева // Пищевая промышленность. - 2020. - №1. - С. 46-49. – 0,25 печ.л. (авторских – 0,13 печ.л.).

4. Кечкин, И. А. Тепломассообменные процессы при длительном хранении зерна пшеницы в металлических силосах / М. А. Беляева, И. А. Кечкин // Пищевая промышленность. - 2020. - №6. - С. 57-60 – 0,25 печ.л. (авторских – 0,13 печ.л.).

Патенты и заявки на выдачу патентов

5. Кечкин, И. А. Патента RU 2716288 С1 «Способ определения скорости фильтрации воздуха в металлическом силосе», заявка №2019113044 от 26.04.2019 / И. А. Кечкин, А. В. Яицких. – 0,76 печ.л. (авторских – 0,32 печ.л.).

6. Кечкин, И. А. Заявка на выдачу патента РФ «Устройство для определения скорости фильтрации воздуха в металлическом силосе» №2019129761 от 23.09.2019 / И. А. Кечкин, В. А. Ермолаев. – 0,76 печ.л. (авторских – 0,38 печ.л.).

Монографии

7. Кечкин, И. А. Активное вентилирование зерна в металлических силосах / Кечкин И. А. – В.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 65с. – 4,22 печ.л.

Статьи в других изданиях

8. Кечкин, И. А. Влияние скорости фильтрации воздуха на режимы активного вентилирования зерна в металлических силосах большой вместимости / И. А.

Кечкин // Инновационные процессы в пищевых технологиях: наука и практика. 2019 С. 184-189. – 0,38 печ.л.

9. Кечкин, И. А. Аэродинамические параметры воздуха при вентилировании зерна в силосах вместимостью 1000, 2000, 5000 и 10 000 тонн / И. А. Кечкин // Научное обеспечение инновационной технологий производства и хранения сельскохозяйственной и пищевой продукции. - 2018. - С. 271-276. – 0,19 печ.л.

10. Кечкин, И. А. Изменение теплофизических параметров воздуха внутри металлических силосов большой вместимости при активном вентилировании зерна / Кечкин И. А. // Наука и научный потенциал. - 2018. - С. 276-281. – 0,32 печ.л.

11. Кечкин, И. А. Обеспечение сохранности зерна в металлическом силосе / И. А. Кечкин, А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченко // Инновационное развитие пищевой, легкой промышленности и индустрии гостеприимства. - 2017. - С. 194-196. – 0,19 печ.л. (авторских – 0,06 печ.л.).

12. Кечкин, И. А. Изменения параметров воздуха внутри металлического силоса при хранении пшеницы / И. А. Кечкин // Инновационные исследования и разработки для научного обеспечения производства и хранения экологически безопасной сельскохозяйственной и пищевой продукции. - 2017. - С. 449-451. – 0,19 печ.л. (авторских – 0,06 печ.л.).

13. Kechkin, I. A. Change of the acid number of wheat grain fat while stored in laboratory conditions / I. A. Kechkin, Yu. D. Gavrichenkov, A. S. Razvorotnev // Food systems. - 2019. - С. 27-30. – 0,25 печ.л. (авторских – 0,06 печ.л.).

Материалы конференций, симпозиумов, конгрессов, сборник научных работ и тезисов докладов

14. Кечкин, И. А. Влияние скорости фильтрации воздуха на зерновую массу в металлическом силосе / И. А. Кечкин // Интенсификация пищевых производств: от идеи к практике: тезисы докладов научно-практической конференции. - 2018. - С. 136-144. – 0,57 печ.л.

15. Кечкин, И. А. Особенности хранения зерна злаковых культур в металлических силосах и его охлаждение активным вентилированием / И. А. Кечкин // Международная конференция сельскохозяйственных наук РАН. - 2016. - Вып. №1. - С. 131-134. – 0,25 печ.л.

16. Кечкин, И. А. Установка для исследования процессов охлаждения и вентилирования зерна / И. А. Кечкин // Пищевые системы: теория, методология, практика: тезисы докладов научно-практической конференции. - 2017. - С. 126-129. – 0,25 печ.л.

17. Кечкин, И. А. Хранение зерна в металлическом силосе вместимостью 10000 тонн / И. А. Кечкин // Международная научно-практическая конференция. - 2018. - С. 104-106. – 0,19 печ.л.

18. Кечкин, И. А. Выбор режима активного вентилирования зерна в зависимости от скорости фильтрации воздуха в металлических силосах большой вместимости / И. А. Кечкин // Инновационные исследования и разработки для научного обеспечения производства и хранения экологически безопасной сельскохозяйственной и пищевой продукции. - 2019. - С. 161-167. – 0,25 печ.л.

19. Kechkin, I. A. Dependence of fat acidity value on wheat grain storage conditions / I. A. Kechkin, V. A. Ermolaev, A. I. Romanenko, M. V. Ivanov, E. A. Gurkovskaya // International Conference on Food Industry, Economy and Security. - 2020. - С. 34-39. – 0,41 печ.л. (авторских – 0,1 печ.л.).
20. Kechkin, I. A. Management of air flows inside steel silo during grain storage / I. A. Kechkin, V. A. Ermolaev, A. I. Romanenko, V. A. Tarakanova, K. D. Buzetti // International Conference on Food Industry, Economy and Security. - 2020. - С. 22-25. – 0,25 печ.л. (авторских – 0,05 печ.л.).
21. Кечкин, И. А. Хранение зерна в металлических силосах с учетом критической скорости фильтрации / М. А. Беляева, И. А. Кечкин // Материалы третьей научно- практической конференции: современные инновационные технологии в экономике, науке, образовании. - 2020. - С. 370-380. – 0,69 печ.л. (авторских – 0,35 печ.л.).
22. Кечкин, И. А. Использование математического моделирования при определении продолжительности охлаждения зерна в металлических силосах/ И. А. Кечкин // Сб. научных трудов ученых и специалистов к 90-летию ВНИХИ - 2020. - С. 175-179 – 0,31 печ.л.
23. Кечкин, И. А. Вентилирование верхней части металлического силоса большой ёмкости / И. А. Кечкин // Неделя науки СПбУ. Материалы научной конференции с международным участием, Институт биомедицинских систем и биотехнологий. В 2 частях. - 2019. - С. 65-68 – 0,25 печ.л.
24. Кечкин, И. А., Беляева, М. А. Хранение зерна в металлических силосах с учетом критической скорости фильтрации/ И. А. Кечкин, М. А. Беляева // Материалы третьей международной научно-практической конференции. - 2020. - С. 374-384 – 0,69 печ.л. (авторских – 0,35 печ.л.).
25. Борисенко, Д. И., Кечкин, И. А. Стоимость зерна как критерий комплексной оценки экономической ситуации в регионах Таджикистана/ Д. И. Борисенко, И. А. Кечкин // Материалы международной научно-практической конференции. - 2020. - С. 51-53 – 0,19 печ.л. (авторских – 0,09 печ.л.).

Перечень условных обозначений

МСБЕ	металлический силос большой емкости
САВ	система активного вентилирования
ТВ _з	температура в зерне
ОВ В _з	относительная влажность воздуха в зерне
ВС В _з	влагосодержание в зерне
Т НВ	температура наружного воздуха
Т НАД _з	температура над зерном на расстоянии 1 метра
ОВ НАД _з	относительная влажность воздуха надзернового пространства
ВС НАД _з	влагосодержание воздуха в надзерновом пространстве