

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Г.В. ПЛЕХАНОВА»

На правах рукописи

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Беляева Марина Александровна

Москва - 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. Обзор литературы.....	14
1.1 Исследование тепломассообменных процессов при длительном хранении зерна пшеницы в металлических силосах большой емкости ...	14
1.2 Влагоперенос при хранении зерна в металлических силосах большой емкости в условиях Юга России.....	23
1.3 Термовлажностной обмен при активном вентилировании зерна в металлических силосах большой ёмкости	25
ГЛАВА 2. Объекты и методы исследований.....	29
2.1 Экспериментальная установка.....	29
2.2 Методика проведения нагрева зерновой массы.....	33
2.3 Математическая модель процесса переноса влаги при активном вентилировании в металлических силосах большой емкости.....	34
2.4 Схема вентилирования зерна в металлическом силосе.....	38
2.5 Методика проведения работ по вентилированию зерна в металлических силосах большой емкости	41
2.6 Методики контроля, оценки и мониторинга установок для вентилирования зерна в металлических силосах большой емкости с обеспечением подачи нормативного объема воздуха	47
2.7 Изотермы сорбции	48
ГЛАВА 3. Результаты экспериментальных исследований	52
3.1 Управление относительной влажностью воздуха межзернового пространства и температурой зерновой массы при различных скоростях фильтрации	52
3.2 Оптимизация предельно допустимых сроков хранения зерна в действующих металлических силосах большой ёмкости.....	61
3.3 Управление процессом вентилирования верхней части металлического силоса	63

3.4. Статистическая обработка данных.....	80
3.4.1 Статистическая обработка данных с использованием программной среды MATLAB.....	82
3.5. Оценка погрешности результатов измерений.....	85
3.6. Влияние различных факторов на время охлаждения слоя зерна в металлических силосах большой емкости.	86
3.7. Модель процесса нагрева и обезвоживания зерна.....	90
3.8. Зависимость кислотного числа жира от условий хранения зерна пшеницы в металлических силосах большой ёмкости.....	97
ГЛАВА 4. Оценка эффективности металлических силосов большой емкости по удельному расходу электроэнергии на вентилирование зерна	110
4.1 Экономическая эффективность хранения зерна на предприятии	111
4.2 Стоимость зерна как критерий комплексной оценки экономической ситуации регионов Российской Федерации	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
Перечень сокращений и условных обозначений	120
Список используемой литературы	121
Приложение А	132
Приложение Б.....	156
Приложение В (справочное)	167

ВВЕДЕНИЕ

Качество питания сегодня рассматривается как фактор национальной безопасности, поэтому растущее с каждым годом производство продукции из зерна, увеличение его закупок и поступления в государственные ресурсы, требуют дальнейшего эффективного развития сети для приема и хранения огромных масс товарного зерна.

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, A. 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.

Народнохозяйственное значение продовольственного зерна в значительной степени определяется тем, что зерновые продукты при соответствующих условиях могут храниться в течение длительного времени без существенного изменения качества и пищевой ценности. На современном этапе технического развития предприятий послеуборочная обработка зерна играет решающую роль, так как она позволяет улучшить качество семян и сохранить пищевую ценность зерна. Обеспечение сохранности продовольственного зерна в нашей стране является одной из важнейших задач государства, которая по масштабам и содержанию базируется на широкой научной основе. Для её успешного расширения хлебоприёмные предприятия, наряду с очисткой, широко используют сушку и

активное вентилирование зерна. Ежегодно на предприятиях переработки зерна сушке и активному вентилированию подвергается от 70 до 90 % всего заготавливаемого зерна [117]. В соответствии с практикой хранения зерновых культур, металлические вентилируемые силоса, заслуженно, можно считать наиболее рентабельными, так как сроки строительства таких силосов в 2 - 3 раза быстрее чем железобетонных при меньших капитальных затратах, приблизительно на 15 %, а на процесс самосогревания, который происходит в зерне, можно воздействовать с помощью эффективных систем вентилирования.

В последнее время, для увеличения ёмкостей хранения на территории Российской Федерации в основном строят металлические силоса большой ёмкости (МСБЕ) от 2 000 до 10 000 тонн зерна, оборудованные системами активного вентилирования, то есть с принудительным продуванием массы зерна воздухом. С помощью последних, можно успешно охлаждать зерновую массу в больших объемах, избегая самосогревания, применять меры по борьбе с вредителями зерна.

В отличие от естественной вентиляции, активное вентилирование позволяет создать и поддерживать оптимальные условия в больших объёмах зерна и благодаря этому снизить потери при хранении и более эффективно использовать объём хранилищ.

Режимы и приемы активного вентилирования зерна базируются на результатах научных исследований и многолетней практике хранения зерновых масс различных культур, как в России, так и за рубежом.

Подобный способ обработки зерна позволяет предотвратить и ликвидировать самосогревание зерна, охлаждать зерновую массу до температуры, обеспечивающей длительное хранение. Вентилирование теплым воздухом с низкой относительной влажностью позволяет подсушивать зерно и ускоряет процесс послеуборочного дозревания, улучшая хлебопекарные свойства зерна. Охлаждение и подсушивание зерна создают в зерновой насыпи неблагоприятные условия для развития вредителей и микроорганизмов.

Активное вентилирование относят к числу производительных и эффективных способов обработки зерна. На сегодняшний день можно найти

большое число работ, посвященных применению активного вентилирования на практике, но, к сожалению, они не затрагивают вопросы вентилирования, распределения воздушных потоков, изменения характеристик воздуха внутри зернового слоя, учета изменения относительной влажности воздуха в межзерновом пространстве для МСБЁ свыше двух тысяч тонн.

Для МСБЕ от двух до десяти тысяч тонн процесс охлаждения зерновой массы с использованием активного вентилирования мало изучен.

Актуальность темы. 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.

Эффективное использование установок для активного вентилирования зерна, большое их разнообразие может быть достигнуто лишь на основе применения научно обоснованных режимов обработки зерна с учётом периодов безопасного хранения различных культур. Применяемая система активного вентилирования - это принудительное продувание массы зерна воздухом [1]. В отличие от естественной вентиляции активное вентилирование позволяет создать и поддерживать равные оптимальные условия в больших объёмах продукции и благодаря этому снизить потери сельскохозяйственной продукции при хранении и более эффективно использовать объём зернохранилищ. Этот способ обработки зерна позволяет предотвратить и ликвидировать самосогревание зерна, охладить его до температуры, обеспечивающей длительное хранение. Вентилирование насыпи теплым воздухом с низкой относительной влажностью позволяет подсушить зерно [2] 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.

Действующими нормативными документами [3, 4] 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 т.д.). Охлаждают зерно наружным, воздухом с помощью установки активного вентилирования в силосах. Затраты на вентилирование составляют основную долю затрат на хранение зерна и состоят из двух частей: 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.

Чем меньше удельный расход воздуха на охлаждение зерна, тем рентабельнее силос для хранения [5]. Исследования Казахского филиала ВНИИЗ и зернового треста Венгрии показали, что удельные подачи воздуха в режиме вентилирования в малых объемах не обеспечивают эффективного охлаждения зерна, в том числе способствуют развитию плесеней хранения и ухудшению качества зерна [6]. Минимально допустимая удельная подача воздуха при вентилировании зерна с целью его охлаждения принята равной $10 \text{ м}^3/\text{ч} \times \text{т}$ [7]. Обеспечение подачи нормативного объема воздуха в зерновую массу для ее охлаждения является основным условием сохранности зерна, исключающим развитие плесеней хранения [8].

Обеспечение подачи нормативного объема воздуха в силос достигается за счет изменения массы вентилируемого зерна, при этом затраты энергии на тонну продукта будут являться критерием оценки рентабельности силоса при обеспечении сохранности зерна. Силосы, в которых можно охлаждать больший объем зерна при одинаковых мощностях на вентиляторах, более рентабельны и применимы для хранения.

Норматив для определения объема нагнетаемого воздуха в силосе в зависимости от массы зерна не учитывает скорости воздуха. При вентилировании

в одном и том же силосе разных масс зерна будут наблюдаться различные режимы скорости воздуха. Влияние скорости воздуха на процесс охлаждения зерна был изучен ранее [9], но только для зерна после сушки и для специальной охладительной 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 [70] изменялась от 0,04 до 0,22 м/с.

На сегодняшний день можно найти большое число работ как в Российской Федерации, так и за рубежом, посвященных применению систем активного вентилирования, но практически все они не затрагивают вопрос вентилирования, воздухораспределения, учета относительной влажности воздуха в металлических силосах больших емкостей: 2000, 3000, 5000 и 10000 тонн. Для МСБЕ от 2000 до 10000 тонн процесс охлаждения зерновой массы при помощи активного вентилирования сегодня мало изучен.

Основным способом хранения в МСБЕ, по инструкциям и Правилам безопасности является хранение зерна в сухом и очищенном состояниях. Известно, что на сроки хранения влияют не только влажность и чистота, но и температура зерна, закладываемого на хранение. Чем меньше температура, тем продолжительнее сроки хранения. 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, имеющим более низкую температуру по сравнению с зерном [70].

Сегодня нет достоверных, научно обоснованных данных, относящихся к прогнозу изменения теплофизических параметров воздуха в МСБЕ. Исходя из этого невозможно определить: время вентилирования, периоды образования конденсата в верхнем слое зерна и под крышей, температуру охлажденного зерна, допустимые кондиции воздуха для охлаждения.

Цель диссертационной работы: 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.

Задачи исследования. Для реализации поставленной цели необходимо решить 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.

Теоретическая и 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 [110];

- 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 [110], которая была апробирована на предприятии АО «Биотехнологии» в Тамбовской области (Акт промышленных испытаний прилагается);

- на разработанный способ определения скорости фильтрации воздуха в МСБЕ получено положительное решение о выдаче патента РФ № 2019113044/28(025164) 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.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Вентилирование зерна в МСБЕ с обеспечением подачи нормативного объема воздуха;

2. Оценка возможности образования конденсата в верхнем слое зерна и под крышей силоса с контролем параметрических характеристик воздуха;

3. Технические устройства, позволяющие оценить эффективность применения САВ в МСБЕ.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность полученных результатов обеспечивается многократной повторностью опытов, применением современных физико-химических методов анализа, математической обработкой результатов эксперимента и подтверждается апробацией полученных результатов в промышленных условиях производства.

Основные результаты исследовательской работы были доложены на международных и научно-практических конференциях: «Сельскохозяйственные науки РАН», Москва 2016; «Пищевые системы: теория, методология, практика» , Москва 2017; «Интенсификация пищевых производств: от идеи к практике», Москва 2018; «Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова», Москва 2018; «Инновационные процессы в пищевых технологиях», Москва 2019; «Сельское хозяйство и продовольственная безопасность», 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 20 работ в российских и зарубежных изданиях, в том числе 1 монография, 4 статьи в журналах, включенных Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки России (далее – ВАК) в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук; 8 статей в ведущих Российских и зарубежных журналах; 7 тезисов докладов; получено положительное решение о выдаче патента РФ № 2019113044/ 28(025164) 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 основное содержание 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.

ГЛАВА 1. Обзор литературы

1.1 Исследование тепломассообменных процессов при длительном хранении зерна пшеницы в металлических силосах большой емкости

Изучению особенностей хранения зерна в металлических силосах большой емкости, в том числе и длительному хранению, посвящено много работ. В работах уделяется значительное внимание исследованиям по изменению качества зерна в разные сроки хранения, определению эффективности активного вентилирования зерновой массы с целью охлаждения зерна в различных климатических условиях. Большинство этих работ выполнено исследователями ВНИИЗ и его филиалов, Кубанского, Сибирского и Казахского в восьмидесятые годы [111].

Исследовали изменение параметров температуры и влажности (начальное значение 10,6 %) зерна пшеницы в течение года хранения. Влажность зерна как в пристенной, так и центральной части металлического силоса практически не изменялась, оставаясь на уровне от 10 до 11 %. Значения влажности фиксировали ежемесячно. Что касается температуры зерна, она изменялась от 20 до 32 °С, при минимальной температуре наружного воздуха минус 5 °С, в соответствии с сезонными изменениями температуры. Отмечается, что влажность зерна в поверхностном слое имела тенденцию к увеличению на 0,4–1,2 %. Влажность зерна в конце эксперимента составляла 11,6 % [10].

На основании лабораторных опытов были определены сроки безопасного хранения зерна пшеницы при различных режимах. Исследователи рекомендуют следующие сроки (таблица 1).

Исследования проводились по комплексу показателей, в том числе по качественному и количественному составу микрофлоры (бактерии и плесневые грибы) [11].

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

Таблица 1 – Сроки безопасного хранения зерна пшеницы при различных значениях влажности и температуры [111].

Влажность зерна, %	Температура зерна, °С	Срок 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

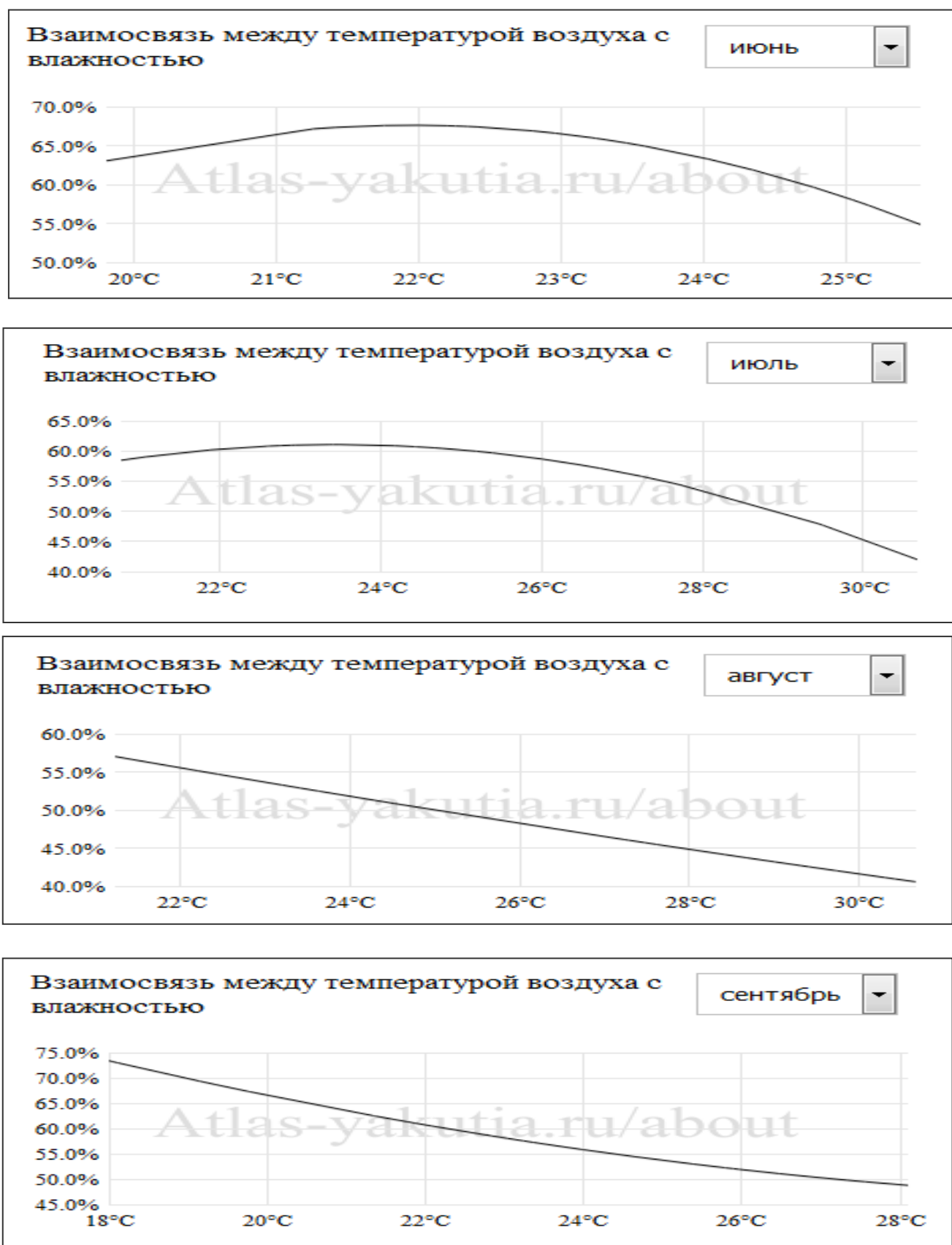


Рисунок 1 - Изменения относительной влажности воздуха в зависимости от температуры за период июнь – сентябрь

Уборка зерновых, формирование однородных по качеству партий зерна, послеуборочное дозревание зерновой массы на юге РФ (на примере Краснодарского края) осуществляется в летний период с июня по сентябрь. Среднесуточная температура воздуха в этот период изменяется от 15 до 30 °С, при этом средние значения ночных температур воздуха (по данным сайта Климатическая статистика годов России, (статистические данные приводятся за последние десять лет) колеблются от 10 до 25 °С, а дневные температуры изменяются в пределах от 15 до 35 °С. Очевидно, что температура зерновой массы при закладке на хранение соответствует средней температуре воздуха в период уборки урожая, а зерно требует охлаждения. Учитывая, что ночные температуры воздуха статистически вероятно ниже температуры зерна, вентилирование с целью охлаждения должно проводиться в ночное время. Применительно к использованию наружного воздуха для активного вентилирования зерна, важным является его относительная влажность. На рисунке 1 представлены изменения относительной влажности воздуха в зависимости от температуры. Из представленных диаграмм можно видеть, что просматривается некоторая зависимость между температурой наружного воздуха и его относительной влажностью. Так диапазон «низких» значений $\varphi = 45-65 \%$ соответствует более высоким значениям температур воздуха ($t = 23 - 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) в каждой из диаграмм (рисунок 1). Эта тенденция характерна и для других, в том числе зимних месяцев года. Например, в январе при температуре воздуха минус 5 °С, относительная влажность воздуха достигает 85 %. При значениях температуры воздуха ниже 20 °С, когда собственно целесообразно охлаждать зерновую массу в силосах, относительная влажность воздуха достигает значений 70÷75 %. Известно, что при таких значениях относительной влажности, влажность зерна пшеницы и ячменя соответствует критической, то есть 14,0 - 14,5 %. Иными словами, существует опасность увлажнения зерна при охлаждении зерновой массы с температурой 25÷29 °С за счет сорбции влаги из воздуха, если влажность зерна была на уровне 12-13 %.

Из приведенных климатических данных (статистика последних десяти лет) можно видеть, что в указанный период (июнь – сентябрь) понижение температуры

воздуха ночью составляет в этом регионе $10 \div 12$ °С. Это приводит к повышению в ночное время значений относительной влажности воздуха, а, следовательно, его влагосодержания.

Необходимость охлаждения зерна обосновывают результаты исследований качества пшеницы при хранении в МСБЁ диаметром 15,2 м, выполненных ВНИИЗ [12]. Установлено, что пшеница при температуре 10 °С с влажностью от 11 до 15 % может храниться до двенадцати месяцев без изменения показателей качества. При температуре 20 °С без изменения качества может храниться двенадцать месяцев только с влажностью не более 12 %. В зерне влажностью от 13 до 14 % после трех месяцев хранения наблюдается ухудшение некоторых показателей (посевных свойств, уменьшение активности дегидрогеназ, увеличение кислотного числа жира), а к девяти месяцам увеличивается интенсивность дыхания приблизительно в два раза [111]. При температуре 30 °С, хранение зерна без ухудшения качества наблюдали в течение двух месяцев с влажностью не более 13 %. При влажности от 13 до 14 % ухудшение качества происходило уже в первый месяц хранения. К трем месяцам качественные показатели значительно ухудшились: снизилась натурная масса, энергия прорастания и всхожесть, увеличилось кислотное число жира, интенсивность дыхания, снизилось качество клейковины [111].

Вентилируют зерно в ночное время наружным воздухом. Принимаем характерные для конца сентября и начала октября параметры воздуха: температура $T_B = 10$ °С, относительная влажность воздуха $\phi_B = 60$ %. При этих параметрах влагосодержание воздуха $d_B = 5,58$ г/м³, (таблица 2.), составленную на основе I-d диаграммы [13].

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 таблицы 1.

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

где d - влагосодержание воздуха, в г/м³;

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

e – основание натурального логарифма;

t – текущее значение температуры воздуха, в °С.

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

Таблица 2 – Влагосодержание воздуха

Влагосодержание воздуха d г/м³ при различных значениях температуры и относительной влажности воздуха								
температура воздуха t , °С	при атмосферном давлении 745 мм ртутного столба							
	относительная влажность воздуха φ , %							
	100 ¹	90	80	70	60	50	40	30
-15	1,25	1,13	1,00	0,88	0,75	0,63	0,50	0,37
-10	1,96	1,76	1,57	1,37	1,18	0,98	0,78	0,58
-5	3,02	2,72	2,42	2,11	1,81	1,51	1,21	0,91
0	4,62	4,16	3,70	3,23	2,77	2,31	1,85	1,39
5	6,61	5,95	5,29	4,63	3,97	3,31	2,64	1,97
6	7,16	6,44	5,73	5,01	4,30	3,58	2,68	1,78
7	7,70	6,93	6,16	5,39	4,62	3,85	3,08	2,31
8	8,25	7,43	6,60	5,78	4,95	4,13	3,30	2,47
9	8,79	7,91	7,03	6,15	5,27	4,40	3,52	2,64
10	9,34	8,41	7,47	6,54	5,58	4,67	3,74	2,81
11	10,08	9,07	8,06	7,06	6,05	5,04	4,03	3,02
12	10,82	9,74	8,66	7,57	6,49	5,41	4,33	3,25
13	11,55	10,40	9,24	8,09	6,93	5,78	4,62	3,46

¹ Точка росы

Влагосодержание воздуха d г/м³ при различных значениях температуры и относительной влажности воздуха								
температура воздуха t , °C	при атмосферном давлении 745 мм ртутного столба							
	относительная влажность воздуха ϕ , %							
	100 ¹	90	80	70	60	50	40	30
14	12,29	11,06	9,83	8,60	7,37	6,14	4,92	3,70
15	13,03	11,73	10,42	9,12	7,82	6,52	5,21	3,90
20	18,00	16,20	14,40	12,60	10,80	9,00	7,20	5,40
25	24,60	22,14	19,68	17,22	14,76	12,30	9,84	7,38
30	33,34	30,00	26,67	23,34	20,00	16,67	13,34	10,01
35	44,84	40,36	35,87	31,39	26,90	22,42	17,94	13,46
40	59,98	53,98	47,98	41,99	35,99	29,99	23,99	17,99
45	79,98	71,89	63,90	55,92	47,93	39,94	31,95	23,96

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

Инструкция по активному вентилированию зерна и маслосемян (техника и технология) [14], для пшеницы влажностью до 14 % рекомендует удельный расход воздуха $q=10$ м³/ч на одну тонну зерна. Скорость снижения температуры зерна $V_t = 0,2$ °C за один час вентилирования, принимаем исходя из результатов исследований ВНИИЗ при вентилировании пшеницы в металлической емкости диаметром 22,8 м и высотой насыпи 17 м [15].

Эксперименты по изменению температуры и влажности зерна при активном вентилировании в металлических силосах показали, что скорость изменения

(понижения) температуры зависит от удельного расхода воздуха, разности температур воздуха и зерна. Анализируя данные, приведенные на графиках, можно сделать вывод, что средняя часовая скорость снижения температуры зерна (начальная температура 22 °С) изменяется от 0,20 до 0,12 °С/ч, причем большему значению соответствуют первые сутки вентилирования. Эти цифры соответствуют разности температур воздуха и зерна в 10 °С и удельной подаче воздуха при вентилировании – 10 м³/ч×т. При перепаде температур в 20 °С, указанные значения скорости снижения температуры зерновой массы несколько выше, до 0,24 °С/ч. Для условий юга России, разность температур наружного воздуха и зерновой массы больше 10 °С маловероятна. На этом основании среднюю часовую скорость снижения температуры зерна при активном вентилировании для расчета можно принять в диапазоне 0,12÷0,18 °С/ч. При удельном расходе воздуха 10 м³/ч×т.

Проведен анализ удельных затрат электроэнергии на вентилирование 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 10 °С. При больших значениях разности температур удельные затраты электроэнергии снижаются более, чем в два раза [16].

По данным исследований ВНИИЗ, при хранении зерна в металлических емкостях, суточные перепады температур в 10 °С и более могут быть в пристенном слое толщиной до 0,05 м. При этом в силосе вместимостью до 4000 тонн на этот слой приходится менее 1 % массы зерна [17].

Срок хранения свежесобранного зерна с влажностью 14 %, согласно общему технологическому регламенту для элеваторов и хлебоприемных предприятий, для пшеницы, ржи, ячменя, овса и риса, без вентилирования, прогнозируются до 12 месяцев (для диапазона температур от 5 до 25 °С) [18].

По данным отчета Казахского филиала ВНИИЗ, образование конденсата в надзерновом пространстве металлического силоса возможно при резком падении температуры (более чем на 10 °С) даже при температуре зерна в насыпи 10 °С, относительной влажности воздуха межзерновых пространств 65 %. При этом

происходит повышение относительной влажности воздуха в верхней части насыпи при выходе воздуха в надзерновое пространство до 90 %, что и приводит к переходу через точку росы и образованию конденсата. В работе также отмечается, что в поперечном сечении силоса, плотность зерновой массы различна (в центре выше, к периферии – ниже). В центре охлаждение зерна идет медленнее. Неравномерно и температурное поле по сечению силоса, – в центре от 10 до 14 °С, в зоне ближе к стенкам – от 2 до 8 °С. При этом влажность зерна пшеницы не превышала 14 %. [19].

В Сибирском филиале ВНИИЗ эксперименты проводили в опытном металлическом силосе Благоварского элеватора в течение девяти месяцев и параллельно в лабораторных условиях в партии твердой пшеницы влажностью от 11,0 до 13,6 %. Средняя температура зерна не превышала 10 °С, а в пристенном и поверхностном слоях в летнее время температура достигала от 20 до 25 °С. Опытное хранение показало, что зерно с влажностью до 13,6 % без ухудшения качества можно хранить до девяти месяцев. Большой срок хранения возможен для зерна пшеницы с влажностью до 12 % [20].

1.2 Влагоперенос при хранении зерна в металлических силосах большой емкости в условиях Юга России

Кубанским Филиалом было исследовано надзерновое и подкровельное пространство металлических силосов в условиях Юга России.

Эти зоны силоса непосредственно связаны с одним из существенных факторов потенциально возможного повышения качественной сохранности зерна при его длительном хранении в металлических силосах в условиях юга России - за счет применения возможных приемов, обеспечивающих снижение эффектов конденсации влаги на внутренних поверхностях кровли и незаполненных стен силоса. Такая конденсация влаги наиболее вероятна в осенне-зимний период, когда хранящееся зерно еще не охлаждено активным вентилированием, а температура наружного воздуха регулярно опускается до значений ниже температуры точки росы для воздуха, находящегося в непосредственном соприкосновении с указанными внутренними поверхностями силоса. Расчеты показывают, что условия для такой конденсации возможны уже при перепаде температур между зерном и наружным воздухом от 5 до 6 °С, что вполне характерно для реальных условий юга России. Сама же такая возможная конденсация влаги заканчивается ее стеканием на поверхность зерновой массы, что приводит к появлению на поверхностях зерновок свободной влаги и является существенным фактором снижения качественной сохранности зерна при его длительном хранении [121].

Сложившиеся подходы к анализу причин считающейся меньшей технологической пригодности металлических силосов в сравнении с железобетонными емкостями для длительного хранения зерна - не придают должного внимания к процессам, протекающим в подкровельном пространстве металлического силоса, и, вследствие этого, не рассматривают все возможные корректирующие эту ситуацию мероприятия.

Здесь следует подчеркнуть, что заполненные зерном внутренние поверхности металлического силоса практически не подвержены рискам конденсации влаги,

содержащейся в межзерновом воздухе, что объясняется спецификой фазового уравнивания между поверхностями зерновок и межзерновым воздухом.

Именно из последнего замечания в этой части вытекает наиболее простой и наименее затратный способ улучшения условий для обеспечения качественной сохранности зерна при его длительном хранении в металлическом силосе: необходимо загружать такой силос зерном полностью, желательно под горловину, оставляя как можно меньшим свободное от зерна надзерновое пространство. Это минимизирует площадь внутренних поверхностей металлического силоса, на которых возможна конденсация влаги и последующее ее попадание на 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 является правильная организация ее конвективного вентилирования. В домостроительных технологиях такая проблема хорошо известна и имеет отработанные решения, которые вполне могут быть применены для обеспечения вентилирования подкровельного пространства металлического силоса. Сущность данных решений состоит в обеспечении подкровельного пространства специально направленного движения конвективных восходящих потоков наружного воздуха. Такая свободная конвекция воздуха в подкровельном пространстве может быть обеспечена за счет установки комплекта специальных воздухоподводящих и воздухоотводящих аэраторов, причем воздухоотводящие аэраторы необходимо устанавливать на верхних отметках кровли, а воздухоподводящие аэраторы – ближе к нижнему ее срезу. В некоторых конструкциях кровли изготовителями заявляется о кольцевом зазоре по нижнему периметру кровли – его можно было бы рассматривать как распределенный подводящий аэратор. За счет разнесенного по высоте расположения подводящих и отводящих аэраторов и соответствующего распределения их по всей площади кровли мог бы и быть организован в непосредственном соприкосновении с внутренней поверхностью кровли поток воздуха, который можно определить, как «тяга» и который по своим параметрам менее склонен к конденсации на этой

внутренней поверхности. Если исходить из рассмотренных позиций, то на внешней поверхности кровли должен быть установлен расчетный комплект аэраторов – подводящих и отводящих. Однако, это задача – для изготовителей силосов – их установка не сможет быть полноценно осуществлена эксплуатирующей организацией. Изготовители же силосов этой проблеме достаточного внимания не уделяют. Устанавливаемые на кровле силоса штатные воздухораспределительные устройства, по сути решают проблему вывода/ввода воздуха из силоса/в силос при загрузке/выгрузке зерна, а также при активном вентилировании зерна в силосе. Имеющиеся в нашем распоряжении многочисленные материалы подтверждают, что практикующееся расположение таких воздухораспределительных устройств на кровле силоса не обеспечивает полноценное конвективное вентилирование внутренних поверхностей кровли силоса и, соответственно, не способствует снижению рисков увлажнения зерна конденсационной влагой.

Еще одним пассивным приемом, способным снизить риски описанного конденсационного увлажнения является теплоизоляция поверхностей. Причем, такую теплоизоляцию в первую очередь целесообразно проводить именно у кровли силоса. Теплоизоляция стен силоса, по-видимому, даст значительно меньший экономический эффект в силу значительно больших затрат (из-за большой площади) и меньшей технологической эффективности. Указанный прием также относится к разряду рекомендуемых конструкторских решений для изготовителей силосов.

1.3 Термовлажностной обмен при активном вентилировании зерна в металлических силосах большой ёмкости

На сегодняшний день существует большое число работ, посвященных использованию активного вентилирования в металлических силосах и созданию математических моделей, позволяющих описать данный процесс.

В частности, рассматриваются результаты решения термовлажностной задачи активного вентилирования в слое зерна в металлическом силосе, учитывая влияние различных факторов на протекание в зерновом слое. Полученные решения могут быть использованы для выбора режима активного вентилирования хранения зерна с сохранением его качеств при минимизации затрат на привод вентилятора [21]. В математической модели решения термовлажностной задачи активного вентилирования в слое зерна в металлическом силосе существует большое количество допущений и отсутствие ее апробации в условиях действующего предприятия.

Количественные зависимости температуры влаговываждения от относительной влажности и температурного режима внутри силоса позволяют подобрать энергоэффективный режим работы вентилятора. Учитывая совокупность факторов, оказывающих влияние на конденсацию влаги внутри силоса, таких как солнечная радиация и температура наружного воздуха, суточное погодное регулирование скорости подачи воздуха вентилятором внутри силоса может иметь большое значение с точки зрения экономии электроэнергии в течение периода хранения зерна при сохранении его биохимических характеристик [22]. В данном случае был испробован один металлический силос с диаметром 20 метров, при использовании активного вентилирования не были учтены скорость фильтрации проходящего воздуха через зерновую массу, все расчеты велись исходя из нагнетаемого вентиляторами объема воздуха. При данном способе не учитываются утечки воздуха в самом силосе.

Американскими учеными была предложена математическая модель моделирования напора и температуры зерна в бункерах [23]. В ней не были учтены размеры и объем хранимой продукции в металлических силосах, а предложены решения для оптимизации процесса активного вентилирования зерна для бункеров вместимостью от двух до пяти тонн. При учете, что в металлических силосах хранится от двух тысяч до десяти тысяч тонн, данная модель требует уточнений и пересмотра основных критериев оценки.

В работах, посвященных численному моделированию сопротивления слоя в сушилке, не были учтены режимы с активным вентилированием зерновой массы, а также не рассмотрены условия внесения дополнительной влажности и температуры из внешней среды [24].

При исследовании гигроскопических свойств зерна не было учтено равновесное содержание влаги в зерне, хранимое в металлических силосах [25]. Использовался общий тензометрический метод определения равновесной влажности, а эксперимент проводился в диапазоне температур воздуха от 5 до 25 °С и его относительной влажности от 33 до 70 %, не затрагивая критичных значений образования конденсата, при относительной влажности более 90 % [26].

Исходя из проведенного обзора российских и зарубежных источников можно прийти к выводу, что вопрос применения активного вентилирования в металлических силосах большой ёмкости рассмотрен не в полном объеме. Границы проведенных экспериментов не учитывают отрицательные значения температуры и относительной влажности воздуха более 90 % [27]. Скорость фильтрации воздуха не рассмотрена, как комплексной элемент в системе активного вентилирования. Не учтены утечки в металлических силосах и их влияние на нормативный расход воздуха, нагнетаемый вентиляторами.

Выводы по первой главе

Проведен анализ российской и зарубежной литературы. Изучены особенности хранения зерна в металлических силосах большой емкости при длительном хранении. Особое внимание было уделено исследованиям по изменению качества зерна в разные сроки хранения и определению эффективности активного вентилирования зерновой массы с целью охлаждения зерна в различных климатических условиях [111]. Были определены сроки безопасного хранения зерна пшеницы при различных режимах вентилирования.

Было установлено, что в зерне влажностью от 13 до 14 % после трех месяцев хранения наблюдается ухудшение показателей (посевных свойств, увеличение кислотного числа жира), к девяти месяцам увеличивается интенсивность дыхания приблизительно в два раза. Хранение зерна без ухудшения качества наблюдается в течение двух месяцев с влажностью не более 13 %. При влажности от 13 до 14 % ухудшение качества происходит уже в первый месяц хранения. К трем месяцам качественные показатели значительно ухудшаются: снижается натурная масса, энергия прорастания и всхожесть, увеличивается кислотное число жира, интенсивность дыхания, снижается качество клейковины.

Количественные зависимости температуры влаговыведения от относительной влажности и температурного режима внутри силоса позволяют подобрать энергоэффективный режим работы вентилятора. Учитывая совокупность факторов, оказывающих влияние на конденсацию влаги внутри силоса, таких как солнечная радиация и температура наружного воздуха, суточное погодное регулирование скорости подачи воздуха вентилятором внутри силоса может иметь большое значение с точки зрения экономии электроэнергии в течение периода хранения зерна при сохранении его биохимических характеристик.

ГЛАВА 2. Объекты и методы исследований

2.1 Экспериментальная установка

Объектом исследования является зерно пшеницы.

Для разработки системы, позволяющей контролировать значения параметров температуры, перепада давления, скорости фильтрации и относительной влажности воздуха в зерновой массе, хранящейся в металлических силосах большой ёмкости в режиме реального времени была разработана структурная схема, представленная на рисунке 2.

В процессе серии экспериментов зерно находится как в специально разработанной экспериментальной установке, так и в промышленных металлических силосах большой ёмкости [28]. В процессе хранения зерновой массы применяют активное вентилирование с вариативными параметрами нагнетаемого воздуха из внешней среды, имеющего различные температуры и показатели относительной влажности, тем самым внося изменения в систему, изучая и анализируя последствия.

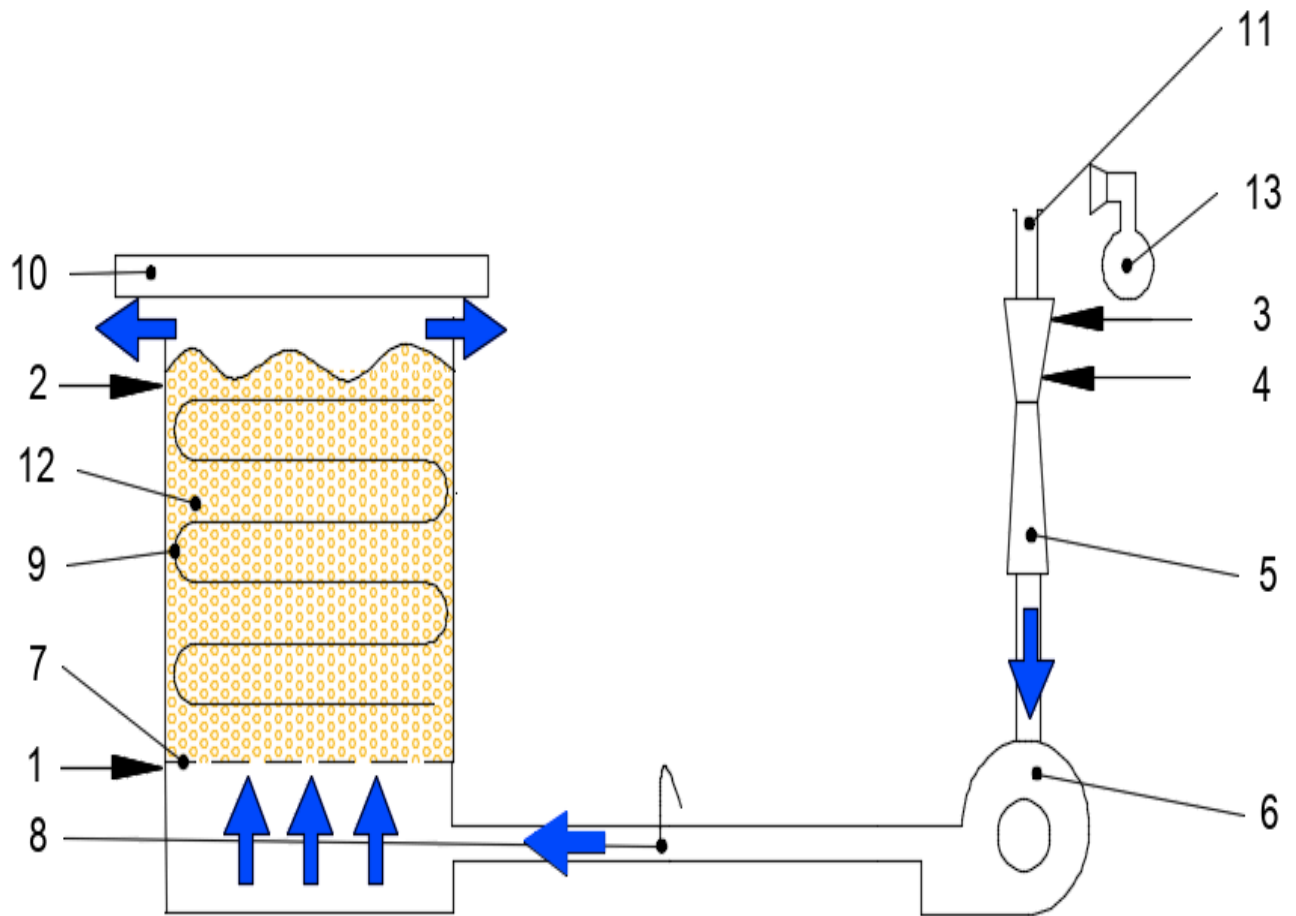
Методики и способы обработки полученных экспериментальных данных были апробированы на экспериментальной установке и МСБЕ действующих предприятий ООО «Тесницкое», Тульская область, и АО «Биотехнологии», Тамбовская область.

Для исследования процесса охлаждения зерна зерновую массу необходимо предварительно подготовить [29]. Для изучения процесса активного вентилирования и предварительной подготовки зерновой массы была создана экспериментальная установка, представленная на рисунке 3.

Ёмкость экспериментальной установки, наполняемой зерном (рисунок 2), имеет следующие габариты: ширина – 0,42 м, высота – 1 м, длина – 0,8 м, его рабочий объём составляет 0,336 м³. Вместимость от 250 до 280 кг в зависимости от культуры и насыпной массы.



Рисунок 2 – Структурная схема исследований



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.

Рисунок 3 - Схема экспериментальной установки [70]

Перед началом нагрева зерновой массы необходимо засыпать зерно четвертого класса, температурой 19°C и относительной влажностью от 14 до 14,5 %. Определение влажности зерна по слоям в лаборатории показали ее незначительное уменьшение с 14,0-14,5 % до 13,8-14,2 %, что находится в погрешности самого метода. Исходя из этого приняли параметр относительной влажности зерновой массы не именным и не зависящим от нагрева.

При включении нагревательного кабеля необходимо плотно закрыть крышку 10 и перекрыть воздушный вентиль 8. После этого процесс нагревания зерна

происходит из расчета $2,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ в час. После достижения нагрева зерновой массы до необходимой температуры нагревательный кабель необходимо отключить. Стоит отметить, что нагревательный кабель находится в зерновой массе постоянно и не извлекается из неё после нагрева. После того, как зерновая масса нагрета до необходимой температуры, нагревательный кабель выключен, необходимо оставить емкость с зерном с плотно закрытой крышкой на 60 минут, это необходимо для полного выравнивания температуры по слоям и получения однородной зерновой массы по температуре [30].

По истечении 60 минут с момента нагрева зерновой массы необходимо открыть крышку 10, после этого можно приступать к проведению дальнейших экспериментов.

Стенки установки выполнены из теплоизоляционного материала, благодаря этому засыпаемое зерно, можно рассматривать, как элемент слоя зерновой массы внутри реального металлического силоса на удалении его от стенки на 0,5 метра и более, так как при данном расстоянии высокая теплопроводность металлической стенки не оказывает на зерновую массу никакого воздействия [31]. Зерновая масса должна быть однородна заданным значениям температуры. Для этих целей на экспериментальной установке используется нагревательный кабель.

Нагревательный кабель был выбран с учетом внешних характеристик (размеров установки, разности температур атмосферного воздуха), его нагрев составляет до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Шаг укладки нагревательного кабеля в зерновой массе составил 0,1 метра между слоями, данное условие необходимо учитывать, так как при кондуктивном нагреве зерна на расстоянии более 0,2 метра необходимо затрачивать большое количество времени и энергии, а при расстояниях свыше 0,3 метра нагрев зерна практически не происходит, так как зерновая масса имеет низкий коэффициент температуропроводности [32]. Схематическое расположение теплового кабеля представлено на рисунке 4.

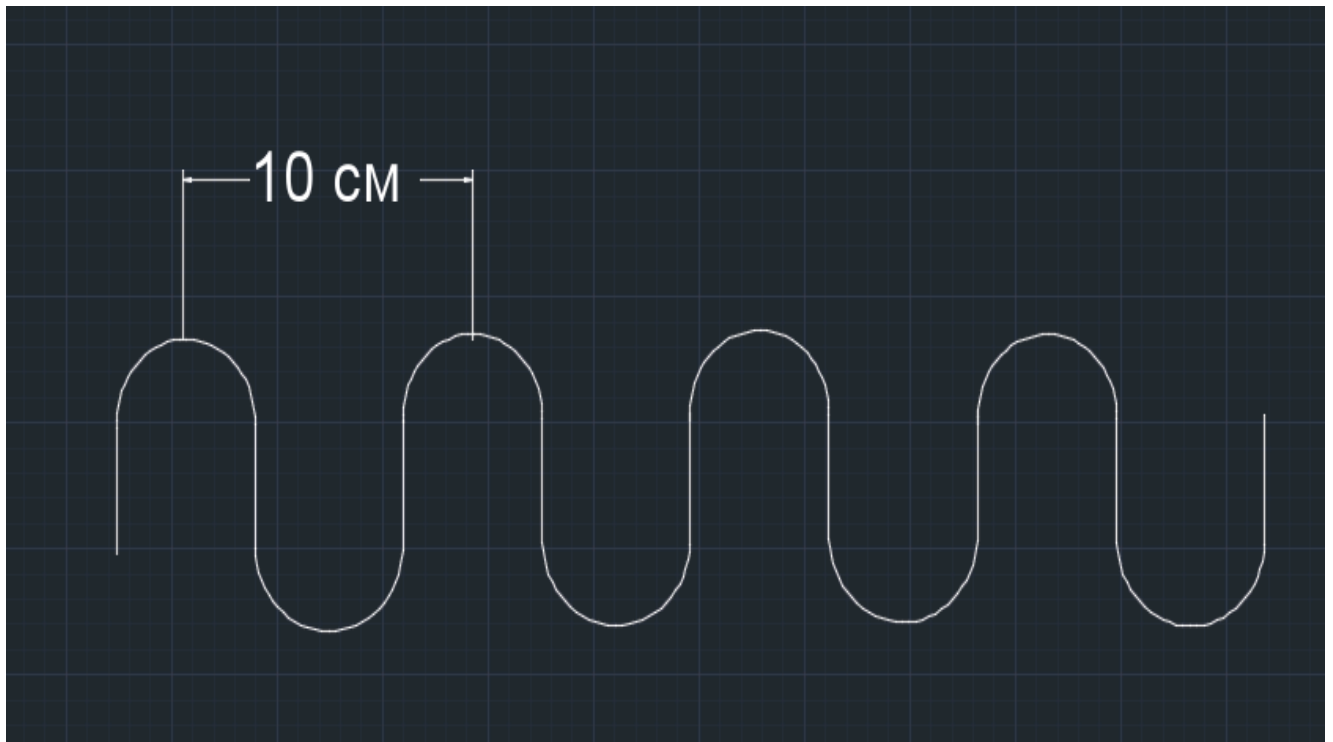


Рисунок 4 - Схематическое расположение теплового кабеля в зерновой массе

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

2.2 Методика проведения нагрева зерновой массы

Зерновая масса является однородной и имеет начальные значения относительной влажности и температуры.

Электрический нагревательный кабель уложен в зерновую массу с шагом в $0,1$ метр по высоте и по ширине. При нагреве зерновой массы крышка в экспериментальной установке находится в закрытом состоянии.

Процесс нагревания происходит до достижения необходимого значения температуры зерновой массы исходя из расчета $2,75^{\circ}\text{C}$ в час. После достижения необходимой температуры зерновой массы нагревательный кабель отключают, при этом крышка экспериментальной установки остается закрытой. Нагревательный кабель находится внутри зерновой массы и оснащен датчиком поддержания заданных значений температуры.

2.3 Математическая модель процесса переноса влаги при активном вентилировании в металлических силосах большой емкости

Процесс охлаждения зерна простой: атмосферный или искусственно охлажденный воздух подается вентилятором в слой зерна через воздухораспределительное устройство, проходит через слой и выбрасывается наружу. При этом слой зерна охлаждается и даже подсушивается, если влажность зерна выше равновесной влажности, определяемой параметрами воздуха. Если такой процесс происходит, то воздух постепенно насыщается влагой и, в конце концов, может наступить конденсация влаги при выходе воздуха из слоя зерна. Возможность конденсации определяется параметрами зерна: его влажностью и температурой, а также высотой слоя и параметрами воздуха: его влагосодержанием, температурой и скоростью фильтрации. Процесс конденсации влаги опасен, так как приводит к порче зерна.

Проблема теоретического описания процессов тепло- и массопереноса при активном вентилировании зерна в металлических силосах большой емкости актуальна и направлена на энергоресурсосбережение и сохранение качества зерна.

Рассмотрим процесс охлаждения неподвижного слоя зерна, продуваемого воздухом (рисунок 5).

Представленная ниже математическая модель для описания рассматриваемого процесса переноса влаги при активном вентилировании для в

МСБЕ была взята за основу [33, 34]. В её основе лежат дифференциальные уравнения, описывающие изменение температуры t_1 воздуха в слое зерна, движущегося со скоростью u , изменение температуры зерна t_2 , влагосодержания воздуха x (кг влаги/кг сухого воздуха) и влагосодержание зерна w по высоте и во времени. Они получаются из записи тепловых и материальных балансов для элементарного слоя высотой dz (рисунок 5).

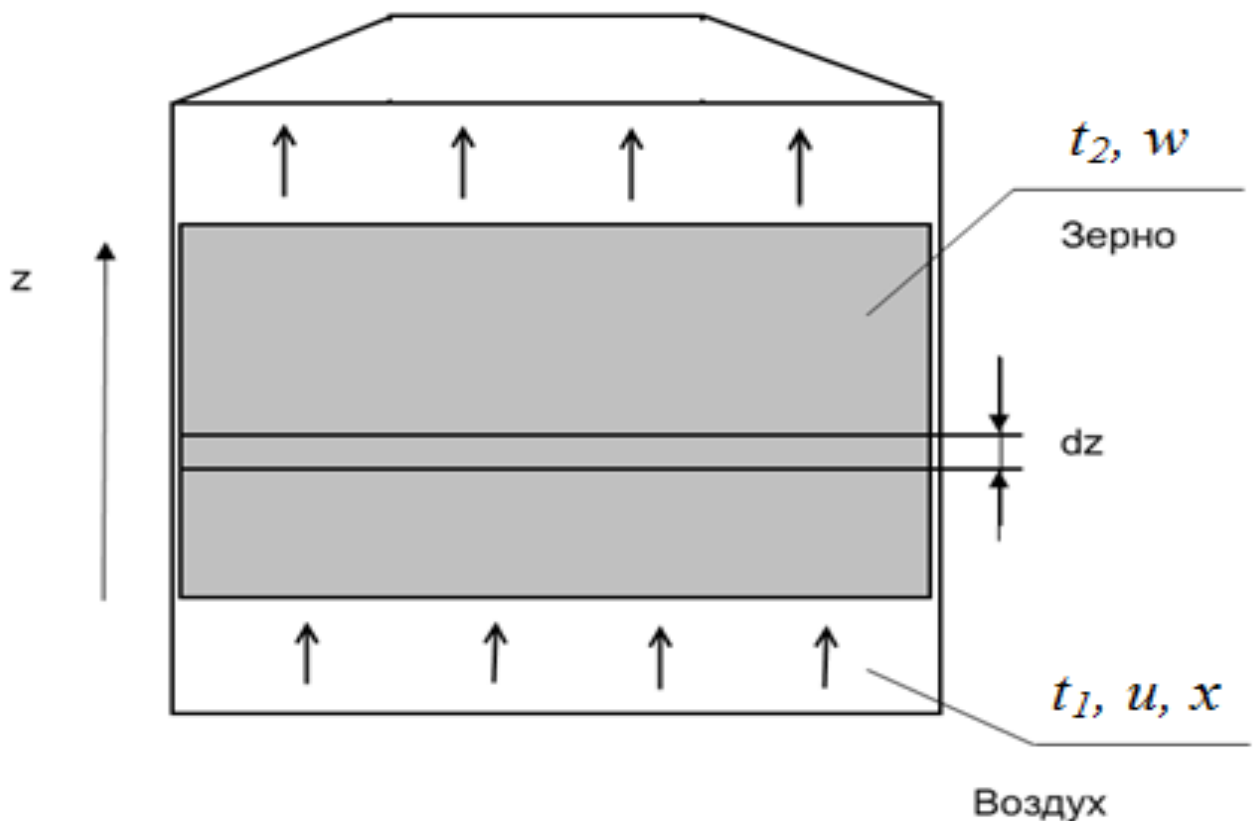


Рисунок 5 - Физическая модель процесса влагопереноса при активном вентилировании в МСБЕ

Основные допущения математической модели:

1. Движение воздуха в слое зерна одномерное, т.е. параметры потока (температура и влагосодержание воздуха) и параметры зерна (температура и влагосодержание) в слое изменяются только по времени и по вертикальной координате z .

2. Передача теплоты и массы влаги в слое за счет теплопроводности, молекулярной диффузии и капиллярных сил в продольном направлении невелика

по сравнению с их конвективным переносом.

3. Выполняется аналогия между процессами переноса влаги и теплоты в потоке воздуха, т.е. справедливо соотношение Льюиса, связывающее коэффициент массоотдачи, отнесенный к влагосодержанию, коэффициент теплоотдачи и теплоемкость влажного воздуха:

$$\beta_x = \frac{\alpha}{c_{p1}} \quad (3)$$

При записи модели используются следующие условные обозначения:
 z – вертикальная координата; $[\tau]_{\text{ср}}$ – время; $[\alpha]_{\text{ср}}$ – коэффициент теплоотдачи между воздухом и поверхностью зерен; u – скорость движения воздуха;

p_1, p_2^- – плотность воздуха и насыпная плотность слоя зерна, кг/м³;

t_1, t_2 – температуры воздуха и зерна в слое, °С;

x, w – влагосодержание воздуха и зерна, кг/м³;

C_{p1}, C_{p2} – теплоемкость воздуха и зерна, Дж/К;

r – теплота парообразования воды, Дж/кг;

ε – порозность слоя;

$d_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный диаметр зерна, м;

f – удельная поверхность зерна в единице объема, м²/м³

В модель введены также коэффициенты теплопередачи (так, как это делают в регенеративных теплообменниках):

$$K = \frac{1}{1/\alpha + d_{\text{ЭКВ}}/2 \times \alpha} \quad (4)$$

и массопередачи, (аналогично):

$$K_D = \frac{1}{1/\beta + d_{\text{ЭКВ}}/2 \times D} = \frac{1}{c_{p1}/\alpha + d_{\text{ЭКВ}}/2 \times D} \quad (5)$$

с учетом внутреннего термического и внутреннего диффузионного сопротивления зерна.

Здесь – λ и D – коэффициенты теплопроводности и диффузии влаги в зерне, а $d_{\text{ЭКВ}}/(2 \times \alpha)$ и $d_{\text{ЭКВ}}/(2 \times D)$ – внутреннее термическое и внутреннее диффузионное сопротивление зерна.

Трудность тогда заключается в определении коэффициента диффузии D ,

который представляет собой сложную функцию. Изменение коэффициентов диффузии влаги и массоотдачи в слое зерна и в единичной зерновке, а также теплофизические характеристики слоя рассмотрены в [35]. Для их определения требуется привлечение экспериментальных данных [35].

Математическая модель будет иметь следующий вид.

Уравнения переноса тепла и массы:

$$\frac{dt_1}{dt_2} = \frac{K}{p_1 \times u \times C_{p1} \times \varepsilon} \times (t_2 - t_1) \times f \quad (6)$$

$$\frac{dx}{dz} = -\frac{K_D}{p_1 \times u \times \varepsilon} \times (x_2 - x_1) \times f \quad (7)$$

$$\frac{dt_2}{d\tau} = \frac{K}{p_2 \times C_{p2}} \times \left[(t_2 - t_1) + \frac{r}{C_{p1}} \times (x_2 - x_1) \right] \times f \quad (8)$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{K_p}{p_2} \times (x_2 - x_1) \times f \quad (9)$$

Данная система уравнений должна быть дополнена критериальным соотношением для вычисления коэффициента теплоотдачи в слое засыпки.

$$\alpha = \frac{Nu \times \lambda}{d_{\text{экв}}}; \quad Nu = f(Re, Pr) \quad (10)$$

Начальные и граничные условия:

В начальный момент времени температура и влагосодержание во всем слое зерна равны их начальным значениям.

$$\tau=0, \quad t_2(z)=t_{20}(z), \quad w(z)=w_0(z) \quad (11)$$

Во входном сечении температура и влагосодержание потока воздуха равны их начальным значениям. Они могут изменяться во времени при изменении погодных условий.

$$z=0, \quad t_1(\tau)=t_{10}(\tau), \quad x(\tau)=x_0(\tau) \quad (12)$$

Дополнительной важной особенностью данной математической модели является то обстоятельство, что она должна учитывать начальный этап движения воздуха в слое, который имеет очень важное значение в данном процессе. При наблюдаемой скорости движения воздуха от 0,01 до 0,1 м/с и высоте слоя до 20 м

время движения воздуха через слой может достигать 900 с или 15 мин. При активном вентилировании весь воздух, который находился в слое до его начала придет в движение, однако нас интересует не движение воздуха, ранее находившегося в пространстве между зернами и бывшего в состоянии термодинамического равновесия с ним, а воздуха, который подается вентилятором и имеет другие параметры. Фронт этого воздуха постепенно поднимается от нижнего сечения к верхнему, постепенно насыщаясь влагой и меняя температуру. Чтобы учесть этот процесс необходимо задавать распределение скорости движения воздуха в виде ступенчатой функции вида:

$$u = u_0, \text{ если } z \leq u_0 \times \tau; \quad u = 0, \text{ если } z > u_0 \times \tau. \quad (13)$$

Предварительный анализ математической модели показывает, что поступающий холодный сухой воздух в слое зерна с равномерным распределением температуры и влажности может только увлажняться и нагреваться. Конденсация влаги при этом происходить не может. Она возможна только при неравномерном распределении, когда температура вверху слоя ниже, чем внизу.

Такая неравномерность может быть вызвана двумя причинами [SEP]:

- 1) охлаждением верхней части (крыши) силоса атмосферным воздухом при холодной погоде и, как следствие, охлаждением верхнего слоя зерна [SEP];
- 2) выделением теплоты внутри слоя за счет биохимических процессов в зерне [SEP].

Решение приведенной выше системы уравнений позволит определить режимные параметры процесса, при которых будут соблюдаться условия хранения зерна, обеспечивающие его наилучшее качество.

2.4 Схема вентилирования зерна в металлическом силосе

Металлические силосы большой емкости (2 000, 3 000, 5 000 и 10 000 тонн) имеют схожие геометрические размеры и соотношения, но комплектуются

вентиляторами с различными характеристиками в диапазоне от 1 до 12 кПа. Силосы имеют разные конструкции воздухоподводящих каналов, воздухораспределительных решет и устройств, отводящих воздух из силоса [36]. Из-за наличия в металлических силосах утечек воздуха до поступления в зерновую массу, замеры расхода воздуха, нагнетаемого вентиляторами, не являются точными и не пригодны для определения объемов удельных подач [37]. Исходя из этого можно сказать, что сейчас нет возможности обеспечить и контролировать подачу нормативного объема воздуха в зерновую массу. Не редки случаи, когда вентилирование зерновой массы минимальными подачами воздуха приводило к ухудшению качества зерна, хранящегося в металлическом силосе [110,38].

В связи с этим была разработана и апробирована в производственных условиях методика наладки установок для вентилирования зерна в металлических силосах с обеспечением подачи нормативного объема воздуха. Известно, что сопротивление зернового слоя движению воздушному потоку является функцией двух переменных - толщины слоя и скорости фильтрации, и описывается формулой Рамзина [110].

$$\Delta P = 9.81 \times A \times H \times v^n, \quad (14)$$

где ΔP – перепад давления в слое зерна, Па;

A, n – постоянные коэффициенты, зависящие от размеров, формы и степени уплотнения зерен в насыпи (см. табл. 3);

H – толщина слоя, мм; в нашем случае $H = 3$ метра;

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

Таблица 3 - Значения коэффициентов A и n для различных культур

Культура	A	n	Культура	A	n
Пшеница	1,41	1,43	Кукуруза	0,67	1,55

Культура	A	n	Культура	A	n
Рожь	1,76	1,41	Горох	0,82	1,51
Овес	1,64	1,42	Гречиха	1,76	1,41
Ячмень	1,44	1,43	Просо	2,34	1,38

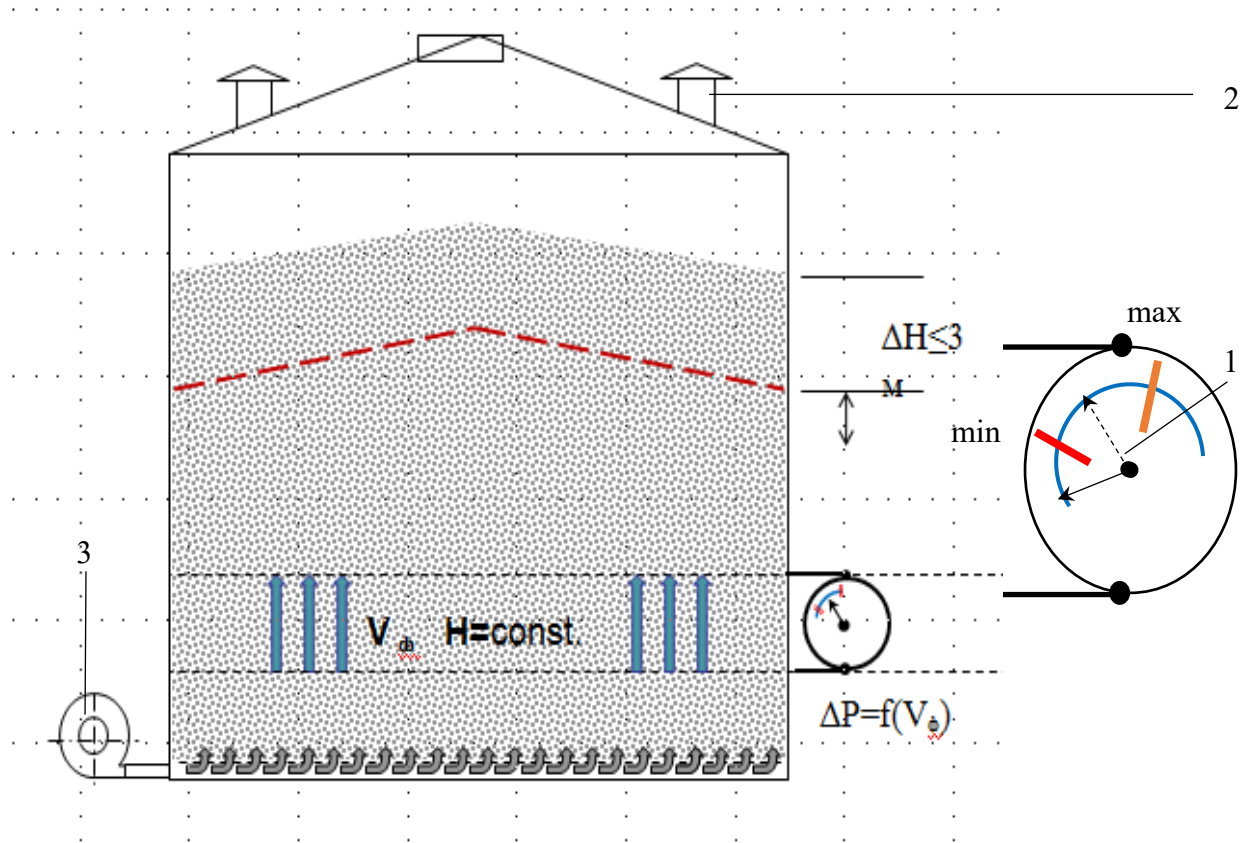
Для обеспечения и контролирования подачи нормативного объема воздуха в зерновую массу предлагается оснастить силос промышленным дифманометром, например, ДНМП, с помощью которого измеряют перепад давления внутри силоса в слое фиксированной толщиной, три метра, тогда перепад давления для этого слоя будет функцией одной переменной - скорости фильтрации [110].

Исходя из массы вентилируемого зерна, площади сечения силоса и нормативной удельной подачи воздуха вычисляют минимальное значение скорости фильтрации. Затем по формуле, приведенной выше, вычисляют минимально-допустимый перепад давления, значение которого отмечают на циферблате дифманометра (рисунок 6) [110].

Включают вентилятор, если показания дифманометра будут меньше отметки min на циферблате, то необходимо уменьшать массу вентилируемого зерна до тех пор, пока показания не совпадут с отметкой, лежащей в диапазоне min - max. Только тогда будет обеспечена нормативная подача воздуха в зерновую массу, зерно сохранено от развития плесеней хранения и эффективно проведено охлаждения зерна. При меньших температурах зерно имеет более длительные сроки хранения, так пшеница при температуре 10 °С с влажностью от 11 % до 15 % может храниться до двенадцати месяцев без изменения показателей качества [110, 39].

При температуре 20 °С без изменения качества может храниться 12 месяцев только с влажностью не более 12 %. В зерне влажностью от 13 до 14 % после трех месяцев хранения наблюдается ухудшение некоторых показателей (посевных

свойств, уменьшение активности дегидрогеназ, увеличение кислотного числа жира), а к девяти месяцам интенсивность дыхания увеличивается приблизительно в два раза [110, 40].



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

Рисунок 6 - Схема вентилирования зерна в металлическом силосе

2.5 Методика проведения работ по вентилированию зерна в металлических силосах большой емкости

Металлический силос большой емкости, вместимостью 10 000 тонн имеет диаметр 28,3 м, высоту вертикальной стенки 17,2 м при общей высоте 25,1 м.

Увеличение сроков хранения в МСБЕ невозможно без применения принудительного вентилирования зерна [110, 41].

Для вентилирования зерна в силосе вместимостью 10 000 тонн используется четыре одинаковых вентилятора производства Соединенных Штатов Америки марки FAN, C, 10H3P, 380V, 50H, L/C. Каждый из вентиляторов подает воздух в отдельную систему воздухораспределительных каналов, расположенных в 1/4 части площади силоса, в соответствии с рисунком 7 [110].

Исследования аэродинамических характеристик зерна в силосе с таким расположением воздухораспределительных каналов позволяет определить нижнюю границу слоя зерна, в котором следует измерять перепад давления для определения расхода воздуха [42].

Норматив для определения объема нагнетаемого воздуха в зависимости от массы зерна не учитывает скорости прохождения воздуха [43]. Минимально допустимая подача воздуха в МСБЕ принимается равной $10 \text{ м}^3/\text{ч} \times \text{т}$ [110].

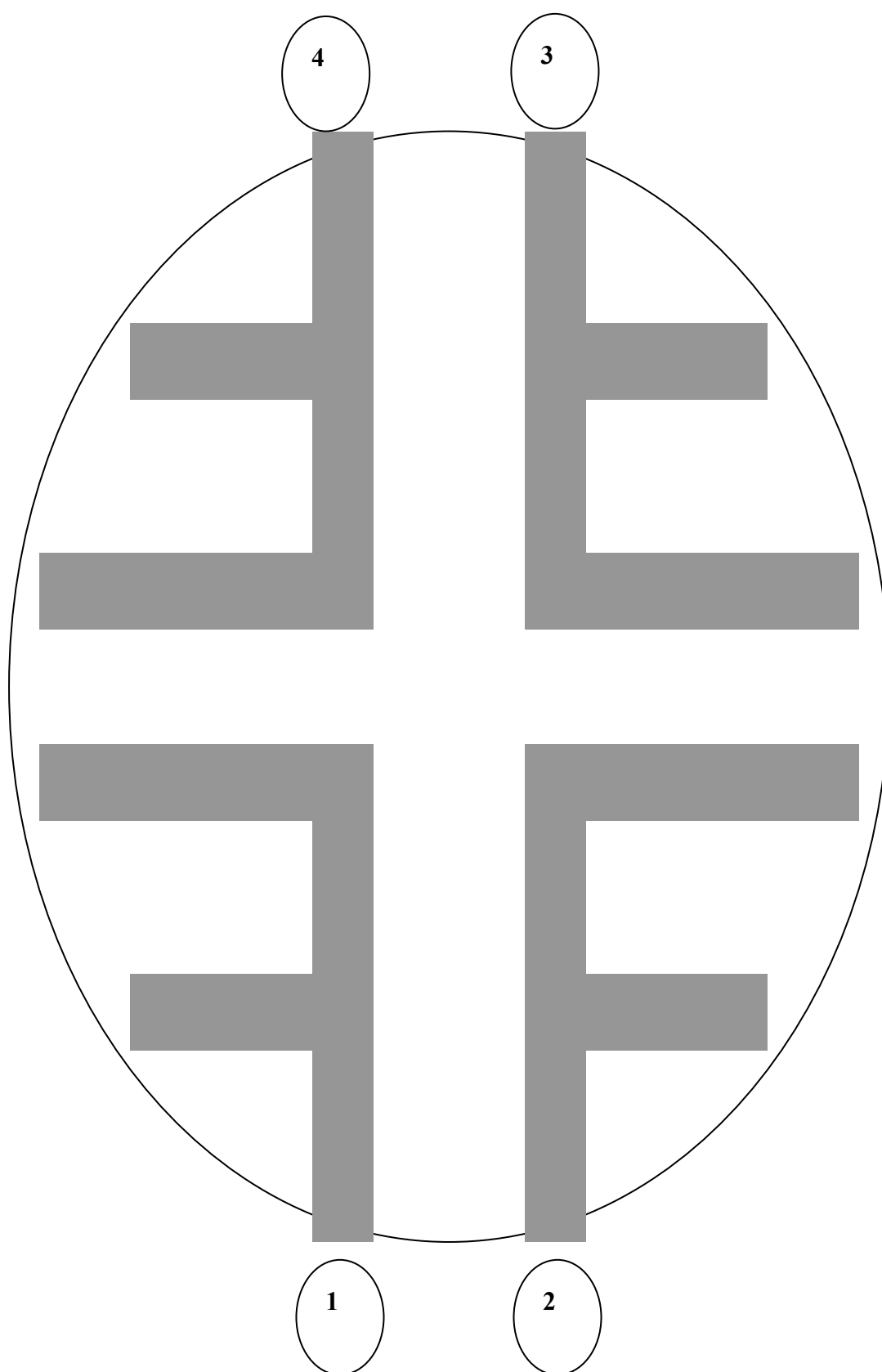


Рисунок 7 - Схема расположения воздухораспределительных каналов в силосе вместимостью 10 000 тонн

При проведении экспериментальных исследований были измерены следующие показатели: давление и перепад давления воздуха в зерновой массе и расходы воздуха, нагнетаемые вентиляторами. Перепады давления воздуха измеряли на разных уровнях по высоте МСБЕ в диаметрально противоположных направлениях. Расходы воздуха измеряли в воздуховодах, соединяющих вентиляторы с силосом [110].

Для измерения давления и перепада давления воздуха внутри силоса использовали дифманометр-напоромер ДНМП-100-М1-600Па-2,5-УЗ. Предел измерения данного прибора 600 Па, диаметр циферблата 100 мм, класс точности – 2,5. Прибор устойчив к воздействию температуры окружающего воздуха от минус 50 до 60 °С и относительной влажности до 98 % при температуре 35 °С. Расход воздуха измеряли по общепринятой методике с использованием пневмометрической трубки Пито и цифрового дифманометра. Погрешность измерения составляет не более 5 % [110].

Места контрольного отбора давлений воздуха внутри силоса вместимостью 10 000 тонн осуществляли при помощи штуцеров, расположенных на трех уровнях по высоте (рисунок 8). На первом уровне – высота один метр от воздухораспределительной решетки; на втором уровне – два метра от воздухораспределительной решетки; на третьем уровне - четыре метра от воздухораспределительной решетки [110].

На каждом из уровней было установлено по четыре штуцера на отметках 0°, 90°, 180° и 360°.

Перепады давления измеряли между штуцерами первого и третьего уровней, в слое толщиной три метра, и между штуцерами второго и третьего уровней, в слое толщиной два метра. Эти измерения проводили одновременно при всех четырех, затем при трех, при двух и при одном включенном вентиляторах. Отключением вентиляторов изменялись режимы вентилирования и места подачи воздуха в зерновую массу [110].

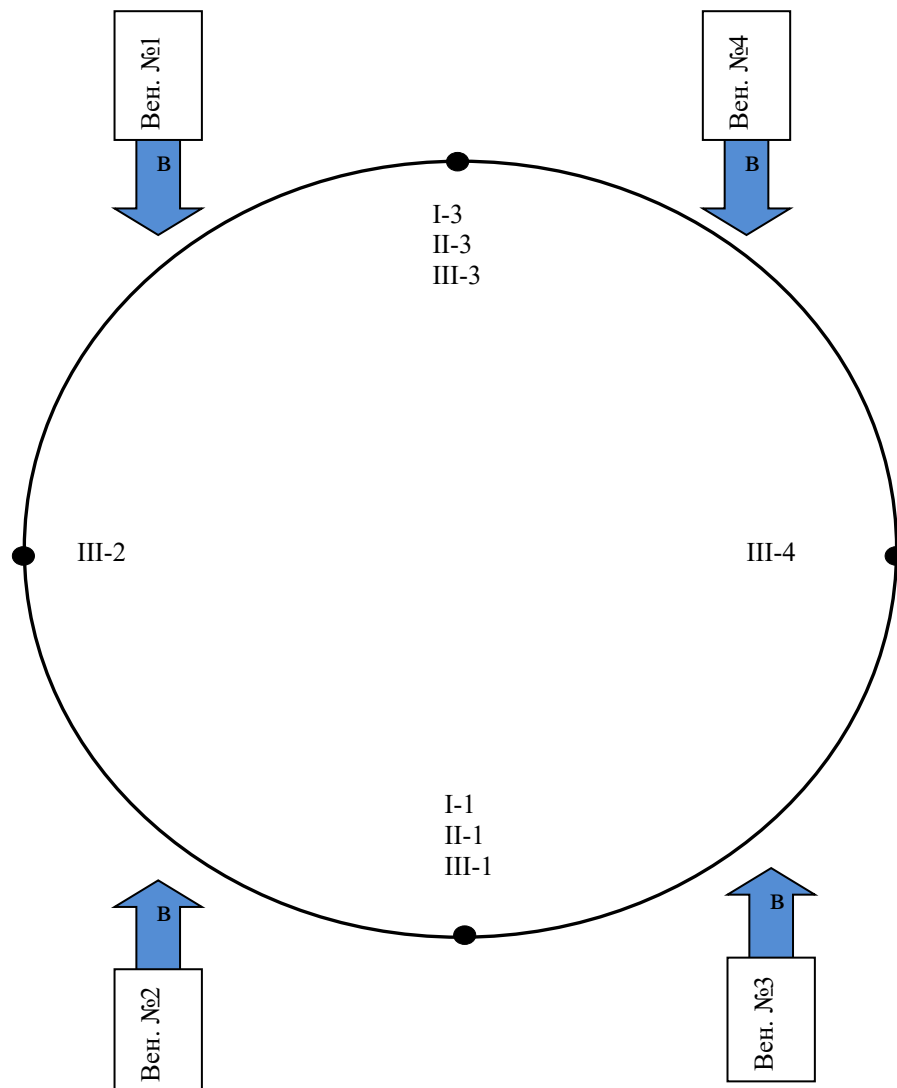
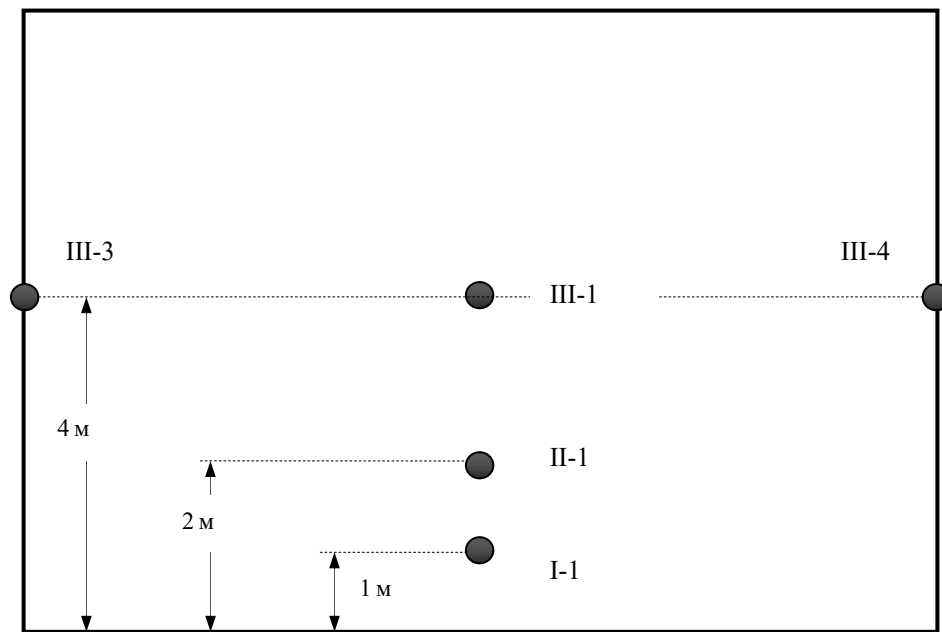


Рисунок 8 - Схема расположения точек замера на стенке силоса

В каждом режиме вентилирования в слое толщиной три или два метра было произведено восемь измерений перепадов давления воздуха. Те режимы, в которых разность между максимальным и минимальным значением перепада давления не превышает 15 Па, относили к режимам с равномерным распределением давления по сечению силоса. Ограничение в 15 Па принято исходя из класса точности измерительного прибора – цифрового дифференциального манометра ДМЦ – 010. Если расхождения значений менее 15 Па, то измеренные значения перепадов можно считать не отличающимися друг от друга. Для режимов с равномерным распределением давления вычисляли среднее значение перепада давления, которое использовали в дальнейших вычислениях скорости фильтрации воздуха через зерновой слой.

Для вычисления расхода воздуха, проходящего через зерновой слой внутри силоса, использовали известную формулу Рамзина [110].

Скорость фильтрации вычисляли по формуле:

$$v = \sqrt[n]{\frac{\Delta P \times A \times H}{9,81}} \quad (15)$$

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

$$Q_z = 3600 \times v \times F, \quad (16)$$

где Q_z – 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 [112].

$$\Delta Q = Q_v - Q_z, \quad (17)$$

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

Удельные затраты энергии определяли по следующей формуле [112].

$$\Delta g = \frac{N}{M}, \quad (18)$$

где N – мощность эл. двигателей вентиляторов, кВт;

M – масса зерна вентилируемого в силосе, т [112].

2.6 Методики контроля, оценки и мониторинга установок для вентилирования зерна в металлических силосах большой емкости с обеспечением подачи нормативного объема воздуха

1. Методика получения данных о переходных процессах изменения температуры зерна по слоям зерновой массы при включении системы активного вентилирования и обработки этих данных с целью получения соответствующих динамических моделей [112].

Контроль температур ведется непрерывно в режиме эксплуатации объекта посредством штатно установленных в силосе цифровых термоподвесок.

2. Методика оценки критических изменений граничных условий при хранении зерна в металлическом силосе [112].

В металлическом силосе наиболее неблагоприятные условия хранения создаются в верхней части зерновой насыпи [44, 112].

Оценка условий возникновения рисков конденсационного увлажнения зерна в металлическом силосе проводится методом расчетного моделирования [45, 112].

Мониторинг гигро-термического состояния внутренней поверхности кровли силоса проводится в режиме нормальной эксплуатации силоса при наступлении характерных условий конденсатообразования.

3. Методика разработки корректирующих воздействий [112].

Корректирующие воздействия разрабатываются для применения с целью предупреждения рисков конденсационного увлажнения зерна [46]. Среди них имеются конструкторские предложения для изготовителей силосов, мероприятия пассивного противодействия конденсационным процессам и мероприятия активного воздействия.

2.7 Изотермы сорбции

Графическое представление экспериментальной зависимости объема сорбированной воды (в установившемся, равновесном, стационарном состоянии) от величины относительного давления p/p_0 ее паров, при постоянной температуре называется изотермой сорбции (десорбции). Где p – парциальное давление паров связанной воды, p_0 – давление паров свободной воды. В качестве оценки количества адсорбированного вещества и оценки [113] адсорбированной способности сорбента принимают количество адсорбированного вещества, приходящее на единицу массы адсорбента. Для получения достоверных данных этой характеристики замеры необходимо проводить после определенной выдержки продукта в термостатированных условиях, для выравнивания концентрации сорбата по всему объему сорбента. Следует отметить, что кривые сорбции-десорбции не совпадают. Имеет место сорбционный гистерезис (аналогичное явление имеет место в механических системах при нагружении-разгрузке из-за необратимых энергетических потерь). По оси влагосодержания изотерма десорбции расположена выше изотермы сорбции [113].

На сегодняшний день существует несколько вариантов математического описания изотермы, направленные на формализацию понимания сложных физико-химических процессов влагообмена зерна с окружающей средой. Кроме того, наличие уравнений, имеющих убедительное обоснование и хорошее совпадение с экспериментом, позволяют реализовать экстраполяцию зависимостей в область высоких значений p/p_0 , когда эксперимент значительно осложнен или невозможен [113].

Основные уравнениями изотерм сорбции/десорбции воды зерном являются следующие:

$$\text{Уравнение Бредли} \quad \ln \ln \left(\frac{p_0}{p} \right) = K_1 + K_2 \times V, \quad (19)$$

$$\text{Уравнение Де – Бура и Цвиккера} \quad \ln \ln \left(\frac{p_0}{p} \right) = K_1 + K_2 \times \frac{V}{V_m}, \quad (20)$$

Уравнение Джуры – Гаркинса $\ln\left(\frac{p_0}{p}\right) = K_1 + \frac{K_2}{V^2},$ (21)

Уравнение Френкеля – Хелси – Хилла $\ln\left(\frac{p_0}{p}\right) = \frac{K_1}{(V/V_m)^{K_2}},$ (22)

Уравнение Смита $\ln\left(1 - \frac{p_0}{p}\right) = K_1 + K_2 \times V,$ (23)

Уравнение Браунаэра

–Эмета – Теллера (БЭТ) $\left(\frac{p}{V \times (p - p_0)}\right) = \frac{K_1}{V_m} + \frac{K_2}{V_m} \times \frac{p}{p_0},$ (24)

Уравнение Гендерсона $\ln\ln\left(1 - \frac{p_0}{p}\right) = K_1 + K_2 \times \ln V,$ (25)

Уравнение Егорова $\left(1 - \frac{p}{p_0}\right) = K_1 \exp(-K_2 \times V^2),$ (26)

где V – объем сорбированной воды;

K_1, K_2 – коэффициенты, зависящие от параметров воздуха, культуры зерна и прочих факторов.

Уравнение (19-25) определяет изотерму для значений $p/p_0 \leq 0,4$ [113].

Уравнение (26) может использоваться для диапазона $0,1 \leq p/p_0 \leq 0,75$.

Примеры изотерм сорбции приведены на рисунке 9 и рисунке 10.

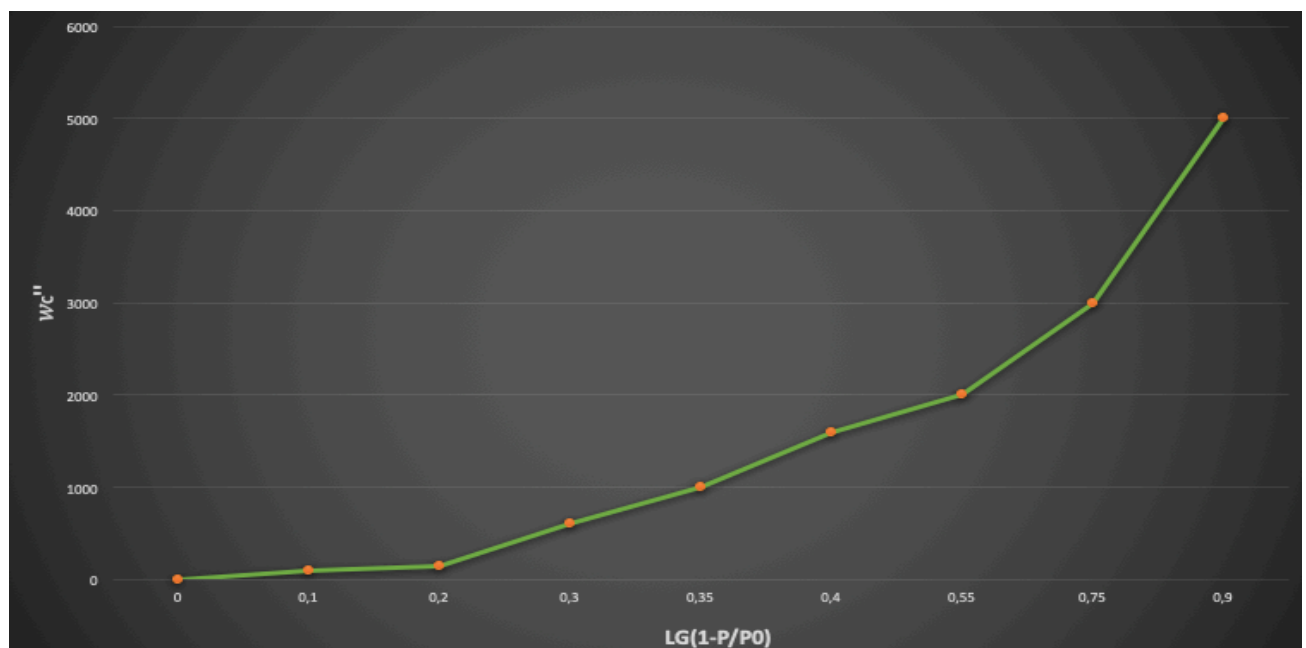


Рисунок 9 – Изотермы сорбции зерна пшеницы при температуре 20 °C, построенная по уравнению Гендерсона [113]

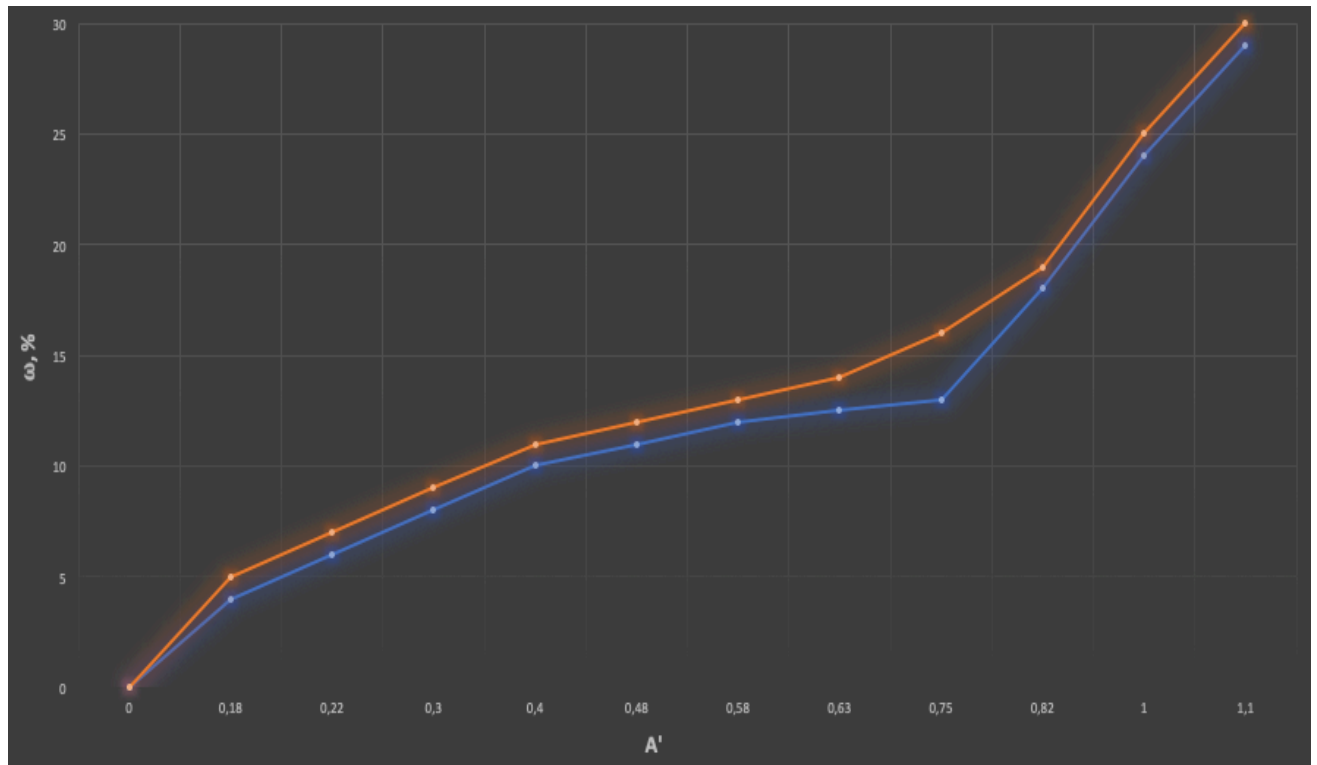


Рисунок 10 – Усредненные уравнения сорбции и десорбции воды зерном пшеницы в прямолинейной модификации уравнения Егорова, где ω - влажность зерна

$$A' = \left(\lg \frac{1}{1 - \frac{p}{p_0}} \right)^{1/2}$$

Линеаризация осуществляется на основе следующего

$$\ln \ln \left(1 - \frac{p}{p_0} \right) = a + b\omega^2, \quad (27)$$

где a и b – переменные коэффициенты;

ω - влажность зерна.

Для упрощения натуральный логарифм можно заменить на десятичный.

Тогда уравнение станет вида:

$$\omega = m + n \times \left(\lg \frac{1}{1 - \frac{p}{p_0}} \right)^{1/2} \quad \text{или} \quad \omega = m + nA' \quad (28)$$

Как видно из рисунка 10 каждая изотерма распадается на три прямолинейных участка, что указывает на существенные различия сорбционного процесса на каждом из этих участков. Граничные точки соответствуют:

- первая $p/p_0 = 0,20$, влажность, по изотерме сорбции – 8,5 %, по изотерме десорбции – 8,9 %;

- вторая точка для сорбции находится при $p/p_0 = 0,70$ и влажности 14,5 %, для десорбции $p/p_0 = 0,78$ и влажности 18,2 %. Таким образом, при температуре 20 °С, влажности от 8,5 до 9 % и от 14,5 до 18,0 % следует ожидать заметных изменений свойств зерна.

Проведенные опыты [113] подтверждают данное предположение. Так, при влажности от 8 до 9 % зерно почти не проявляет пластических свойств, только упругие. Если влажность превышает 14,5 %, резко интенсифицируется дыхание зерна. Во второй критической области наблюдается значительное изменение стекловидности, плотности и прочих показателей. Существенно преобразуются и технологические свойства зерна [113].

Таким образом, конкретные значения коэффициентов уравнения (28) зависят от влажности (три участка изотермы), температуры и культуры. Для их определения необходимо использовать опытные данные, полученные в строгих физических условиях сорбции или десорбции.

В настоящее время величина критической влажности определена для зерна пшеницы, ее значения соответствуют равновесной влажности [113].

Выводы по второй главе

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.

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 [110].

Определена величина критической влажности для зерна пшеницы, соответствующая значению равновесной влажности.

ГЛАВА 3. Результаты экспериментальных исследований

3.1 Управление относительной влажностью воздуха межзернового пространства и температурой зерновой массы при различных скоростях фильтрации

Для фиксации относительной влажности воздуха межзернового пространства и температуры использовали сертифицированные, серийно выпускаемые автономные регистраторы данных, имеющие следующие габариты [70]: $0,1 \times 0,025 \times 0,023$ м. Эти регистраторы одновременно измеряют и записывают температуру и относительную влажность воздуха в месте своего расположения [56]. Периодичность записи регулируется от [56] двух секунд до двадцати часов. В наших исследованиях запись параметров воздуха производили каждые 60 минут, то есть в течение суток осуществляли 24 измерения. Автономные регистраторы устанавливались в зерновую массу, как показано на рисунке 9. ТВ2 и ТВ6 записывали параметры с пограничных областей: в местах соприкосновения зерновой массы и металлической решетки, в месте контакта зерновой массы с воздухом. Все приборы были установлены на удалении 0,25 м друг от друга по вертикали и находились строго параллельно друг другу [70].

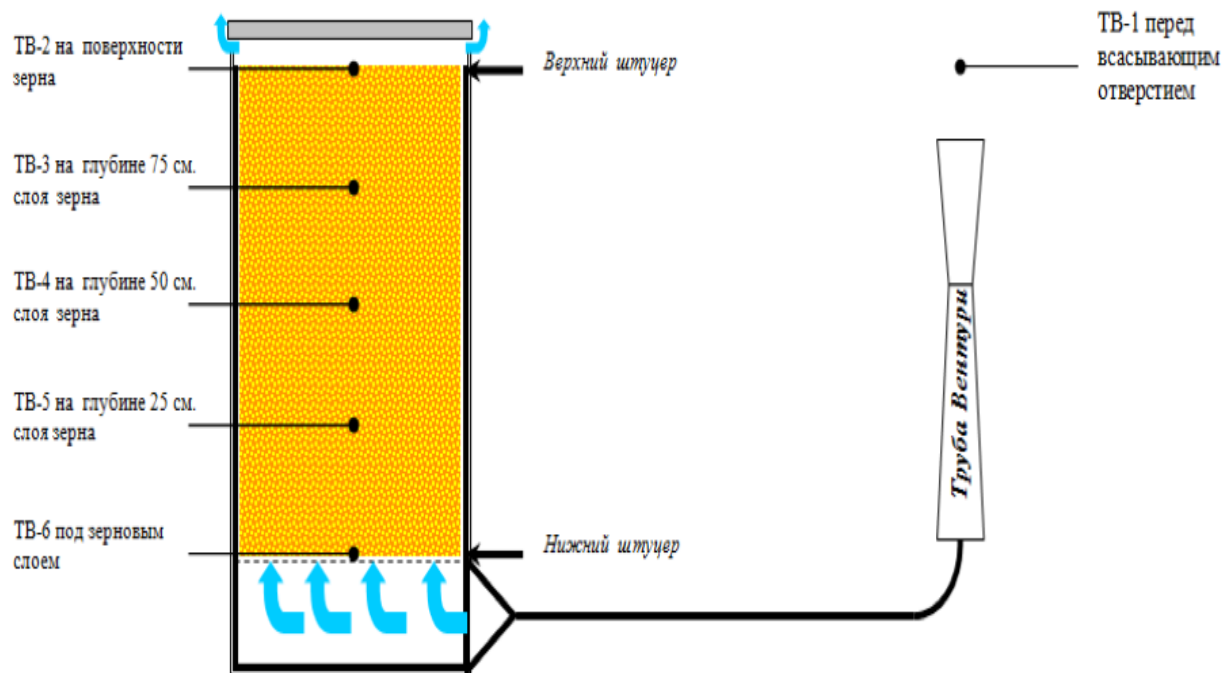
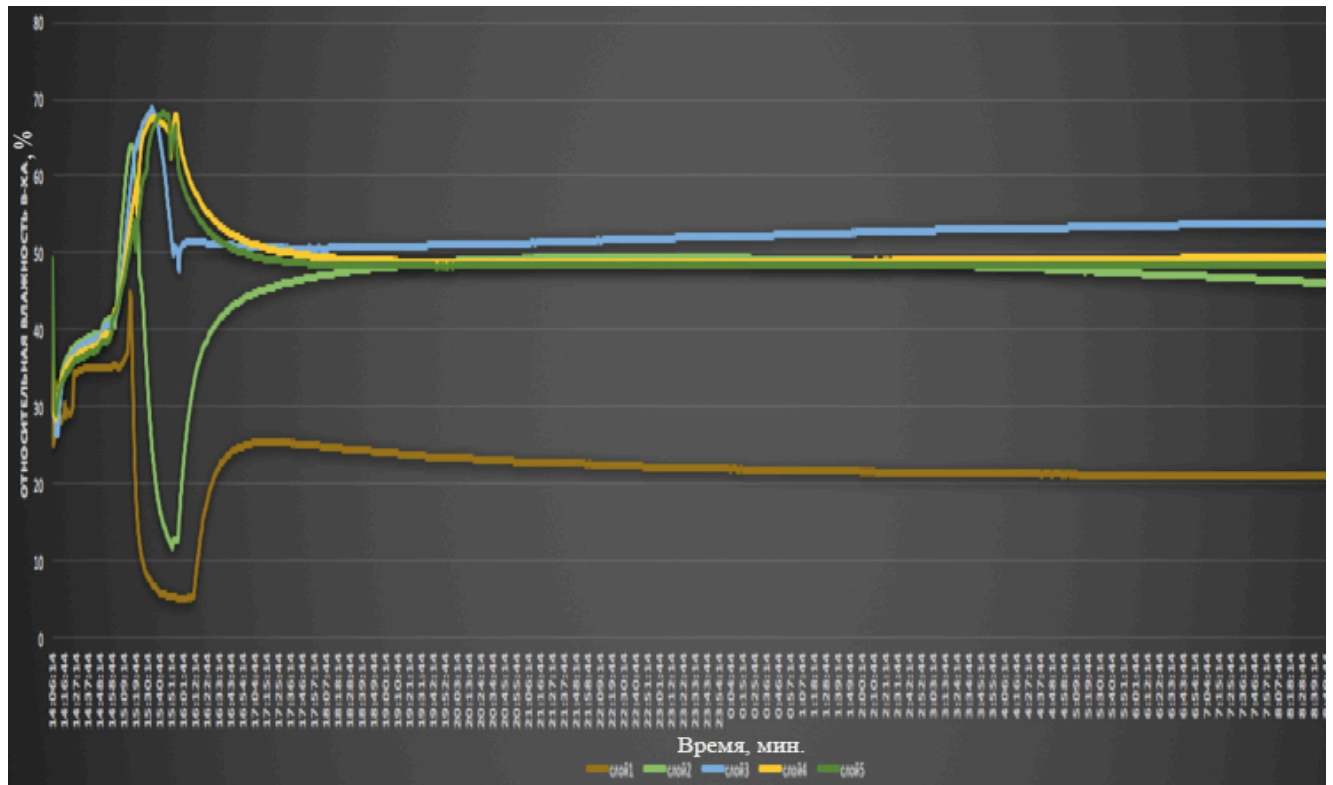


Рисунок 11 - Установка автономных регистраторов

Для увлажнения зерновой массы перед воздухозаборником (рисунок 11) 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 [47]. При расходе воздуха $410 \text{ м}^3/\text{ч}$ и, как следствие, высоких скоростях прохождения воздуха через зерновую массу $0,34 \text{ м/с}$, наблюдается вынос влаги из зерна (рис.12).

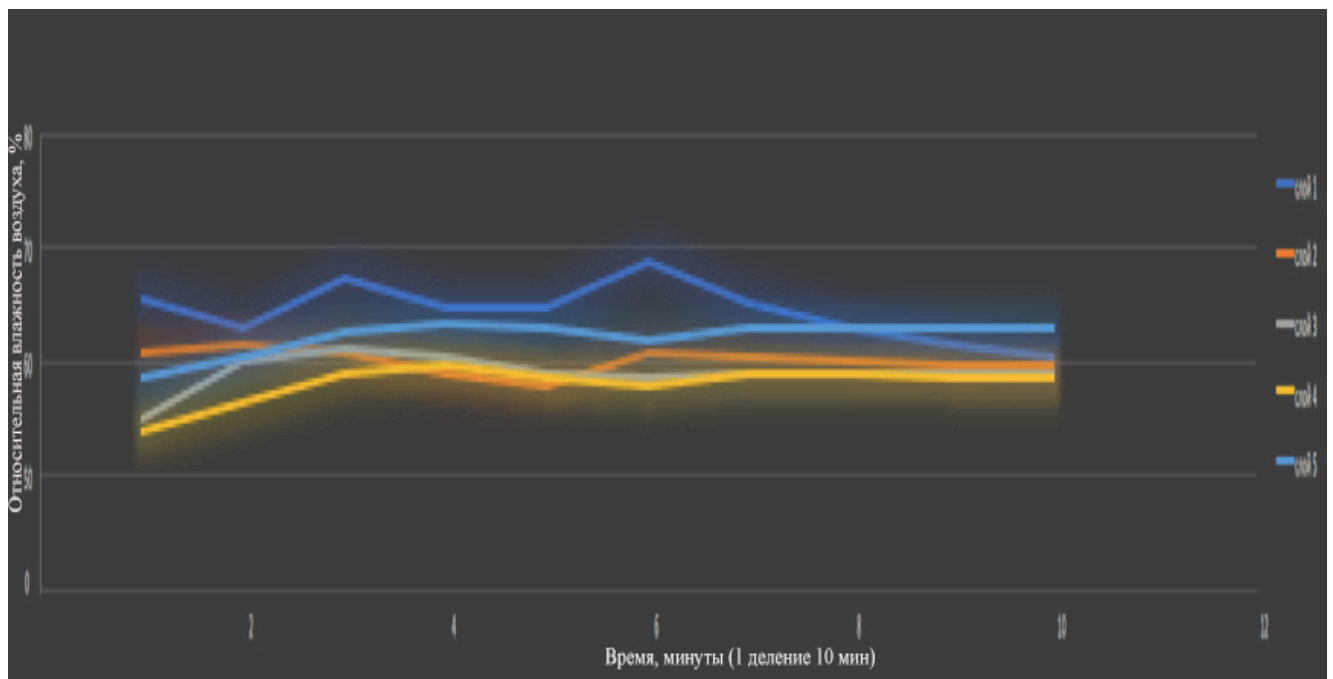


«слой 1» – слой зерна, соприкасающийся с вентиляционной решеткой; «слой 2» – слой зерна, находящийся на 0,25 м над вентиляционной решеткой; «слой 3» – слой зерна, находящийся на 0,5 м над вентиляционной решеткой; «слой 4» – слой зерна, находящийся на 0,75 м над вентиляционной решеткой; «слой 5» – слой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

Рисунок 12 - Увлажнение зерновой массы по слоям

Относительная влажность воздуха в межзерновом пространстве составляла 50 %, подаваемый воздух имел относительную влажность 80 %. Через пять минут в средних и верхних слоях (2-5, рисунок 12) было зафиксировано увеличение относительной влажности до 70 %, но уже через 20 минут относительная влажность воздуха в межзерновом пространстве стала уменьшаться. Увлажнение зерна не произошло, так как скорость прохождения воздуха через зерновую массу была высокой, и влага не смогла остаться на поверхности зерна. Взятые пробы зерна из разных слоев зерновой массы и определение их влажности в лаборатории 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.

Чтобы избежать указанного выше эффекта, необходимо правильно подобрать режим подачи воздуха [48]. При проведении эксперимента на стендовой установке расход воздуха составлял $75 \text{ м}^3/\text{час}$, а скорость фильтрации воздуха в зерновой массе $0,033 \text{ м/с}$, 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 %, а разброс относительной влажности по слоям составил менее 5 % (рисунок 13).



«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 13 - Увлажнение зерновой массы по слоям при указанной скорости фильтрации воздуха

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.

Минимально допустимая подача воздуха в металлическом силосе принята равной $10 \text{ м}^3/\text{ч} \times \text{т}$. Для оценки эффективности применения активного

вентиляции более целесообразно использовать скорость фильтрации, так как на расход воздуха влияет большое число параметров: утечки в металлическом силосе, сопротивление решетки, расположение воздухораспределительных каналов, мощность вентиляторов [49]. Исходя из этого даже соблюдение норматива подачи воздуха на уровне $10 \text{ м}^3/\text{ч}\times\text{т}$ не гарантирует сохранность зерна. При пересчете на массу хранимого зерна и габариты современного металлического силоса, собранного по технологии производителя скорость фильтрации проходящего воздуха через зерновую массу при использовании системы активного вентиляции в нем составляет от 0,025 до 0,05 м/с. Для определения скорости фильтрации предлагается оснастить силос промышленным дифманометром, например, марки ДНМП, с помощью которого измеряют перепад давления внутри силоса в слое фиксированной толщиной, три метра [110]. Тогда перепад давления для этого слоя будет функцией одной переменной – скорости фильтрации [110].

На экспериментальной установке были подробно рассмотрены режимы подачи воздуха, при которых скорость фильтрации находилась в диапазоне от 0,025 до 0,05 м/с, а также выходила за их пределы.

Таблица 4 – Охлаждение зерновой массы на экспериментальной установке.

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

На экспериментальной установке при применении активного вентилирования с помощью дроссельной заслонки перепад давления на трубе

Вентури был задан 97 Па при замере дифманометром, расход воздуха составил 42 м³/ч, скорость фильтрации составила 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 %. Верхняя крышка установки и стенки остались сухими, можно сделать выводы, что влага, перенесенная воздушным потоком от нижних к верхним слоям зерновой массы, была удалена из системы. После остановки вентилирования зерновая масса была оставлена на 1800 минут, в течении этого времени температура зерновой массы составила 12,5°С, относительная влажность воздуха межзернового пространства 47 %, а влажность зерна 13,3 % (таблица 4).

Обработанные данные по слоям представлены на рисунке 14, как видно из него при заданной скорости фильтрации прохождения воздуха через зерновую массу 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, удаляется через воздухоотводные каналы [70]. Так как относительная влажность подаваемого воздуха была ниже относительной влажности воздуха межзернового пространства, внесение влаги из внешней среды не произошло. Стоит отметить, что данный режим является оптимальным, так как при нем минимальны электрические затраты на активное вентилирование, а охлаждение и хранение зерна соответствует необходимым нормативам инструкции по хранению зерна [70].

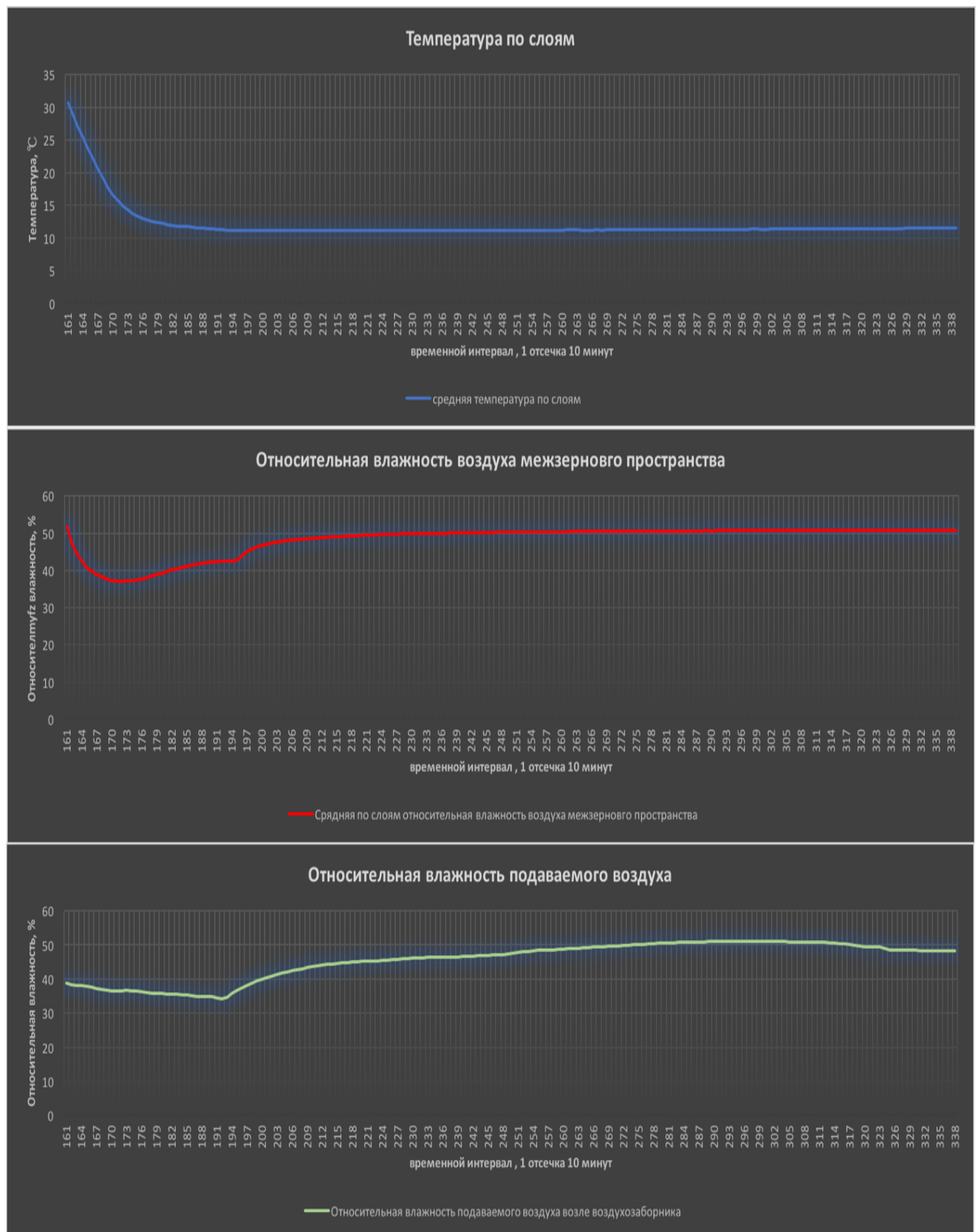
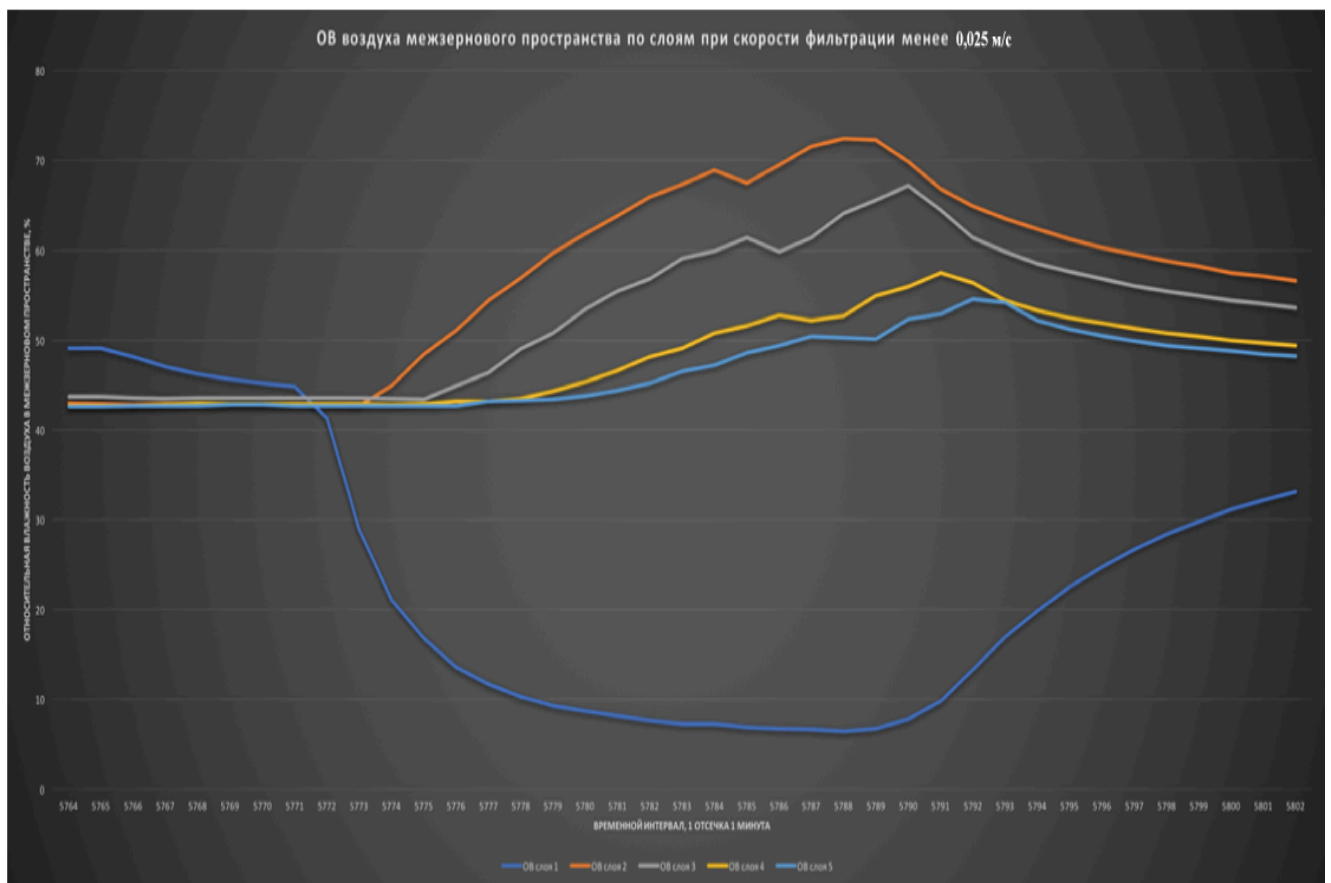


Рисунок 14 – Средние значения по слоям в зерновой массе температуры и относительной влажности воздуха при скорости фильтрации 0,03 м/с

При скорости фильтрации менее 0,025 м/с происходит увлажнение верхних слоев зерновой массы. За счет движения воздушных масс с низу 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. В следствие чего происходит конденсирование на верхней крышке и боковых стенках, и последующее увлажнение верхних слоёв зерновой массы [70].



«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 15 - Относительная влажность воздуха межзернового пространства при скорости фильтрации менее 0,025 м/с [70]

Как видно из рисунка 15, начальная относительная влажность воздуха межзернового пространства составляла 42 %, после включения системы активного вентилирования [70] со скоростью фильтрации воздуха менее 0,025 м/с относительная влажность воздуха в верхних слоях увеличилась до 58 %, а влажность зерна возросла с 13,5 до 14,3 %. Стоит отметить, что в нижних слоях зерновой массы относительная влажность воздуха межзернового пространства и влажность зерна уменьшилась с 42 до 32 % и с 13,5 до 13 % соответственно [70]. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что 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 [70].

3.2 Оптимизация предельно допустимых сроков хранения зерна в действующих металлических силосах большой ёмкости

Лабораторными исследованиями ВНИИЗ установлено, что [111] пшеница при температуре 10 °С с влажностью от 11 до 15 % может храниться до двенадцати месяцев без изменения показателей качества. При температуре 20 °С без изменения качества может храниться [110] двенадцать месяцев только с влажностью не более 12 %. В зерне влажностью от 13 до 14 % после трех месяцев хранения наблюдается ухудшение некоторых показателей (посевных свойств, уменьшение активности дегидрогеназ, увеличение кислотного числа жира), а к девяти месяцам [110] увеличивается интенсивность дыхания приблизительно в два раза. При температуре 30°С, хранение зерна без ухудшения качества наблюдали в течении двух месяцев с влажностью не более 13 %. При влажности [111] от 13 до 14 % ухудшение качества происходило уже в первый месяц хранения. К трем месяцам качественные показатели значительно ухудшились: снизилась натурная масса,

энергия прорастания и всхожесть, увеличилось кислотное число жира и интенсивность дыхания, снизилось качество клейковины [111].

На основе представленных выше лабораторных данных ВНИИЗ предлагаем следующие уточненные предельно допустимые сроки хранения пшеницы в металлических силосах большой емкости, в месяцах.

Таблица 5 - Предельно допустимые сроки хранения зерна пшеницы (месяцев)

Температура зерновой массы в силосе, °С	Влажность зерна пшеницы, %	
	<13	от 13 до 14 включ.
<10	24	12
11 - 20	12	6
20 - 30	3	2

3.3 Управление процессом вентилирования верхней части металлического силоса

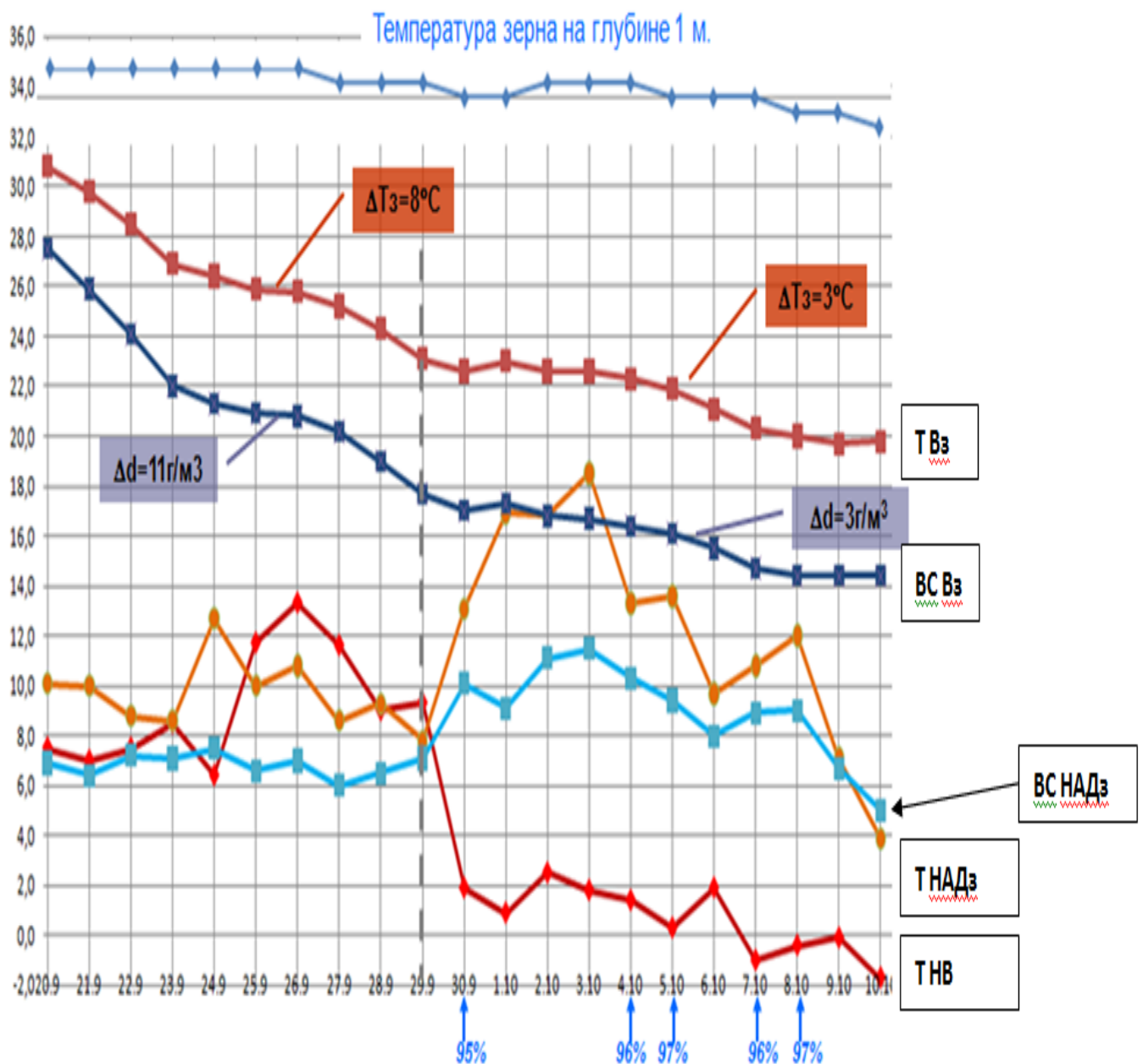
В металлическом силосе наиболее неблагоприятные условия хранения [56] складываются в верхней части зерновой насыпи. Инструкция рекомендует контролировать относительную влажность воздуха [56] в надзерновом пространстве силоса с помощью психрометра Ассмана. В случае превышения относительной влажности воздуха в силосе по сравнению с относительной влажностью наружного воздуха, рекомендуется обеспечить вентилирование [56] надзернового пространства [50]. Выполнить это требование инструкции не представляется возможным, так как не указана периодичность контроля, а люки для обслуживания в крышах силосов для длительного хранения зерна расположены, как правило, на высоте 20 м [56].

Для определения условий, при которых требуется вентилирование в верхней части силоса, нами были проведены замеры температуры и относительной влажности воздуха в верхнем слое зерна и в надзерновом пространстве в промышленном металлическом силосе. Измерения в верхнем слое проводили на глубине 0,07 м, а над зерном на расстоянии 0,06 м от поверхности зерновой массы. Одновременно, с измерениями параметров воздуха внутри силоса, измеряли температуру наружного воздуха [56].

Исследования проводили в металлическом силосе диаметром 12,5 метров, высотой вертикальной стенки 20 метров при общей высоте 26 метров, вместимостью 2 000 тонн, заполненного зерном пшеницы влажностью 12,5 %, массой 1 800 тонн.

Для измерения параметров воздуха использовали сертифицированные, серийно выпускаемые автономные регистраторы данных [56], имеющие следующие габариты [70]: 0,1×0,025×0,023 м. Эти регистраторы одновременно измеряют и записывают температуру и относительную влажность воздуха в месте своего расположения. Периодичность записи регулируется от [56] двух секунд до двадцати четырех часов, в наших исследованиях запись параметров воздуха

производили каждые 30 минут, или в течение суток осуществляли 48 измерений. Погрешность измерения температуры в пределах от минус 40 до минус 70 °С составляет 2 °С, погрешность измерения относительной влажности воздуха в пределах от 10 до 95 % и составляет [70] 5 %. Периоды, в которых измеренное значение относительной влажности составляло 95 % и более, относили к нежелательным для хранения, учитывая возможность образования конденсата [56].



ТВз – температура в зерне; ВС Вз – влагосодержание в зерне; ВС НАДз – влагосодержание над зерном; Т НАДз – температура воздуха над зерновой массой; Т НВ – температура наружного воздуха.

Рисунок 16 - Среднесуточное изменение параметров воздуха внутри силоса

Из представленных на рисунке 16 данных следует, что в первые 9 суток хранения температура воздуха в надзерновом пространстве (под крышей силоса) соответствовала температуре наружного воздуха, изменявшейся в пределах от 6 до 13 °С. Влагосодержание практически не изменялось и составляло около 7 г/м³. В последующие сутки [56] резко понизилась температура наружного воздуха [56] до минус 2 °С, но температура над зерном повысилась, в отдельные сутки составляла свыше 18 °С. Также повысилось влагосодержание до 12 г/м³. Представленные данные свидетельствуют о наличии движения воздуха внутри силоса. Косвенно этот процесс подтверждают данные по уменьшению темпов охлаждения и сорбции влаги в верхнем слое, за счет подогрева из глубинных слоев зерна и выброса влаги в надзерновое пространство. При повышении температуры в верхней части силоса наблюдали периоды повышения относительной влажности до 95 % и более, при которых возможно образование конденсата [56].

При хранении зерна в металлическом силосе требуется принудительное вентилирование [56] надзернового пространства (под крышей) [51]. Вентилирование необходимо проводить при повышении температуры над зерном относительно температуры наружного воздуха более 10 °С [52]. Прекращают вентилирование при достижении равенства температур внутри и снаружи силоса.

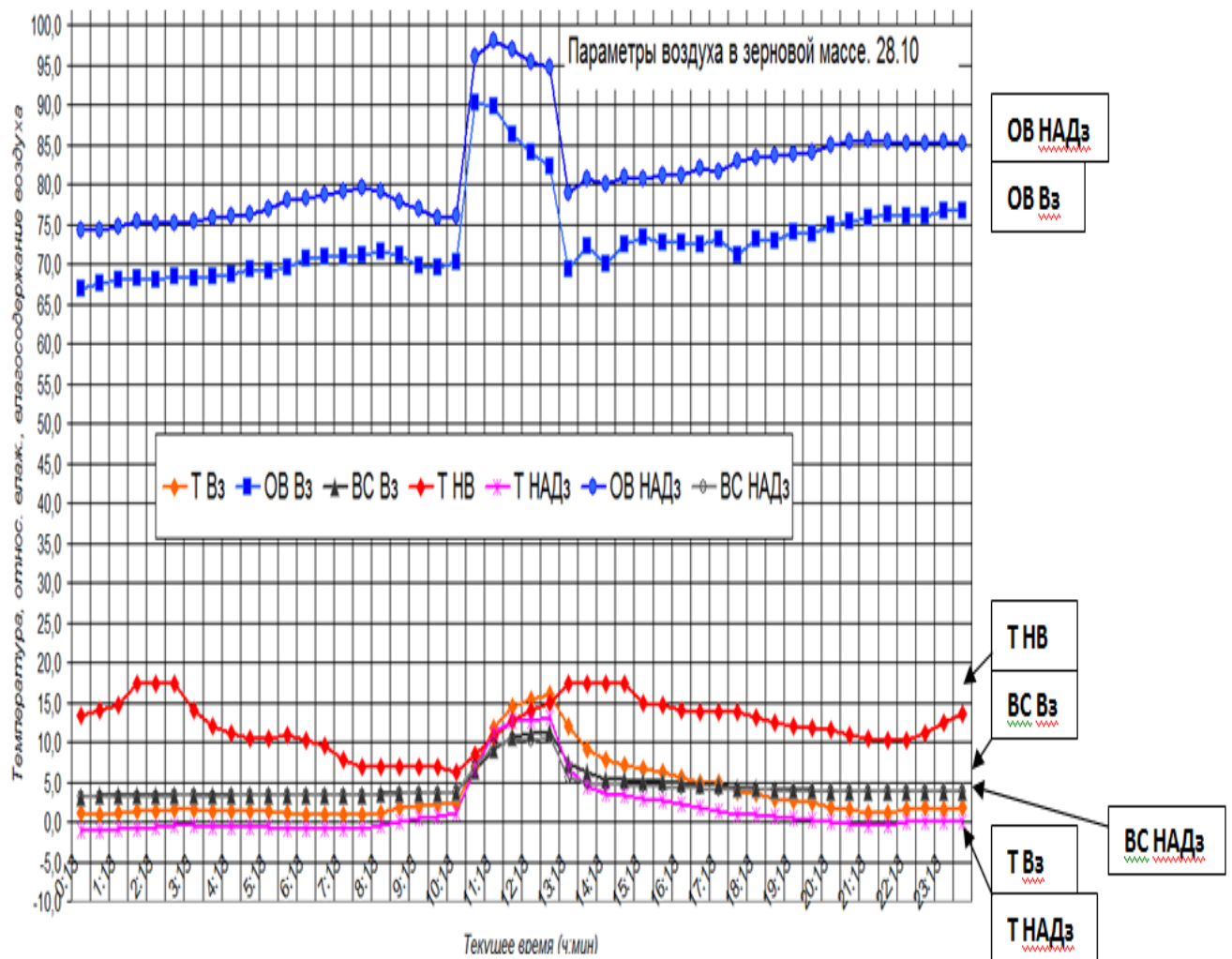
Металлические силосы, предназначенные для длительного хранения [56], оснащены установками для вентилирования зерна, при помощи которых охлаждают зерно наружным воздухом, имеющим более низкую температуру по сравнению с зерновой массой. Как показывают ранее проведенные исследования, поток воздуха, подаваемый вентилятором в зерновую массу, равномерно распределяется по площади сечения силоса практически сразу [53]. Статическое давление воздуха по поперечному сечению силоса [56] одинаково. Исходя из кинетики охлаждения с целью сокращения затрат, почти в два раза, зерно охлаждать целесообразно до температуры, вычисляемой по следующей формуле:

$$T_{\kappa} = 0,3T_{\text{з}} + 0,7T_{\text{н.в.}}, \quad (29)$$

где T_{κ} – конечное значение температуры зерна после охлаждения [56];

$T_{\text{з}}$ – начальное значение температуры зерна [56];

$T_{\text{нв}}$ – температура наружного воздуха.



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

Рисунок 17 - Изменение параметров воздуха в зерновой массе при активном вентилировании с 10:00 до 13:00 [56]

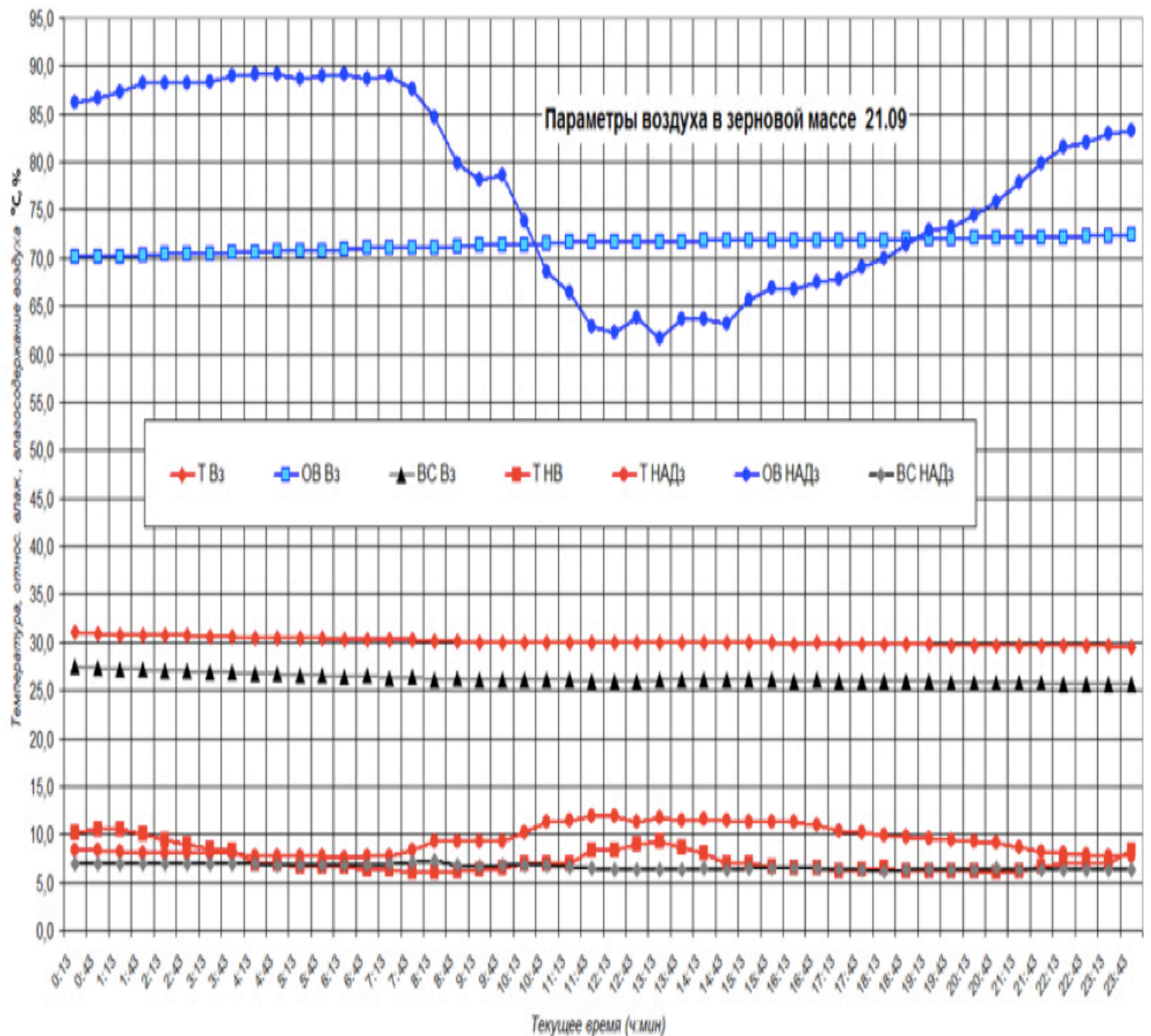
На рисунке 17 представлены изменения параметров воздуха внутри силоса при вентилировании в течении трех часов. На протяжении всего периода вентилирования повысились значения параметров воздуха в межзерновом пространстве верхнего слоя [56] и в надзерновом пространстве. Увеличение относительной влажности воздуха в надзерновом пространстве достигло критического уровня 95 % и более. Дальнейшее вентилирование привело в дальнейшем к увлажнению поверхностного слоя и ухудшению в зерне качественных показателей. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при вентилировании можно получить условия, ухудшающие сохранность качества зерна. Поэтому перед выполнением этой технологической операции необходимо оценить степень [56] ее риска. Для предотвращения образования конденсата вентилировать зерно следует воздухом, имеющим параметры, при которых равновесная влажность меньше фактической влажности хранящегося зерна [54, 56].

Рисунок 15 является характерным для отображения внесения влаги из окружающей среды, её конденсации на крышке и стенах металлического силоса при использовании системы активного вентилирования и дальнейшего увлажнения поверхностного слоя [55].

До момента применения системы активного вентилирования зерно хранилось с соблюдением технологического регламента [56], это можно увидеть на рисунках 18-23. На них представлены значения температуры, относительной влажности по слоям, влагосодержание, температура над зерном при хранении внутри МСБЕ [57].

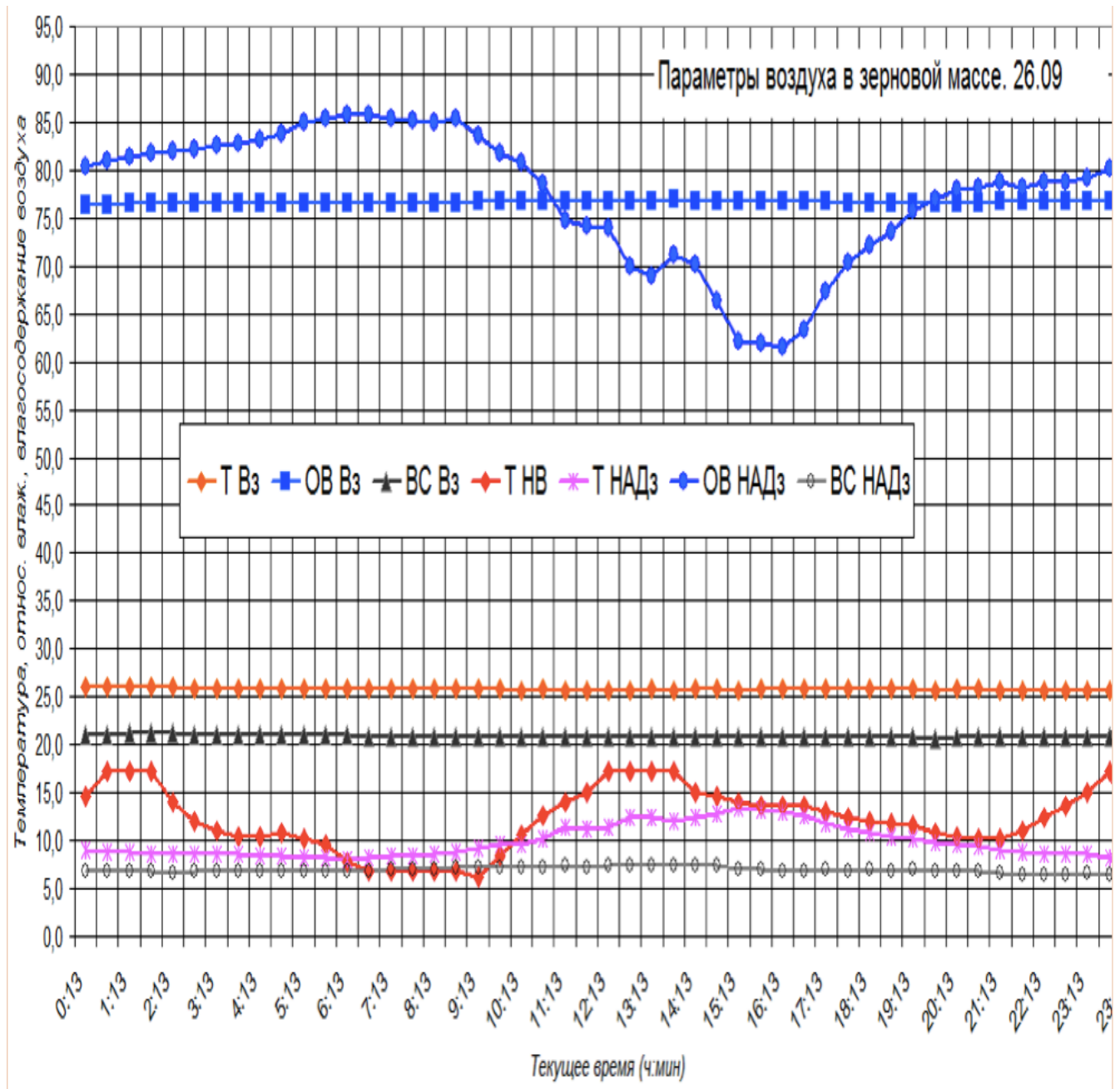
Как видно из рисунка 18 при резком изменении относительной влажности воздуха над зерном с 90 до 60 %, относительная влажность в зерне осталась практически неизменной и составила 70 %. Температура наружного воздуха изменялась от 7 в ночные часы до 14 °С днем. На температуру зерна это не оказывало практически никакого влияния, она оставалась неизменной и составляла 30 °С, что является близким к критическому значению, при дальнейшем росте температуры необходимо предпринимать меры, способствующие её понижению: использовать систему активного вентилирования, при условии, что равновесная

влажность воздуха меньше или равна относительной влажности воздуха межзернового пространства. В противном случае применять систему активного вентилирования не рекомендуется так как это приведет не только к снижению температуры хранимого зерна, но и его увлажнению, и как следствие к ухудшению условий, сокращению сроков хранения [58].



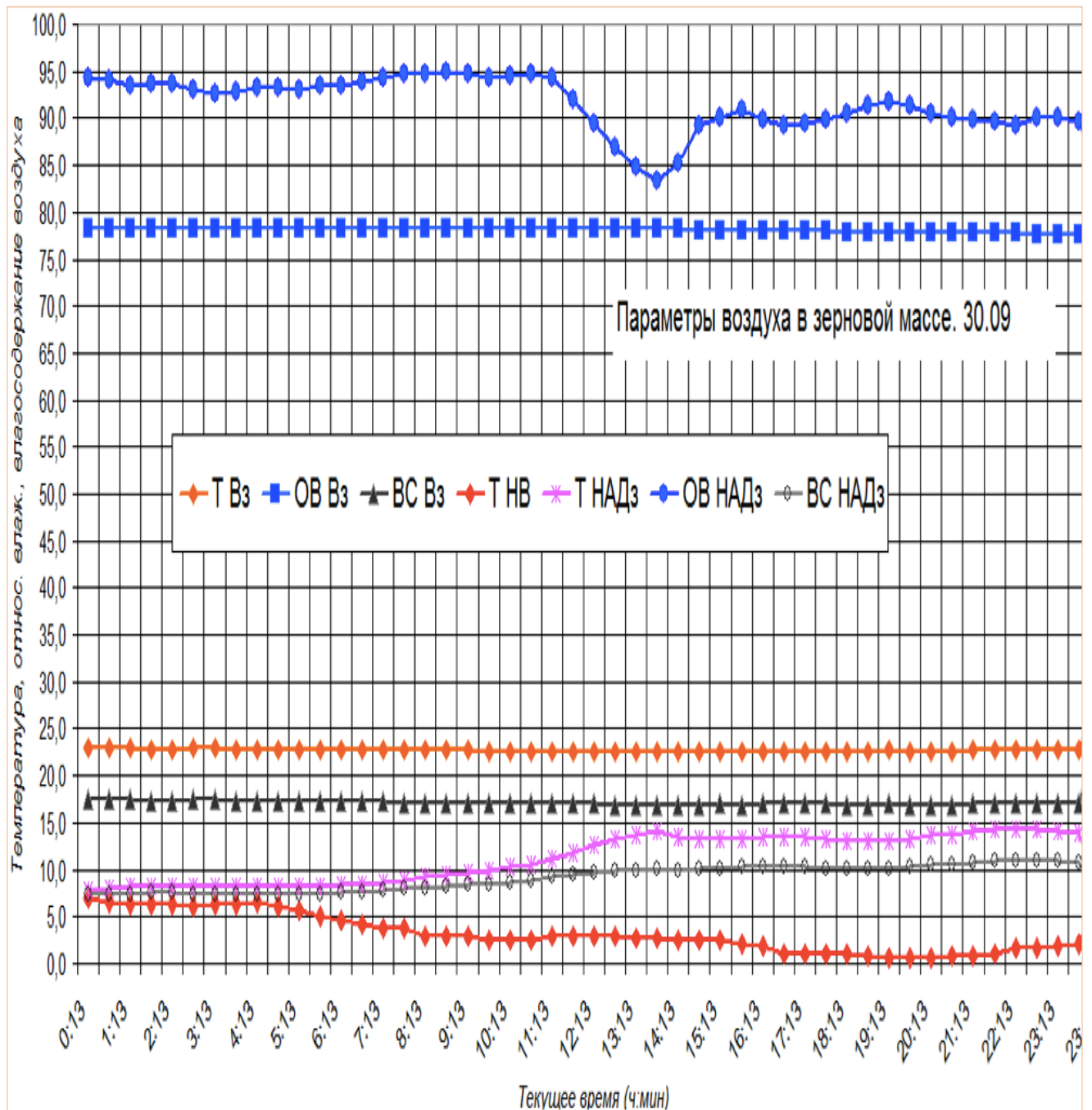
ТВз – температура в зерне; ОВ Вз – относительная влажность воздуха в зерне; ВС Вз – влажность в зерне; Т НВ – температура наружного воздуха; Т НАДз – температура над зерном на расстоянии 1 метра; ОВ НАДз – относительная влажность воздуха надзернового пространства; ВС НАДз – влажность воздуха в надзерновом пространстве

Рисунок 18 - Параметры зерновой массы в МСБЕ за сутки от 21 сентября



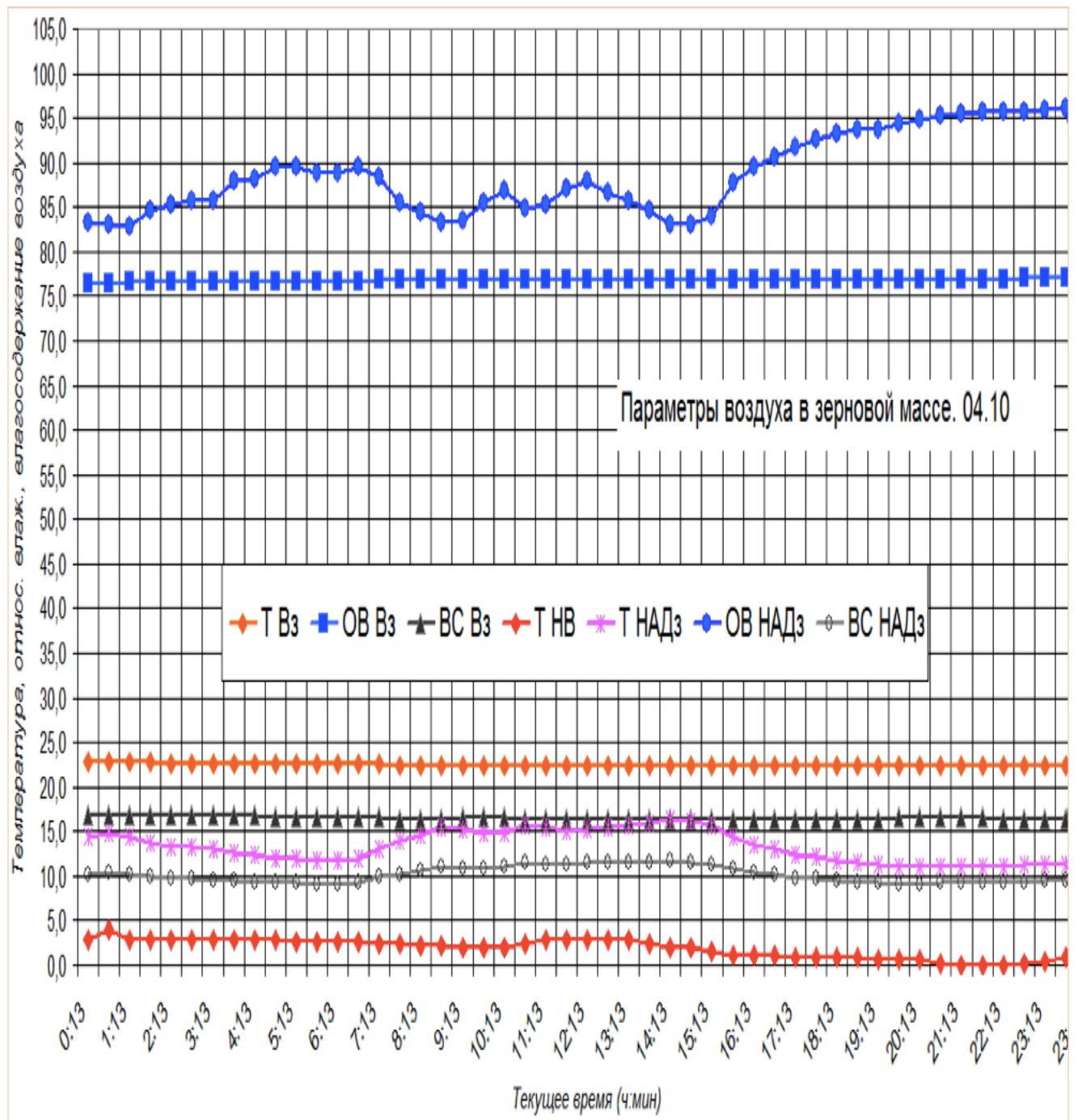
ТВ_з – температура в зерне; ОВ В_з – относительная влажность воздуха в зерне; ВС В_з – влагосодержание в зерне; Т НВ – температура наружного воздуха; Т НАД_з – температура над зерном на расстоянии 1 метра; ОВ НАД_з – относительная влажность воздуха надзернового пространства; ВС НАД_з – влагосодержание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

Рисунок 19 - Параметры зерновой массы в МСБЕ за сутки от 26 сентября



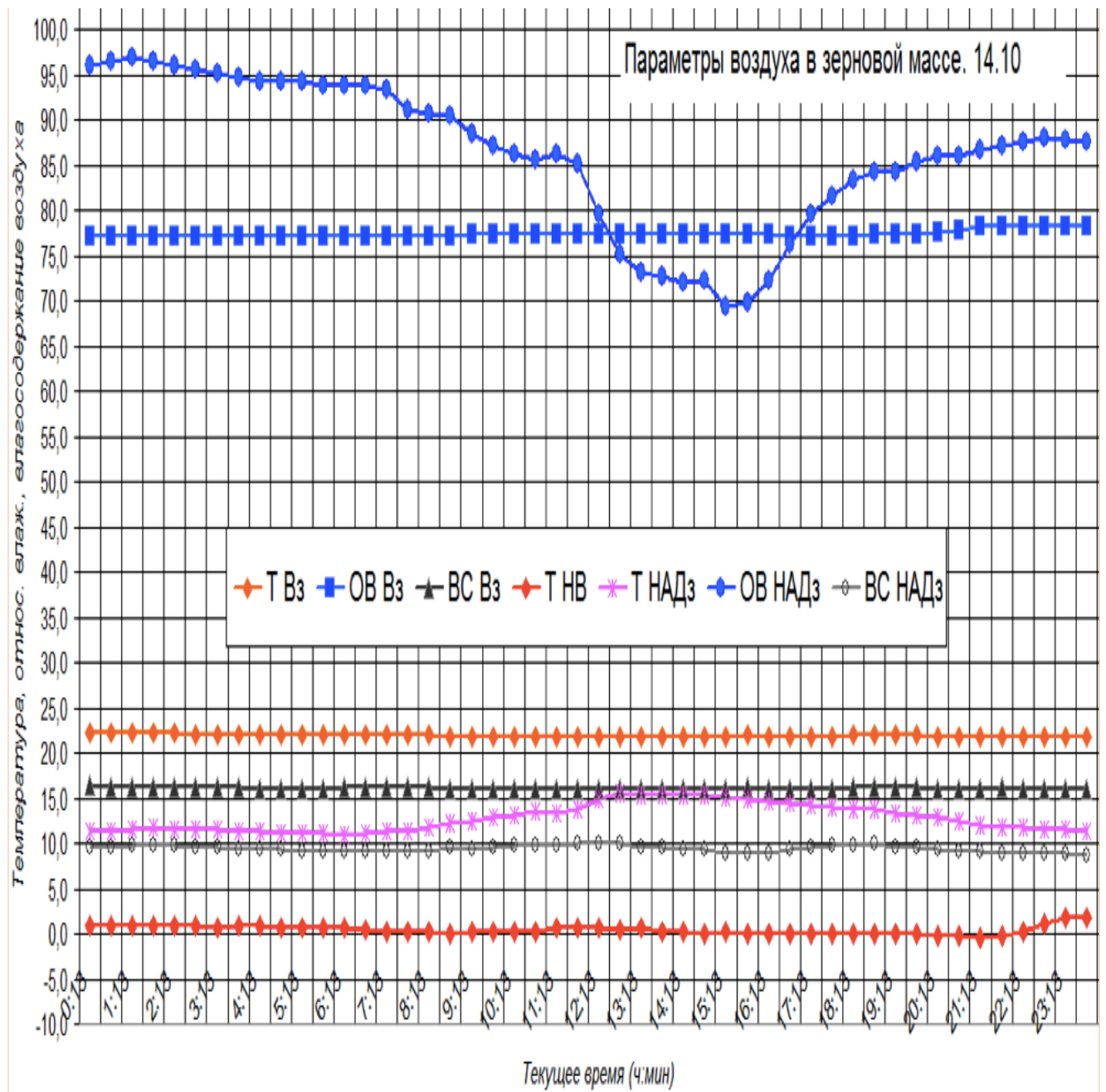
ТВ_з – температура в зерне; ОВ В_з – относительная влажность воздуха в зерне; ВС В_з – влагосодержание в зерне; Т НВ – температура наружного воздуха; Т НАД_з – температура над зерном на расстоянии 1 метра; ОВ НАД_з – относительная влажность воздуха надзернового пространства; ВС НАД_з – влагосодержание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

Рисунок 20 - Параметры зерновой массы в МСБЕ за сутки от 30 сентября



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.

Рисунок 21 - Параметры зерновой массы в МСБЕ за сутки от 4 октября



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

Рисунок 22 - Параметры зерновой массы в МСБЕ за сутки от 13 октября

На рисунках 19-22 можно наблюдать изменение относительной влажности воздуха надзернового пространства в дневные часы с 11 утра и до 8 вечера в диапазоне от 60 до 90 %, температура окружающего воздуха изменялась от 0 до

15 °С, а температура в зерне практически не менялась и находилась в диапазоне от 22 до 25 °С вне зависимости от изменения наружной температуры и относительной влажности воздуха. Влагосодержание в зерне и в надзерновом пространстве находилось в пределах от 10 до 16 %. Рисунки 19-22 характеризуют устоявшийся процесс хранения зерна пшеницы в МСБЕ, температура зерна практически никак не реагирует на влияние внешних факторов: температуры наружного воздуха и относительной влажности воздуха.

На предприятии ООО «Тесницкое» замеры относительной влажности воздуха и температуры проводились на протяжении двух месяцев в течении суток, с подробными результатами исследований можно ознакомиться в Приложении А к работе.

Была предложена и апробирована типовая технологическая схема хранения зерна в металлических силосах. Схема расположения термометрии приведена для силосов вместимостью 10 000 тонн. (рисунок 23) [114].

В конструкции металлических силосов не предусмотрен постоянный контроль количества воздуха, обращающегося внутри силоса [59]. Силосы не оборудованы измерительной аппаратурой для контроля расхода воздуха. При малых скоростях фильтрации воздуха, десорбированная влага из зерна оседает на поверхности зерновой массы, что приводит к её увлажнению [60, 114].

Для избегания оседания влаги на поверхности зерновой массы необходимо вентилировать ее при скоростях фильтрации, обеспечивающих вынос влаги за пределы силоса [61, 114].

Было предложено регулировать количество нагнетаемого воздуха изменением массы вентилируемого зерна. Этот способ не требует капитальных затрат, но требует знаний по управлению воздушным потоком [62]. Чем меньше масса зерна, тем больший расход воздуха. Устанавливается объем воздуха, при котором в наиболее нагруженной центральной части силоса, обеспечивается критическая скорость фильтрации [63]. Под критической скоростью понимается минимальное ее значение, обеспечивающее вынос влаги за пределы зернохранилища [64, 114].

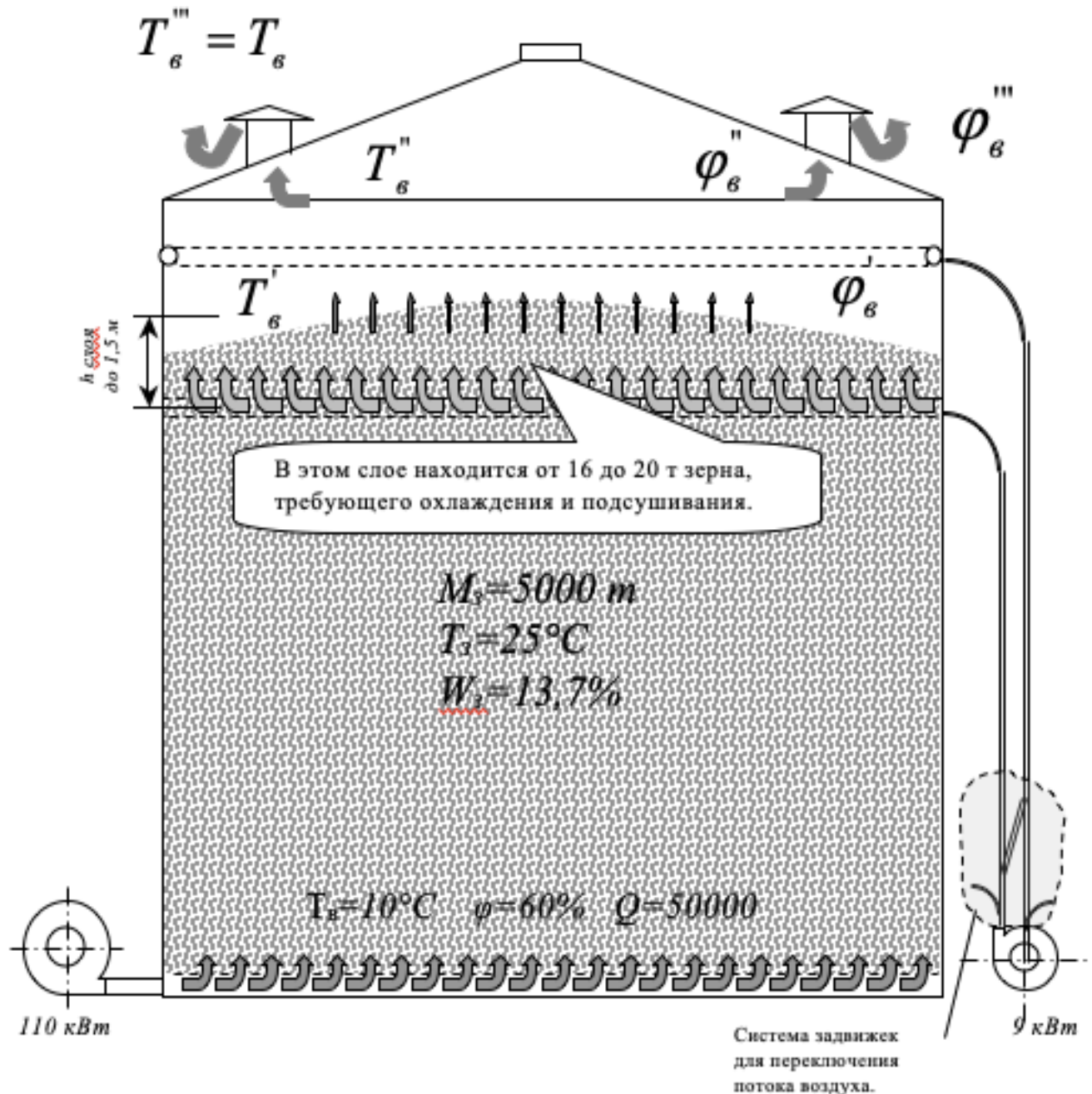


Рисунок 23 - Технологическая схема металлического силоса большой ёмкости для хранения зерна с контролем и управлением воздушными потоками во внутреннем пространстве

Воздух неравномерно движется в зерновой массе. Около стен силоса воздух имеет большую скорость по сравнению с центральной частью [65]. Это обосновано различием высот слоя зерна, в центре слой более высокий, чем у стен. Разность высот возникает вследствие загрузки силоса через одно отверстие в центре крыши, в силосе образуется конусообразная насыпь [66]. Эпюру скоростей воздуха на

границе выхода из зерновой массы от центра до стены можно описать следующей формулой [114]:

$$\bar{V}_{\phi} = R^{-1} \int V_x(x) dx, \quad (30)$$

$$V_{\phi} = \exp\left(\frac{\ln \Delta P - \ln A - 2,28 - \ln (H_1 + (R - x) \operatorname{tg} \alpha)}{n}\right), \quad (31)$$

где v_x – скорость фильтрации воздуха на выходе из зерновой массы на расстоянии x от центра силоса, м/с;

P – давление воздуха в нижней части насыпи, Па;

h – высота слоя зерна около вертикальной стенки силоса, мм;

R – радиус силоса, мм; x – переменная величина расстояния от центра силоса до его стенки, мм;

α – угол естественного откоса зерна, град.;

A и n – эмпирические коэффициенты, приведены в таблице 3 [114].

На рисунке 24 приведены эпюры скоростей фильтрации воздуха от центра до стенки в двух силосах диаметром 12,5 метров ($R = 6,25$ м) вместимостью 2 000 тонн, и диаметром 28,3 метров ($R = 14,15$ м) вместимостью 10 000 тонн. Высота слоя зерна около вертикальной стенки соответствовала 15 метров и 20 метров при одинаковом давлении 3 000 Па в нижней части слоя. При большей высоте слоя имели меньшие значения скоростей фильтрации и меньший расход воздуха. Около стенки силоса скорость воздуха зависит от высоты слоя и одинакова для силосов различного диаметра при одинаковом давлении в нижней части [67]. В силосах с большим диаметром имеется больший разброс значений скоростей фильтрации по поверхности зерновой массы. Например, в силосе диаметром 12,5 м скорость воздуха в центре составила 0,039 м/с, а около стены 0,046 м/с, разность равна 0,007 м/с. В силосе диаметром 28,3 м скорость воздуха в центре составила 0,034 м/с, около стены такая же скорость 0,046 м/с, разность равна 0,012 м/с. Для силоса диаметром 12,5 м скорость фильтрации 0,007 м/с соответствует расходу воздуха 3000 м³/ч. Для силоса диаметром 28,3 м скорость фильтрации 0,012 м/с соответствует расходу воздуха свыше 27000 м³/ч. Для компенсации

неравномерности распределения воздуха требуются дополнительные затраты электроэнергии [68, 114].

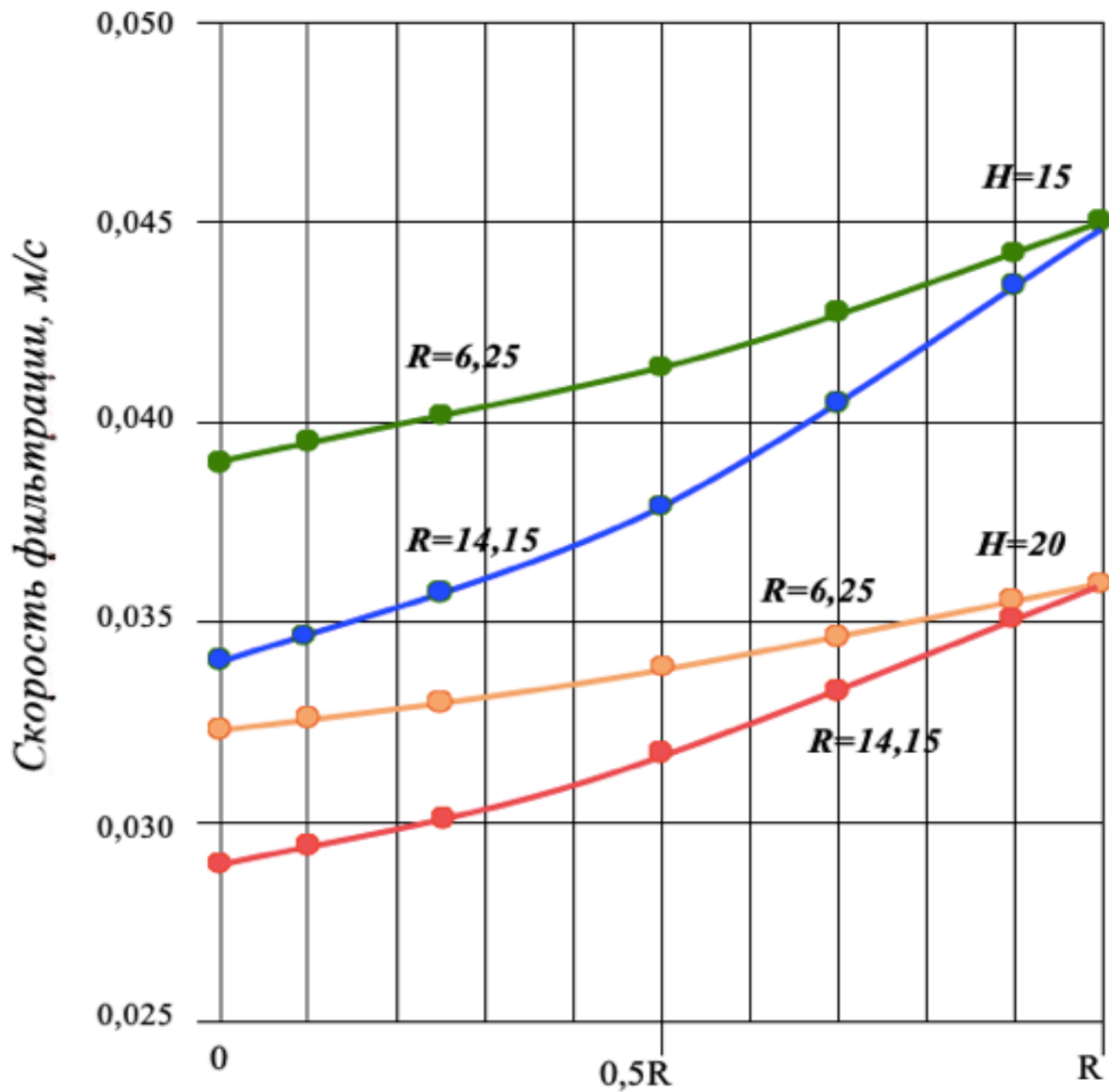


Рисунок 24 - Эпюры скоростей воздуха на поверхности зерновой массы в силосах диаметром 12,5 и 28,3 м при высоте зерновой насыпи около стен 15 и 20 м, давлении воздуха в нижней части насыпи 3 000 Па [114]

Требуемая критическая скорость фильтрации в центре силоса обеспечивается при подаче воздуха в объеме, соответствующем значению средневзвешенной скорости, и при давлении снизу, соответствующем критической скорости в центре [69]. Максимальное давление воздуха в нижней части зерна вычисляется по формуле [114].

$$P = 9,810 \times A \times (H + R \times \tan \alpha) \times V^n, \quad (32)$$

где H – высота вертикальной стенки силоса, мм;

v – критическая скорость фильтрации, м/с.

Подставив выражение (32) в формулу (31) получим следующую зависимость для вычисления средневзвешенной скорости фильтрации.

$$\bar{v} = \exp(n^{-1}), \quad (33)$$

$$\bar{v} = R^{-1} \int_0^R v(x) dx, \quad (34)$$

где x – координата средневзвешенной скорости фильтрации, мм [114].

Координату средневзвешенной скорости фильтрации вычисляли, используя формулу (33) и (34) для МСБЁ диаметром от 8 до 40 метров при равенстве высот зернового слоя и стенки силоса от 15 до 20 метров. Координата практически не зависит от высоты стенки, изменяется в силосах различного диаметра [70]. Значения координаты, полученной расчетом для МСБЁ с различными диаметрами, представлены в таблице 6 [114].

Таблица 6. Значения координаты средневзвешенной скорости фильтрации воздуха в силосах различного диаметра [114]

Координата	Диаметр силоса, м			
	До 10	От 10 до 20	От 20 до 30	Свыше 30
X	0,50R	0,55R	0,60R	0,65R

С целью предупреждения развития процесса самосогревания зерна рекомендуется систему мониторинга температуры внутри зерновой массы оборудовать сигнализацией или устройством автоматического включения вентиляторов при повышении температуры более 7°C в течение 2–3 суток на двух и более датчиках. При опасности возникновения самосогревания зерновой массы, ее вентилирование осуществляют при любых погодных условиях [114].

Технология безопасного активного вентилирования зерна в металлических силосах заключается в следующем.

1. МСБЁ оборудуют контрольно-измерительным прибором давления воздуха. Снаружи устанавливают диффометр для измерения перепада давления воздуха в слое зерна толщиной от 2,5 до 3,5 метров. Нижняя точка отбора давления не менее 1 метра от воздухораспределительной решетки силоса.

2. В МСБЁ допускается хранение зерна влажностью не более 14 %. Вентилирование допускается при параметрах наружного воздуха, исключающих дополнительное увлажнение зерна. Температура наружного воздуха должна быть [114] ниже температуры зерна не менее чем на 5°C . Значения относительной влажности воздуха не должны превышать предельных значений [115], предлагаемых в таблице 7.

Таблица 7. Предельные значения относительной влажности атмосферного воздуха для охлаждения зерна в металлическом силосе

Температура атмосферного воздуха, 5 °С	Температура зерна, °С		Влажность зерна					
	начальная	конечная	менее 12 %		от 12 до 13 %		от 13 до 14 %	
			пшеница	ячмень	пшеница	ячмень	пшеница	ячмень
-15	15	-2	70	60	70	65	75	70
	20	-1	70	60	70	65	75	70
-10	15	-2	65	60	70	65	75	70
	20	-1	65	60	70	65	75	70
-5	15	1	65	55	70	65	75	70
	20	3	62	55	70	65	73	70
	25	4	60	55	70	65	73	65
0	15	5	60	55	70	65	70	65
	20	6	60	53	68	65	70	65
	25	8	60	53	68	63	70	65
	30	9	60	51	68	63	70	65
5	15	8	60	53	68	63	70	65
	20	10	60	50	65	60	70	65
	25	11	58	50	65	60	70	65
	30	13	58	50	65	60	70	65
10	15	11	58	50	65	58	70	65
	20	13	58	50	65	58	70	65
	25	14	55	50	65	55	70	65
	30	16	55	50	65	55	70	65
15	20	17	52	48	63	55	68	65
	25	18	52	48	63	55	68	63
	30	20	50	45	62	53	65	63
	35	21	50	45	60	50	65	60

При вентилировании воздухом, имеющим относительную влажность больше предельно-допустимого значения в таблице 7, возможно оценить повышение влажности зерна, по следующей формуле.

$$\Delta W = 5 \times 10^4 \times (\varphi_{\text{ф}} - \varphi_{\text{д}}) \times \Delta T \times e^{0,07t}, \quad (35)$$

где ΔW – приращение влажности зерна, %;

$\varphi_{\text{ф}}$ – относительная влажность атмосферного воздуха, %;

$\varphi_{\text{д}}$ – допустимая относительная влажность (табл. 6), %;

ΔT – разность температур зерна и атмосферного воздуха, °С;

t – температура атмосферного воздуха, °С.

3. Вычисляют по формуле (33) средневзвешенное значение скорости фильтрации воздуха. Затем вычисляют перепад давления в слое толщиной три метра по следующей формуле

$$\Delta P = 29430 \times A \times \bar{v}^n, \quad (36)$$

где ΔP – перепад давления воздуха в слое толщиной три метра, Па.

Включают вентилятор. Если диффометр покажет значение перепада давления меньше, вычисленного по формуле (36), то уменьшают массу зерна в силосе. Зерно выгружают до тех пор, пока показание на диффометре не совпадет с вычисленным значением. В этом случае в зерновую массу будет подаваться объем воздуха, обеспечивающий критическую скорость фильтрации в центральной части силоса, гарантируя вынос десорбированной из зерна влаги за пределы зернохранилища [71].

3.4. Статистическая обработка данных

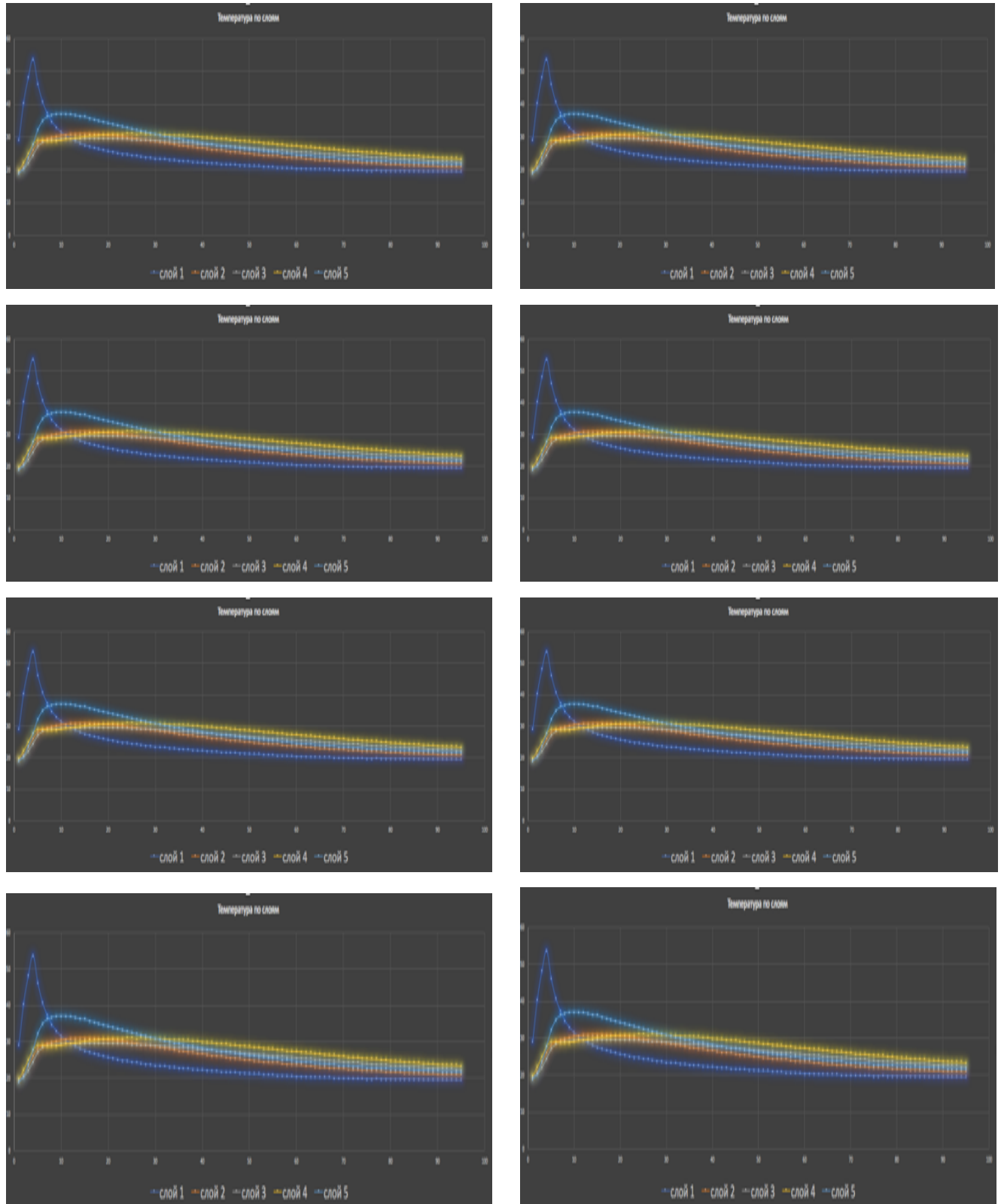
Полученные данные были обработаны с применением математических методов статистической обработки, в частности был применен факторный анализ, которые используется при обработке больших массивов экспериментальных данных.

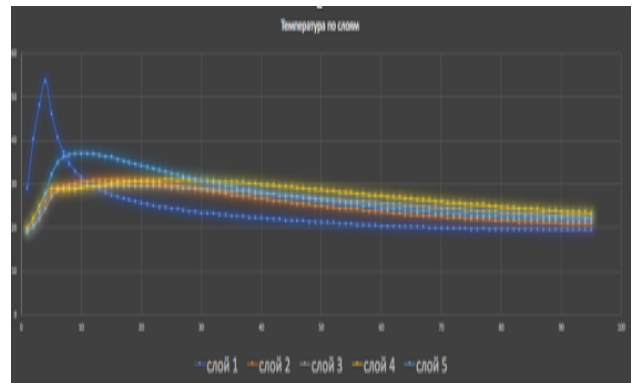
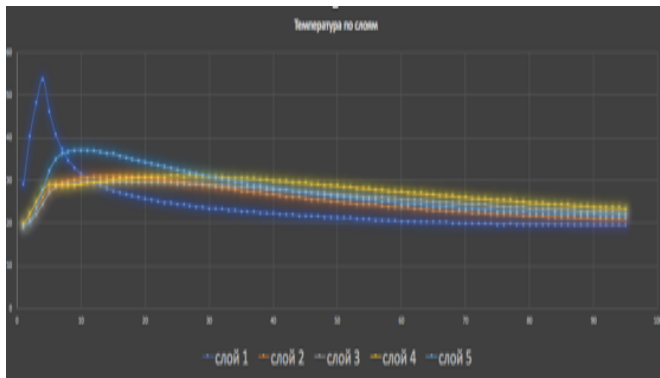
Полученный массив экспериментальных данных был обработан при помощи интерактивной среды для программирования численных расчетов и визуализации результатов MATLAB.

Были проведены десять серий экспериментов по десять опытов в каждой серии. Для каждой серии опытов задавались одинаковые исходные параметры по температуре и влажности зерновой массы. Заданные параметры задавались на экспериментальной установке. Начальная температура зерна составляла 19 °С, конечная 30 °С, время нагрева четыре часа. Благодаря заданной системе

параметров удалось установить закономерность нагрева зерновой массы для данной установки – 2,75 °C в час.

После каждой серии проведенных опытов был построен температурный график по слоям в зависимости от времени (эксперименты с 1 по 10 представлены на рисунке 25).





«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 25 - Нагрев зерновой массы по слоям для экспериментов с 1 по 10

Как видно из рисунка 25, данные температуры по слоям практически не отличаются от опыта к опыту. Полученные данные из десяти серий опытов по десять опытов в каждой серии были обработаны и на их основе построен общий температурный график по слоям, представленный на рис. 16, включающий в себя массив данных из ста опытов, все они были структурированы, обработаны и визуализированы с использованием среды программирования MATLAB.

3.4.1 Статистическая обработка данных с использованием программной среды MATLAB.

Ввод данных в программу осуществляется в специально созданную экранную форму таблиц. Программный код рассчитывает проход по каждой точке и подсчитывает среднее значение по столбцам, в результате работы программы автоматически формируются графические зависимости, представленные на рисунке 26, обработка программного кода на рисунке 27, построение графиков и их визуализация на рисунке 28. Программный код представлен в Приложении Б.

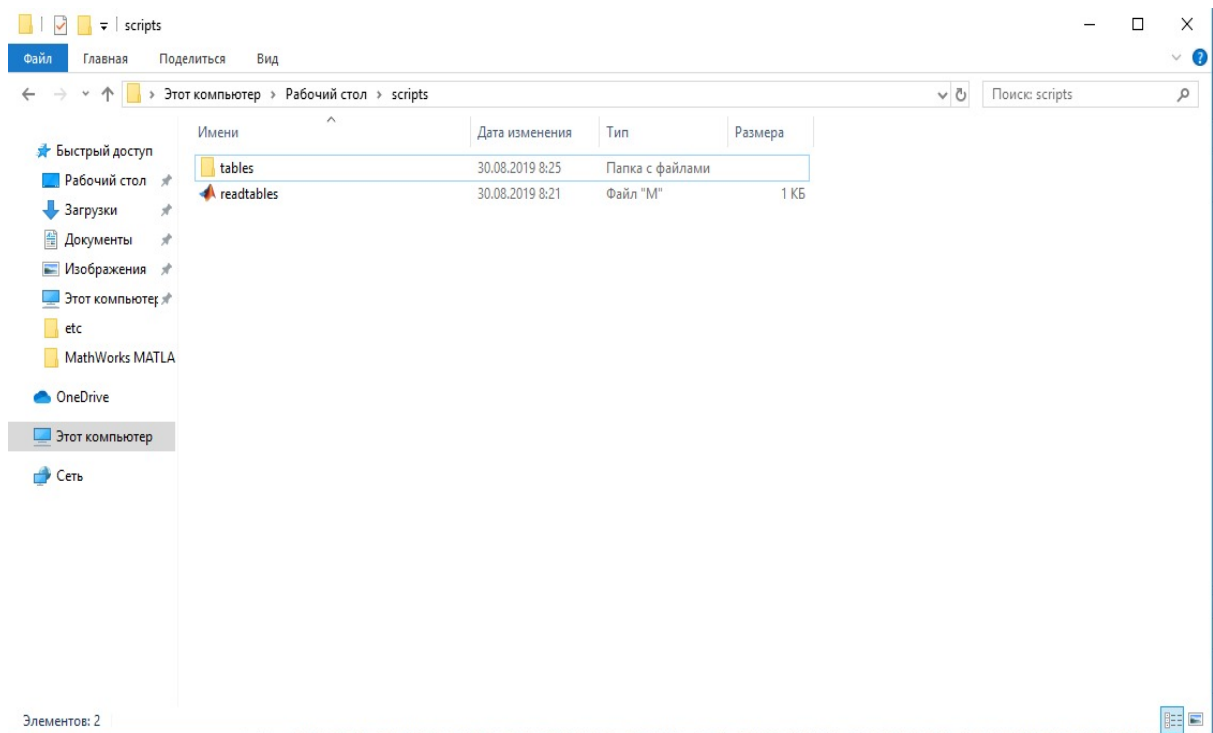


Рисунок 26 – Выбор папки с исходными данными

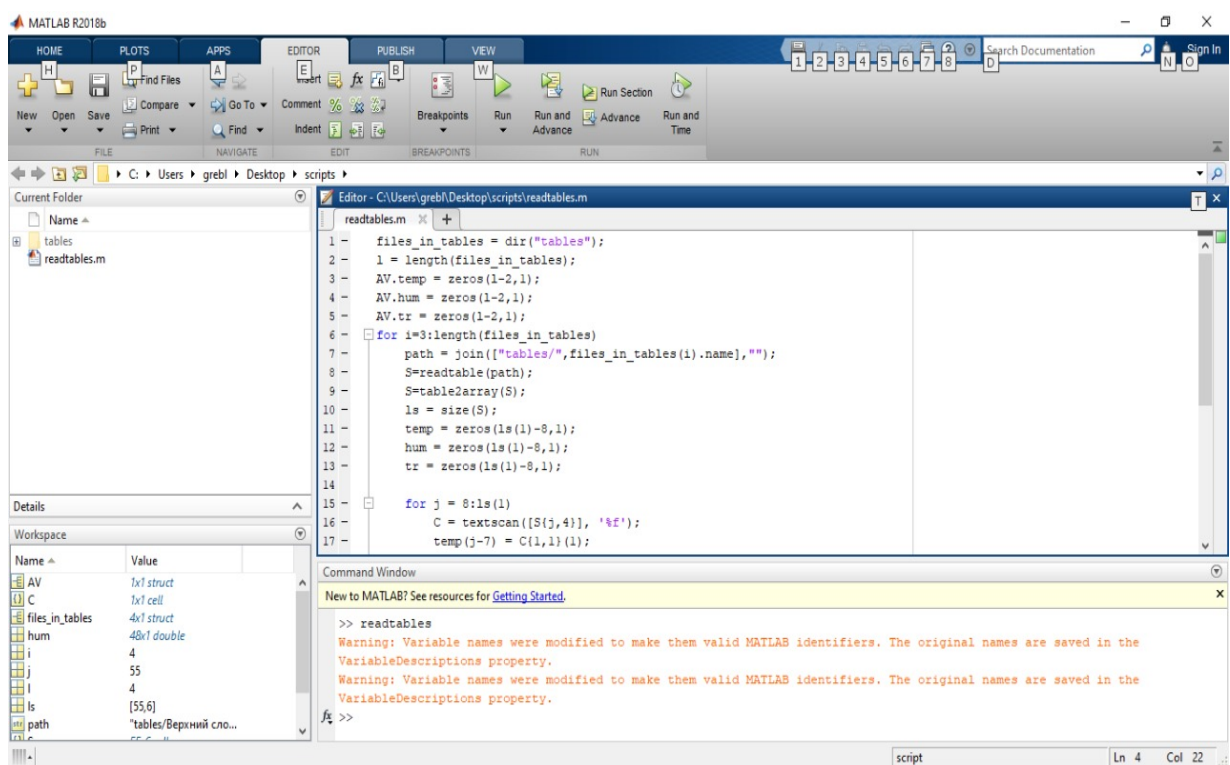


Рисунок 27 – Обработка программного кода в MATLAB

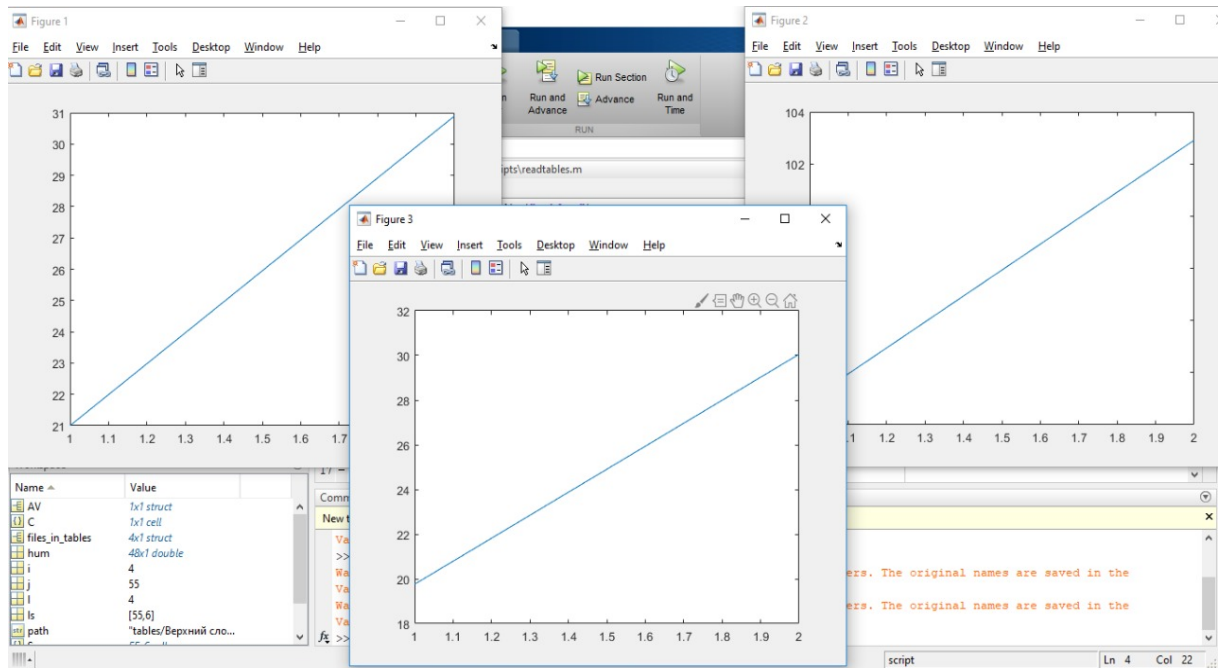
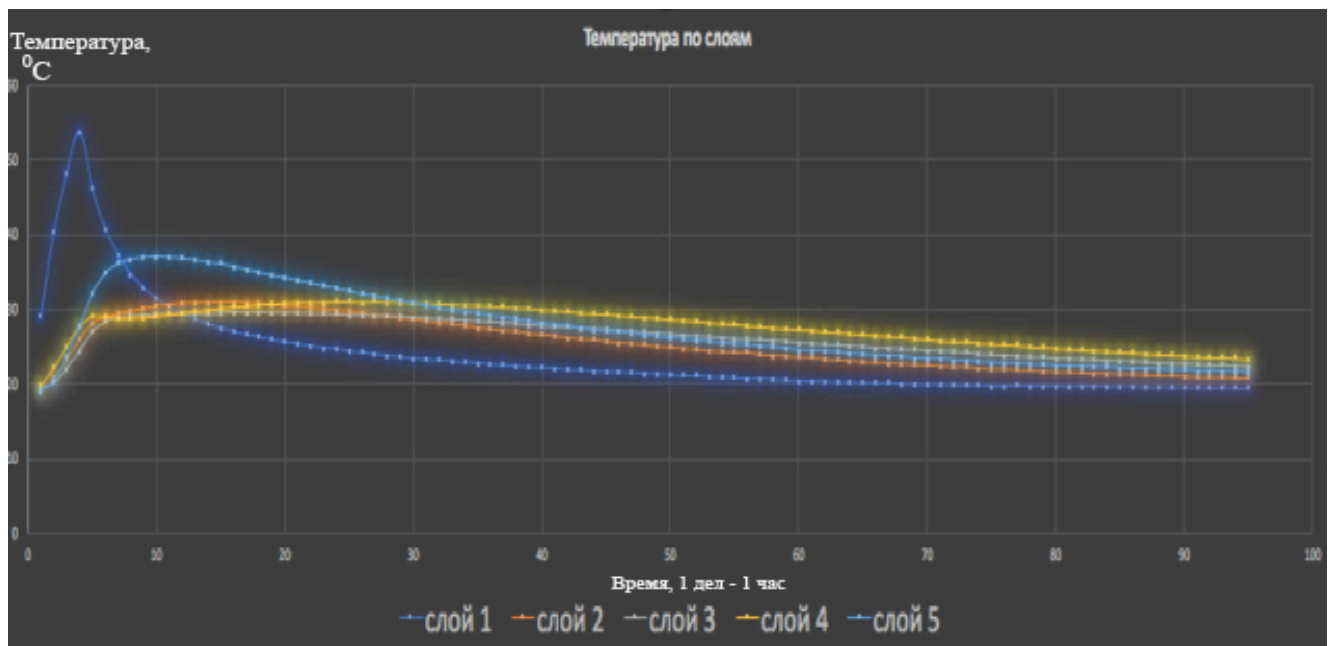


Рисунок 28 – Визуализация данных в MATLAB

В результате работы программы были получены суммарные данные по слоям в зерновой массе, представленные на рисунке 29.



«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 29 – Суммарные значения по слоям зерновой массы при нагреве

Как видно из рисунка 29 разброс температуры по слоям 2-4 составил менее 1 °С. Резкое увеличение температуры наблюдалось только в слоях под номером 1 и 5. Объясняется это тем, что они находятся в пограничных условиях. «Слой 1» соприкасается с металлической решеткой, у которой теплопроводность на порядок выше зерна, поэтому происходит скачок температуры. «Слой 5» соприкасается с воздушной средой и забор тепла провода происходит неравномерно, как на слоях под номерами 2–4, так как нижняя часть нагревательного провода находится в зерне, а верхняя в воздушной среде.

При помощи нагревательного кабеля удалось добиться равномерного нагрева зерновой массы. Конечная температура зерновой массы составила от 28 до 31 °С. Прирост температуры зерна составил 11 °С за четыре часа, а разброс температуры по слоям составил не более 2 °С.

Для определения относительной влажности зерна в каждом слое, где происходили снятия показаний температуры, в конце эксперимента были взяты пробы зерна. Зерно было помещено в специальные мешочки и размещено по слоям до начала эксперимента. После окончания нагрева зерновой массы, исследуемые пробы зерна были извлечены и в лаборатории определены показатели относительной влажности зерна согласно ГОСТ 13586.5-2015.

3.5. Оценка погрешности результатов измерений

Температуру и относительную влажность измеряли одновременно при помощи самозаписывающих сертифицированных устройств с периодичностью записи 30 мин [70]. В течение суток было получено 48 характерных точек. Устройства имели следующие диапазоны измерений параметров воздуха: температуры от минус 40 до 70 °С с погрешностью 2 °С, относительной влажности от 10 до 95 % с погрешностью 5 % [70].

Исходя из погрешности прибора погрешность измерений при определении температуры составляет 2 %, при нахождении в диапазоне от минус 40 до 70 °С, и 5 % при относительной влажности, для диапазона от 10 до 95 %.

При статистической обработке данных применялся нормальный закон распределения, средне квадратичное отклонение для температуры по слоям составило 0,9867. Данные были получены с использованием программной среды для программирования MATLAB.

3.6. Влияние различных факторов на время охлаждения слоя зерна в металлических силосах большой емкости.

Для выбора режима активной вентиляции необходимо разработать математическую модель процесса. При математическом описании сделаны следующие допущения: продольное перемешивание газовой фазы отсутствует, слой имеет однородную порозность, в нем отсутствуют застойные зоны и явления проскока и рециркуляции воздуха.

Математическое описание процесса охлаждения и осушки зерна, записанное в одномерном приближении приведено в разделе 2.3. Оно представляет собой систему дифференциальных уравнений, в которой неизвестными функциями являются температура и влагосодержание воздуха в слое, а также температура и влагосодержание зерна. Данная система позволяет определить их изменения во времени и по высоте слоя. В систему дифференциальных уравнений входит также уравнение, описывающее зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи Nu от Re в слое, а также соотношения, связывающие температуру, парциальное давление и влагосодержание влажного воздуха на линии насыщения. Следует отметить, что процесс описывается этой моделью приближенно, поскольку не учитывается перенос влаги внутри отдельного зерна от его центра к его поверхности. В части расчета влагосодержания модель требует в будущем

уточнения с учетом изменения коэффициентов диффузии влаги и массоотдачи единичной зерновки. Тем не менее, описание процесса охлаждения слоя зерна, продуваемого холодным воздухом, в том случае, если не учитывается влагоперенос, описывается моделью достаточно строго. В случае отсутствия массообмена модель принимает вид:

$$C_{p_{\text{возд}}} \times \frac{dt_B}{dz} \times G_B = K \times (t_B - \theta) \times f_1, \quad (37)$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} \times C_{p_z} \times \rho = K \times (t_B - \theta) \times f_1, \quad (38)$$

где $\theta(\tau)$ - температура зерна, $^{\circ}\text{C}$;

$t_B(\tau)$ - температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

τ - время, с;

$C_{p_{\text{возд}}}$ - теплоемкость воздуха, кДж/кг;

G_B - расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$.

$$f_1 = S \times (1 - \varepsilon) \times \frac{f_{3-\text{на}}}{V_{3-\text{на}}}, \quad (39)$$

Коэффициент теплопередачи рассчитывается с учетом внутреннего термического сопротивления отдельных зерен:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{d}{2 \times \lambda}}, \quad (40)$$

Коэффициент теплоотдачи α от зернового слоя к воздуху определяется по числу Нуссельта, вычисляемому по следующему критериальному соотношению:

$$\text{Nu} = 1,38 \times \text{Re}^{0,5} \times \text{Pr}^{0,33} \quad (41)$$

Данная система решена в среде имитационного моделирования Mathlab Simulink, что позволяет автоматизировать процесс расчета и наглядно представлять результаты. Данная модель позволила исследовать влияние на процесс охлаждения таких факторов, как скорость движения воздуха, начальная температура воздуха, вид зерновой культуры, хранящейся в силосе. Исследовались три зерновые культуры, которые выбраны таким образом, чтобы характеристики зерна существенно различались: пшеница, кукуруза, рапс. Необходимые данные для расчета каждой зерновой культуры приведены в таблице 8.

Таблица 8. Теплофизические свойства зерновых культур.

Зерновая культура	C_p , кДж/кг × К	λ , Вт/м × К	$\rho_{\text{нас}}$, кг/м ³	$d_{\text{экв}}$, мм
Пшеница	2450	0,315	850	3,5
Кукуруза	1870	0,48	750	7,6
Рапс	2600	0,16	650	2,1

Исследования проводились для скорости движения воздуха от 0,01 до 0,1 м/с, и температуры воздуха от 1 до 30 °С. Высота слоя зерна составляла при этом 10 м, начальная температура зерна в слое равна 30 °С.

Влияние скорости воздуха на длительность процесса охлаждения является существенным. Зависимости температур от времени в верхнем слое пшеницы представлены на рисунке 20. Видно, что при увеличении скорости от 0,02 до 0,1 м/с время охлаждения слоя с температуры 30 до 15 °С уменьшается от $10,4 \times 10^5$ до $4,1 \times 10^5$ секунд (от 288 до 114 часов) [120].

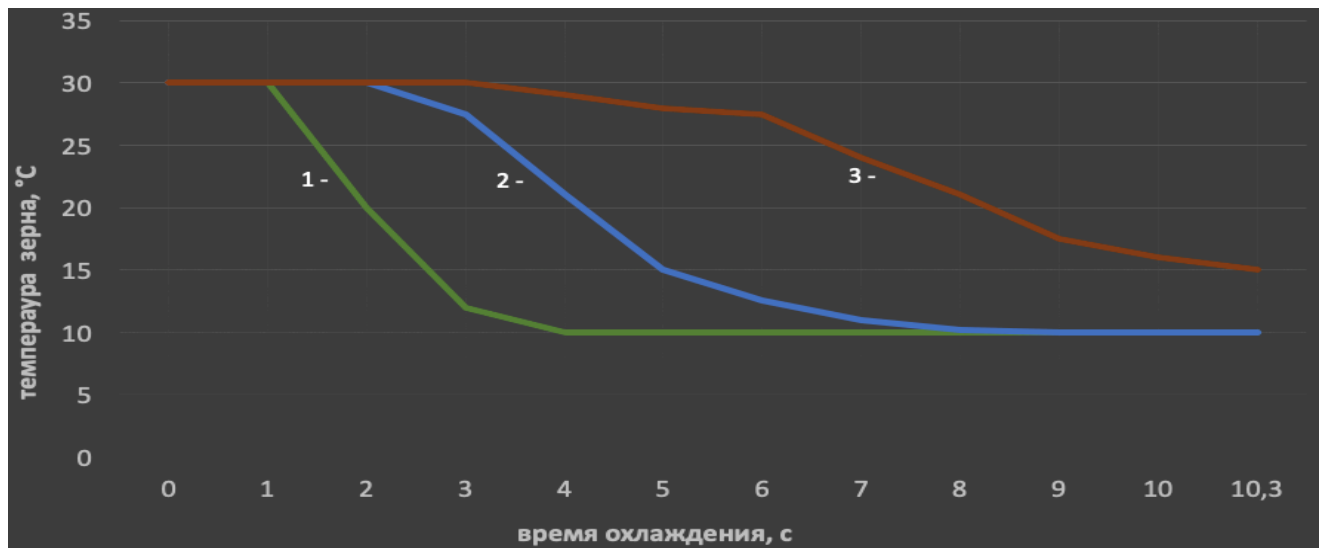


Рисунок 30 – Изменение температуры в верхнем слое зерна пшеницы с течением времени при различных скоростях воздуха «3» - 0,05 м/с; «2» - 0,1 м/с; «1» - 0,2 м/с

Скорость изменения температуры в верхнем слое зерна будет существенно разной и увеличиваться с увеличением градиента температур для зерна пшеницы. Влияние параметров зерновых культур представлено на рисунке 31.

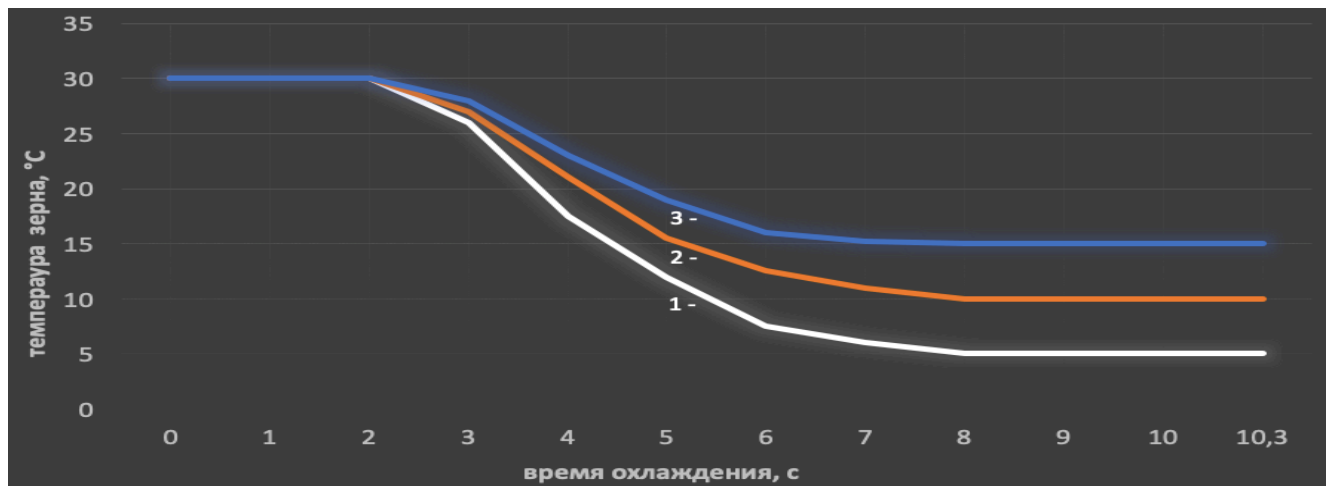


Рисунок 31 – Изменение температуры в верхнем слое зерна с течением времени при различных начальных температурах воздуха («1» - 5 °C, «2» - 10 °C, «3» - 15 °C).

Таким образом, полученная математическая модель и программа расчета позволяет проводить расчеты тепловых режимов для зерна пшеницы, причем, как при постоянных, так и при изменяющихся скоростях и температурах воздуха на

входе МСБЕ [72]. Решение тепловой задачи станет основной для решения задачи с изменением влагосодержания зерна.

3.7. Модель процесса нагрева и обезвоживания зерна.

На экспериментальной установке нагрев зерновой массы происходил при помощи нагревательного кабеля. Рассмотрим процесс нагрева и обезвоживания зерна, с учетом десорбции, протекающим в нем. Зерно охарактеризуем следующими параметрами:

D_0 – средний диаметр зерна, м;

D_Δ - среднее квадратическое отклонение диаметра зерна, м;

ρ - плотность (сухого) материала зерна, кг/м^3 ;

C_p - удельная теплоемкость (сухого) материала зерна, $\text{кДж/кг}\times\text{К}$;

λ – теплопроводность (сухого) материала зерна, $\text{Вт/м}\times\text{К}$;

ρ_v - средняя влажность зерна;

r - удельная теплота парообразования свободной воды, Дж/кг ;

E – плотность теплового потока, Вт/м^2 ;

L_5 - коэффициент поглощения поверхностью зерна тепла [113].

Примем диаметр абстрактного зерна равным $D_0 = 1$ [мм], (радиус $R_0 = 0,5$ мм) плотность, удельную теплоемкость и теплопроводность материала зерна примем равными соответственно $\rho = 1300$ [кг/м^3] (пшеница) [113]. $C_p = 1,6$ [$\text{кДж/кг}\times\text{К}$] (средняя величина), $\lambda = 0,2$ [$\text{Вт/м}\times\text{К}$] (среднее для вещества зерен). Для оценок примем также $L_5 = 0,5$ и $E = 20 \times 10^3$ [Вт/м^2], $r = 2400 \times 10^3$ [Дж/кг]. Тогда площадь поверхности зернышка составит [113]:

$$S = 4\pi R^2 = 3,14 \times 10^{-6} [\text{м}^2], \quad (42)$$

Примем эффективно освещаемую площадь как $q=50\%$, оценим поглощаемую мощность величиной

$$P_s = q L_s S E = 1,6 \times 10^{-2} [\text{Вт}], \quad (43)$$

Объем зернышка равен

$$V=(4/3) \pi R^3=5,2 \times 10^{-10} [\text{м}^3], \quad (44)$$

Масса зернышка

$$m=V \rho =6,2 \times 10^{-7} [\text{кг}], \quad (45)$$

Теплоемкость

$$C_m=mC_p=10 \times 10^{-4} [\text{Дж/К}], \quad (46)$$

Скорость нагрева

$$X=P_s/C_m=16 [\text{К/с}], \quad (47)$$

Для начальной влажности зерна 20 % и конечной влажности 8 % ($p_v=0,12$), испаряемая масса воды в рассматриваемом условном зернышке составит $0,62 \times 10^{-7} [\text{кг}]$, а теплота ее парообразования $W_R=0,15 [\text{Дж}]$, что в 3,3 раз превышает энергию, затраченную на нагрев зернышка. При сделанных допущениях можно нагреть зернышко и испарить влагу за 12 секунд [113].

При сделанных выше оценках не учитывалась энергия сорбции влаги на внутренних поверхностях капилляров зерна. Оценим предельную максимальную величину этой энергии. Если бы зерно имело такую же развитую внутреннюю поверхность как у активированного угля ($1500 [\text{м}^2/\text{г}]$) [113]

$$S\sigma/V=0,75 \times 10^9 [\text{м}^2/\text{м}^3], \quad (48)$$

то тогда, с учетом поверхностного натяжения воды $\sigma =7.3 \times 10^{-2} [\text{Дж/м}^2]$

можно оценить энергию сорбции воды в зерне как

$$W_Q=\sigma(S\sigma/V) \times V=2,8 \cdot 10^{-2} [\text{Дж}], \quad (49)$$

что сравнимо с энергией, требуемой для нагрева зерна и в 7 раз меньше энергии нагрева и испарения воды. Фактически в зернах эта энергия еще меньше, и она не проявляется, пока влажность зерна не становится ниже 6-8 %. Далее в расчетах этой энергией можно пренебречь. При времени обработки зерна (t) затраченная энергия равна [113]

$$W_{st}=qL_sSE_t=W_R+C_m\Delta T=\text{const} \times V, \quad (50)$$

где ΔT – нагрев зерна

Из формулы (50) видно, что левая часть равенства пропорциональна $S = \text{const} \times R_2$, а правая часть пропорциональна $V = \text{const} \times R_3$, тогда, поделим левую и правую часть уравнения (50) на $qL_s R^2$, получим,

$$t = \text{const} \times R (qL_s)^{-1} \quad (51)$$

Приведенные выше оценки дают суммарное время сушки зерна 12 секунд. Такая оценка близка к нашим экспериментальным данным. Более точные оценки подразумевают анализ свойств размеров отсортированного по фракциям зерна с оптимальным временем сушки для каждой из фракций [113].

Следовательно, именно условия нагрева, коэффициент поглощения, удельная теплота парообразования и средняя влажность зерна определяют необходимое время сушки при условии свободного оттока водяных паров от поверхности зерен [113].

Рассмотрев соотношение между тремя видами энергии (теплота нагрева, энергия сорбции, теплота парообразования), можно заметить, что теплота парообразования примерно в 4 раза превосходит сумму энергии нагрева зерна и сорбции воды в капиллярах. Это означает, что при небольшом превышении оптимального времени сушки температура пересушенного зерна может возрасти во времени очень быстро, что может испортить зерно. Поэтому конечное значение влажности самых мелких зерен после сушки 6-8 % видимо может считаться оптимальным нижним пределом влажности обработанного зерна при сохранении его жизнеспособности. После обработки фракции зерна мелкие зерна оказываются несколько пересушенными, а крупные – недосушенными, но после, собранные между собой зерна перераспределяют влагу между собой. В итоге влажность на уровне 10-12 % позволяет оставаться зерну жизнеспособным [113].

До сих пор не была учтена вариация диаметра зерен. Время просушки зерна пропорционально его диаметру.

Реальные размеры зерен приведены ниже в таблице 7 [113]. Следует учитывать, что приведенные в таблице размеры соответствуют не отсортированному, исходному материалу. Для проведения же качественной термообработки зерно желательно предварительно сортировать на фракции по

их размерам, причем в каждой фракции отношение максимального и минимального диаметра зерен не должно быть более 1,15, что обеспечит качественную сушку [113].

Таблица 9. Геометрическая характеристика зерна хлебных и крупяных культур [113]

Куль-тура	Линейны размеры, мм			Объем $V, \text{ м}^3$	Площадь верхней поверх- ности $F, \text{ мм}^2$	Сферичн ость ψ	Отноше- ние $V/F, \text{ мм}$
	Дли- на l	Шири- на a	Тол- шина b				
Пше- ница	4,2-8,6	1,6-4,0	1,5-3,8	19-42	40-75	0,82-0,85	0,49-0,64

На процесс сушки зерна в наибольшей степени влияет приведенный в таблице 9 параметр сферичности и параметр отношения V/F . Кроме этих параметров может также существенно сказываться влияние сетки транспортера в том случае, когда ориентация несферических зерен на сетке оказывается хаотической за счет препятствия перекачиванию и самоориентации зерен на ленте транспортера. Приведенные выше оценки времени просушки зерна, приведенные для сферического зерна диаметр 1 мм, легко пересчитываются для зерен с реальной формой и размером [113].

Приближенные значения теплофизических характеристик для некоторых зернопродуктов при температуре $T = 293 \text{ К}$ (20°C), указанных влагосодержании и насыпной плотности даны в таблице 10 [113].

Таблица 10. Приближенные значения теплофизических характеристик для пшеницы при температуре $T=293 \text{ К}$ (20°C)

Зерно- продукт	Влагосо- держание, %	Насыпная плотность, кг/м^3	Тепло- емкость, $\text{Дж(кг}\cdot\text{К)}$	Теплопро- водность	Температура- проводность, $\text{м}^2/\text{с}$
-------------------	----------------------------	---	--	-----------------------	---

Пшеница	10	860	1587	0,121	8,87
---------	----	-----	------	-------	------

Выше были перечислены существенные основные параметры, влияющие на ход и результат сушки зерна, сделаны приблизительные оценки и кратко рассмотрено их согласие с экспериментом. Однако данный расчет основывается на больших допущениях, что не позволяет нам использовать его в качестве модели сушки зерна в условиях термического нагрева [113].

Если представить процесс влагопереноса в капиллярно-пористом теле на молекулярном уровне, то, в соответствии с имеющимися на данный момент представлениями, при нарушении равновесия системы свободные молекулы воды, находящиеся в межмолекулярном пространстве материала, под действием градиента давления, вызванного той или иной причиной, начинают индивидуально (молекулярно) или коллективно (молярно) перемещаться. Данное положение принято практически во всех рассматриваемых моделях внутреннего влагопереноса [113].

Причинами возникновения градиента давления, могут быть градиенты концентрации или температуры, связанные с локальной разницей во влагосодержании или температуре смежных зон материала. При этом в обезвоживаемых зонах нарушается и адсорбционное равновесие - молекулы воды с активных центров (клястеров) десорбируют в межмолекулярное пространство. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не восстановится равновесие, другими словами. материал не достигнет равновесного влагосодержания [113].

Исходя из этого, рассмотрим процесс влагопереноса в зерне в условиях теплового нагрева. При нагреве зерновки в результате десорбции влаги в объеме зерновки образуется избыточное давление, которое, учитывая кратковременность процесса нагрева и высокую температуру, особенно в приповерхностных слоях, можно принять за движущую силу молярного переноса пара. Однако избыточное давление это - ненаблюдаемая и неконтролируемая величина, поэтому необходимо установить ее связь с температурой и влагосодержанием [113].

Поскольку скорость миграции молекул воды, а, следовательно, и скорость обезвоживания, зависят от градиента давления в межмолекулярном пространстве, значит, обезвоживание определяется парциальным давлением паров воды, в данном случае - состоянием пара над сорбирующей поверхностью [113].

Воспользуемся выражением для давления насыщенного пара связанной воды.

$$p = \varphi(U, T)p_0 = p_0 e^{-\frac{T_a}{T}}, \quad (52)$$

где $\varphi(U, T)$ - уравнение десорбции влаги;

U – влагосодержание, г/кг;

T – температура;

P_0 - давление насыщенного пара свободной воды при температуре T ;

$T_a = [r\mu + \varepsilon(U, T)]/R$ - температура активации связанной воды, К;

$r = 2,256 \times 10^6$ – удельная теплота парообразования (энергия активации) для свободной воды, Дж/кг;

$\mu = 18 \times 10^{-3}$ – молярный вес пара, кг/моль;

$R = 8,314$ – универсальная газовая постоянная, Дж/моль.

Давление пара для свободной воды

$$p_0 = p_{00} \cdot e^{\frac{r\mu}{R} \left(\frac{1}{T_{00}} - \frac{1}{T} \right)}, \quad (53)$$

После подстановки (53) в (52) и преобразования, выражение (52) приводим к виду

$$p(T, U) = A_{00} \varphi(U, T) e^{-\frac{T_{a0}}{T_0 + \Delta T}}, \quad (54)$$

или

$$p(T, U) = A_{00} e^{-\frac{T_a}{T_0 + \Delta T}}, \quad (55)$$

где $A_{00} = p_{00} \exp(\lambda\mu/RT_{00})$;

$T_{a0} = r\mu/R = 5413 - 4883$ К (в зависимости от температуры);

ΔT - приращение температуры (в общем случае функция времени);

T_0 – исходная температура продукта, К;

t – время.

Если пренебречь давлением во внешней среде и за движущую силу процесса влагопереноса принять внутреннее давление пара, то с учетом (54) можно записать [113]

$$\frac{dU}{dt} = -A\varphi(U, T) \times e^{-\frac{T_{a0}}{T_0 + \Delta T}}, \quad (56)$$

где A – коэффициент, полученный эмпирическим путем, с^{-1} ;

$\varphi(U, T)$ – функция десорбции влаги;

U – влагосодержание, г/кг ;

T – температура, К ;

$T_{a0} = r\mu/R = 4893$ – температура активации, К ;

$r = 2,256 \times 10^6$ – удельная теплота парообразования свободной вода при 373 К , Дж/кг ;

$\mu = 18 \times 10^{-3}$ – молярный вес пара, кг/моль ;

$R = 8,314$ – универсальная газовая постоянная, Дж/моль ;

T_0 – исходная температура продукта, К ;

ΔT – приращение температуры (в общем случае функция времени), К .

Дальнейшая конкретизация модели (56) возможна при явном представлении зависимости для функции, например, в виде $\varphi(U)$. В общем случае φ может быть представлена как возрастающая функция влагосодержания U , поскольку ее изменение обусловлено активностью связанной воды и конфигурацией поля влагосодержания в объеме продукта. Попытка теоретизировать на эту тему приводит к громоздким неудобоваримым выражениям. Поэтому, как часто поступают в подобных случаях, ограничимся степенной зависимостью [113] вида:

$$\varphi(U) \sim U^m, m > 0 \quad (57)$$

С снижением влагосодержания скорость испарения снижается, что качественно соответствует периоду падающей скорости сушки [113].

К квазиизотермическому относится процесс сушки при постоянной температуре $T = \text{const}$ или, когда постоянная времени нагрева (время выхода температур продукта на стационарный уровень) много меньше периода

термообработки. В этом случае зависимость (52) с учетом (53) легко интегрируется, приводя к выражениям [113], записанным ниже:

$$BU_0^{(1-m)} \left(\frac{1 - \frac{U^{(1-m)}}{U_0}}{1 - m} \right) = e^{-\frac{T_{a0}}{T}t}, \quad m \neq 1 \quad (58)$$

$$t = B \frac{U_0^{(1-m)} \left(1 - \frac{U^{(1-m)}}{U_0} \right)}{(1 - m) e^{-\frac{T_{a0}}{T}t}}, \quad m \neq 1 \quad (59)$$

$$-BLn \frac{U}{U_0} = e^{-\frac{T_{a0}}{T}t}, \quad m = 1 \quad (60)$$

$$\frac{U}{U_0} = e^{-\frac{T_{a0}}{T}t/b}, \quad m = 1 \quad (61)$$

$$t = -B \frac{Ln \frac{U}{U_0}}{e^{-\frac{T_{a0}}{T}t}}, \quad m = 1 \quad (62)$$

где U_0 -исходное влагосодержание, кг/кг;

B, m -эмпирические коэффициенты.

При этом оценка коэффициентов по экспериментальным данным $U(t)$ при различных фиксированных температурах термообработки не представляет труда [113].

3.8. Зависимость кислотного числа жира от условий хранения зерна пшеницы в металлических силосах большой ёмкости

Было установлено, что снижение органолептических показателей зерна пшеницы, определяющих сроки безопасного хранения и годности, связаны с изменениями в липидном комплексе за счёт активности фермента липазы. Липаза в процессе хранения расщепляет триглицериды зерна до глицерина и свободных жирных кислот, которые в зерновых культурах представлены в основном тремя

ненасыщенными жирными кислотами: олеиновой, линолевой, линоленовой с одной, двумя, тремя двойными связями соответственно. Этот процесс приводит к изменению органолептических показателей, прежде всего, к ухудшению вкуса и запаха. Установлено, что эти изменения достоверно отражает показатель кислотное число жира (КЧЖ).

Проведенное аналитическое исследование опубликованных по теме материалов показало:

- значение КЧЖ, определяющее срок безопасного хранения продовольственного зерна пшеницы, не установлен и по различным литературным источникам колеблется от 11 до 23 мг КОН на 1 г жира;

- срок созревания пшеничной муки после помола по литературным данным также не установлен и составляет от 10 дней до двух месяцев;

- показатель, определяющий срок созревания пшеничной муки, не стандартизирован (кислотность, КЧЖ, качество клейковины, качество хлеба).

При хранении зернопродуктов с влажностью, предусмотренной целевыми стандартами, гидролитические процессы продолжаются и тем интенсивнее, чем выше температура и относительная влажность воздуха в хранилище [73]. В результате происходит накопление продуктов гидролиза: свободные жирные кислоты при гидролизе липидов, аминокислоты при частичном распаде водорастворимых белков, кислые фосфаты при распаде фитина и других.

Для выяснения изменения влажности на процесс созревания пшеничной муки этот показатель определялся еженедельно. Результаты представлены в таблице 11.

Таблица 11. Изменение влажности свежесмолотой пшеничной муки в процессе созревания при хранении

№	№ пробы	Влажность, %								
		зерно	мука, сроки хранения, недель							
			Исх.	1	2	3	4	5	6	7
1	8	10,5	13,7	13,5	13,5	13,6	13,6	13,6	13,8	13,7
2	9	8,9	13,0	13,1	13,0	13,0	13,0	13,0	12,9	13,0
3	71	12,5	14,8	14,3	14,3	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3
4	76	12,1	14,6	14,8	14,7	14,8	14,8	14,7	14,7	-
5	26	9,2	13,9	13,9	13,8	13,9	13,9	13,8	13,9	13,8
6	5	10,2	13,7	13,8	13,7	13,7	13,7	13,6	13,8	13,7
7	11	10,7	14,3	14,0	14,3	14,2	14,1	14,1	14,1	-
8	75	12,0	14,5	14,5	14,4	14,4	14,3	14,2	14,1	-
9	13	7,4	13,7	14,1	13,7	13,9	13,9	13,8	13,8	-
10	21	9,5	13,6	13,7	13,7	13,7	13,7	13,5	13,4	-
11	12	7,1	14,0	14,4	14,3	14,3	14,3	14,1	14,0	-
12	18	9,3	14,2	14,1	14,2	14,0	14,1	14,0	-	-

Анализ приведенных результатов в таблице 11 показывает, что влажность продовольственного зерна пшеницы изменялась в пределах от 7,1 до 12,5 %, а влажность, выработанной из него муки составила от 13,0 до 14,8 %. Следует отметить, что в процессе созревания муки каждой исследуемой пробы влажность изменялась в пределах допустимых расхождений при контрольных определениях (0,5 %) этого показателя; что исключает её влияние на изменение значения КЧЖ муки.

В таблице 12 приведены результаты определения КЧЖ продовольственного зерна пшеницы и выработанной из него муки в процессе созревания.

Таблица 12. КЧЖ продовольственного зерна пшеницы и выработанной из него муки в процессе созревания

№	№ пробы	КЧЖ, мг КОН на 1 г жира								
		зерна	Сроки хранения, недель							
			Исх.	1	2	3	4	5	6	7
1	8	9,1	15,9	17,1	18,0	-	20,5	21,8	20,8	20,2
2	9	9,5	15,6	16,9	18,4	-	21,3	21,3	21,9	21,5
3	71	12,3	16,4	17,4	22,4	23,4	24,8	27,8	28,5	28,4
4	76	13,9	23,0	23,6	28,2	31,6	32,5	33,5	33,4	-
5	26	14,7	21,6	21,7	22,8	-	24,3	26,0	24,9	26,5
6	5	14,9	19,2	20,0	22,8	-	24,9	30,8	29,4	28,9
7	75	17,0	31,0	35,3	35,4	37,7	35,5	37,8	37,2	-
8	11	18,5	27,0	30,9	31,7	32,9	35,6	35,0	35,0	-
9	13	22,7	38,6	38,9	42,5	43,9	43,6	43,8	43,6	-
10	21	27,4	40,0	40,6	44,5	48	50,3	47,9	-	-
11	12	29,2	53,8	57,0	59,5	63,2	60	63,1	61,2	61,1
12	18	34,2	52,9	51,9	54,3	53,8	53,2	53,1	-	-

Анализ полученных данных показывает, что КЧЖ свежесмолотой муки значительно выше КЧЖ зерна, из которого она выработана, для всех исследованных проб. Это различие близко к различию между кислотностью зерна и кислотностью свежесмолотой муки. Однако, если в процессе созревания муки кислотность практически не изменялась, то КЧЖ муки изменялось существенно в

течение всего периода созревания всех исследованных проб. Отмечено, что срок созревания каждой пробы пшеничной муки отличался друг от друга, - чем выше КЧЖ продовольственного зерна, чем оно «старее», тем срок созревания ниже при одних и тех же условиях хранения, и близких значениях влажности муки [118] (таблица 12).

Для выполнения исследований по длительному лабораторному хранению выбраны две партии продовольственного зерна пшеницы 3-го класса урожая 2015 и 2018 г. Основные показатели качества этих партий приведены в таблице 13.

Таблица 13. Основные показатели качества продовольственного зерна пшеницы 3 - го класса урожая 2015 и 2018 г., заложенные на длительное лабораторное хранение

Год урожая	Влаж- ность, %	Кислот- ность, град	КЧЖ, мг КОН на 1 г жира	Клейковина			ЧП, сек.
				Кол- во, %	Качество, ед. ИДК	Группа качества	
2018	13,1	0,9	17,0	23,8	60	I хор.	284
2015	13,2	1,5	24,4	22,8	60	I хор.	392

Анализ показателей, приведенных в таблице 13, показывает, что заложенное на лабораторное хранение продовольственное зерно пшеницы 3-го класса отвечает требованиям ГОСТ 9353-2016:

- влажность зерна – 13,1 и 13,2 % (по ГОСТ 13586.5 – 2015 – не более 14 %);
- ЧП – 284,392 (по ГОСТ 30498-97 – не менее 150);
- количество клейковины – 23,8 и 22,8 % (не менее 22 % по ГОСТ 27839-2013); ИДК – 60 ед. прибора для обеих партий (18 – 102 ед. прибора по ГОСТ 27839-2013); группа качества I хор.

Зерно каждой партии в количестве от 25 до 30 кг размещено в холодильнике

при $T =$ от 2 до 10 °C в термостатах при $T = 20$ и 30 °C и относительной влажности воздуха 65 %.

Для установления предельного срока годности зерна пшеницы при длительном хранении, рассматривается показатель – кислотное число жира (КЧЖ) в мг КОН. Была принята следующая методика. Образцы зерна помещали в эксикаторы над растворами солей, с помощью которых была задана определенная относительная влажность воздуха над поверхностью раствора, таблица 14. Образцы зерна пшеницы хранили в эксикаторах с апреля по ноябрь 2018 года при комнатной температуре от 20 до 25 °C и 30 °C – в термостатах. В таблице 14 представлены насыщенные растворы солей для задания значений относительной влажности воздуха.

В эксикаторы заливали растворы солей для создания заданной относительной влажности воздуха во внутреннем объеме эксикатора. Значения относительной влажности воздуха над солевыми растворами представлены в таблице выше.

Образцы зерна пшеницы, перед закладкой на хранение в эксикаторы, были очищены от примесей на воздушно-ситовом лабораторном сепараторе.

В эксикаторы были помещены по два образца зерна пшеницы III и IV класса массой около 500 г каждый, слой зерна в эксикаторах составил от 70 до 80 мм. Для контроля, внутрь образцов зерна были помещены датчики температуры и относительной влажности воздуха «Логгер 100 ТВ». Интервал автоматической записи показаний датчиков составлял 2 часа.

Таблица 14. Растворы солей для задания необходимых значений относительной влажности воздуха

Номер эксикатора	Равновесная влажность зерна, достигаемая при хранении образца, %	Относительная влажность, заданная в эксикаторе по таблице солей, %	Наименование насыщенного раствора соли	Средняя ожидаемая температура хранения, °C
1	12,4	55	Бихромат натрия $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	20

Номер эксикатора	Равновесная влажность зерна, достигаемая при хранении образца, %	Относительная влажность, заданная в эксикаторе по таблице солей, %	Наименование насыщенного раствора соли	Средняя ожидаемая температура хранения, °С
2	10,5	35	Магний хлор $MgCl_2$	20
3	13,7	65	Нитрат аммония $NH_4(NO_3)$	20
4	11,2	45	Карбонат калия $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$	20
5	12,8	60	Нитрат аммония $NH_4(NO_3)$	30
6	11,2	45	Карбонат калия $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$	10
7	15,1	75	Хлорид натрия $NaCl$	20

Периодически производили отбор проб зерна из каждого эксикатора для проведения определения КЧЖ, также контролировали изменение влажности.

В таблице 15 представлены фактические значения равновесной влажности зерна и относительной влажности воздуха в эксикаторах.

Таблица 15. Средние фактические значения относительной влажности и температуры в эксикаторах за период апрель–октябрь

№ эксикаторов	Среднее значение равновесной влажности зерна, в эксикаторе при хранении образца, %	Фактическое значение относительной влажности воздуха, %	Название соли	Средняя фактическая температура хранения в эксикаторах, °С
4	11,0	44÷46	Карбонат калия $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$	23,8÷24,3
1	11,8	55÷57	Бихромат натрия $Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$	-
3	12,9	65÷66	Нитрат аммония $NH_4(NO_3)$	

№ эксикаторов	Среднее значение равновесной влажности зерна, в эксикаторе при хранении образца, %	Фактическое значение относительной влажности воздуха, %	Название соли	Средняя фактическая температура хранения в эксикаторах, °С
7	14,3	75÷76	Хлорид натрия NaCl	
6	11,5	45÷49	Карбонат калия $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$	9,5
2	10,1	33÷36	Магний хлор $MgCl_2$	25
5	12,8	63	Нитрат аммония $NH_4(NO_3)$	29,5

На рисунке 32 показано как изменялась относительная влажность воздуха в эксикаторах во время хранения образцов зерна.

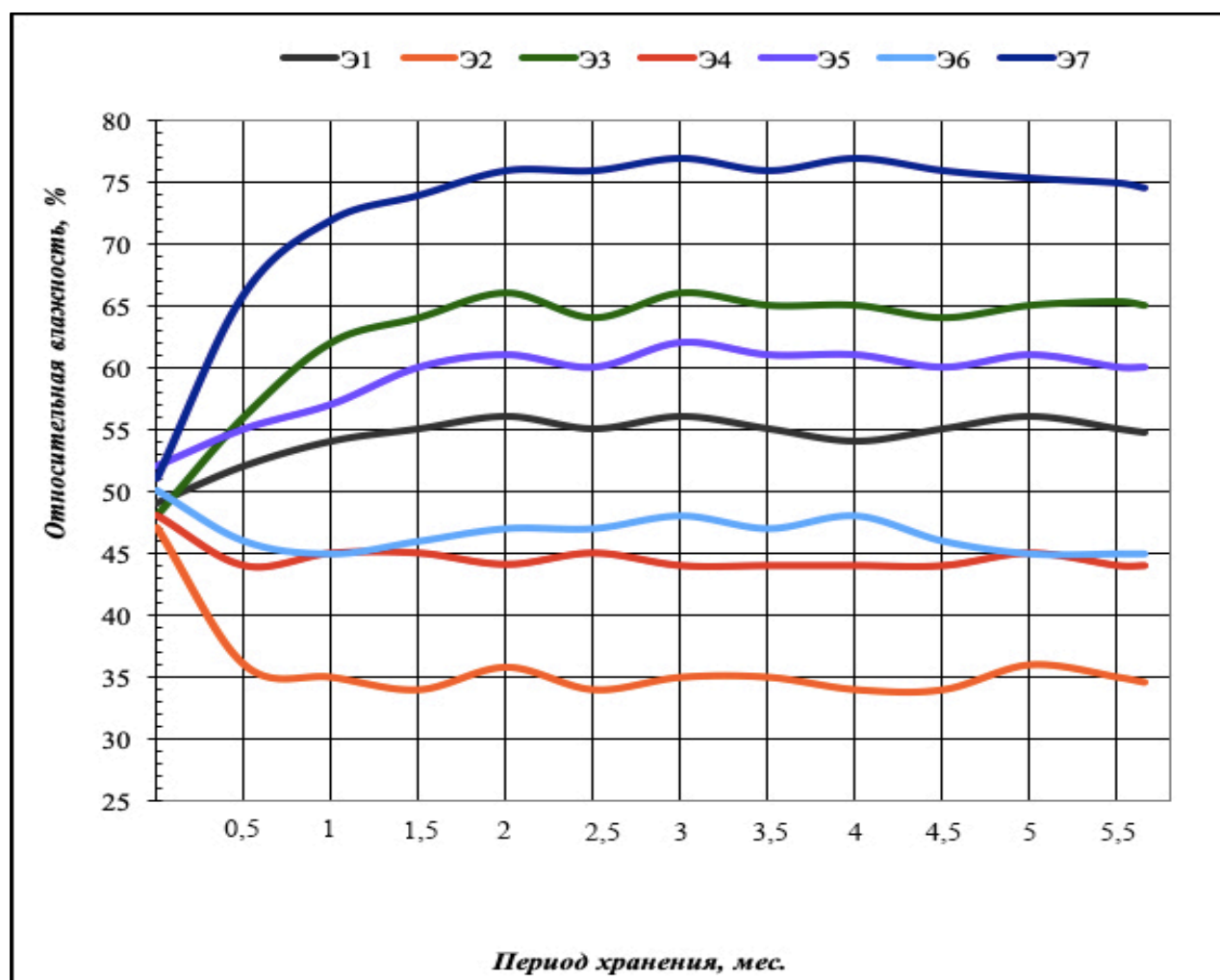


Рисунок 32 – Изменение относительной влажности воздуха в эксикаторах с образцами зерна. (Э1...Э7 номера эксикаторов в соответствии с таблицей 11)

Из рисунка 33 можно видеть, что влажность образцов зерна в эксикаторе с относительной влажностью воздуха 75 % достигла равновесного значения от 14 до 15 % ко второму месяцу хранения от значения начальной влажности 11 %.

В эксикаторах с меньшими значениями относительной влажности воздуха равновесное состояние наступило через месяц хранения и далее практически не изменялось.

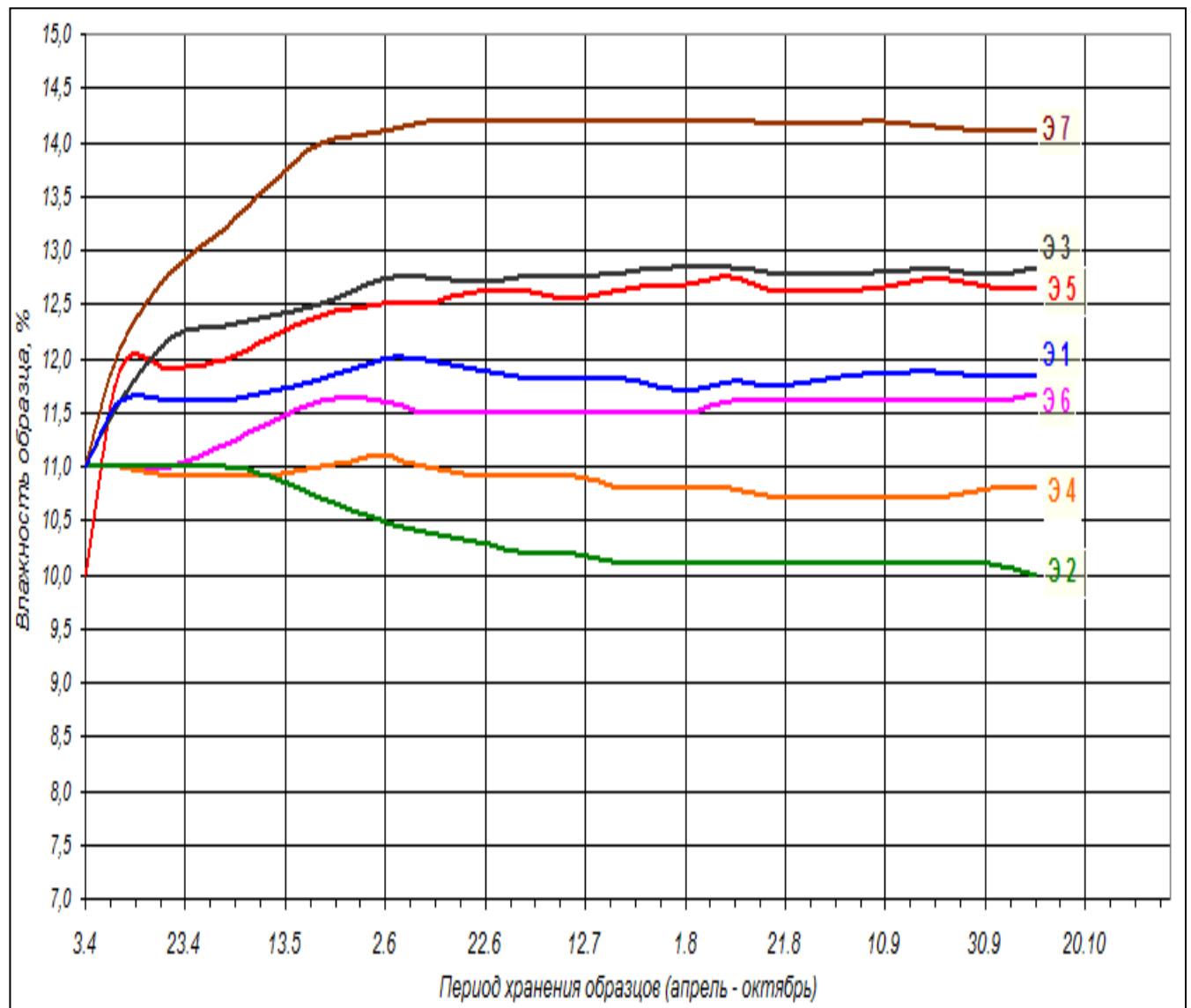


Рисунок 33 – Изменение влажности образцов зерна в эксикаторах в период хранения (Э1...Э7 номера эксикаторов в соответствии с таблицей 11)

Некоторые колебания значений относительной влажности при дальнейшем хранении, как видно из рисунков 32, связаны с изменениями температуры в месте хранения (помещение лаборатории), а также с моментами открытия эксикатора при взятии образцов зерна для определения влажности и КЧЖ.

Во всех образцах зерна (эксикаторах) значения относительной влажности воздуха (рисунок 32) и температуры (рисунок 34) можно считать постоянными в пределах точности измерения датчиком с учетом колебания температуры в лаборатории.

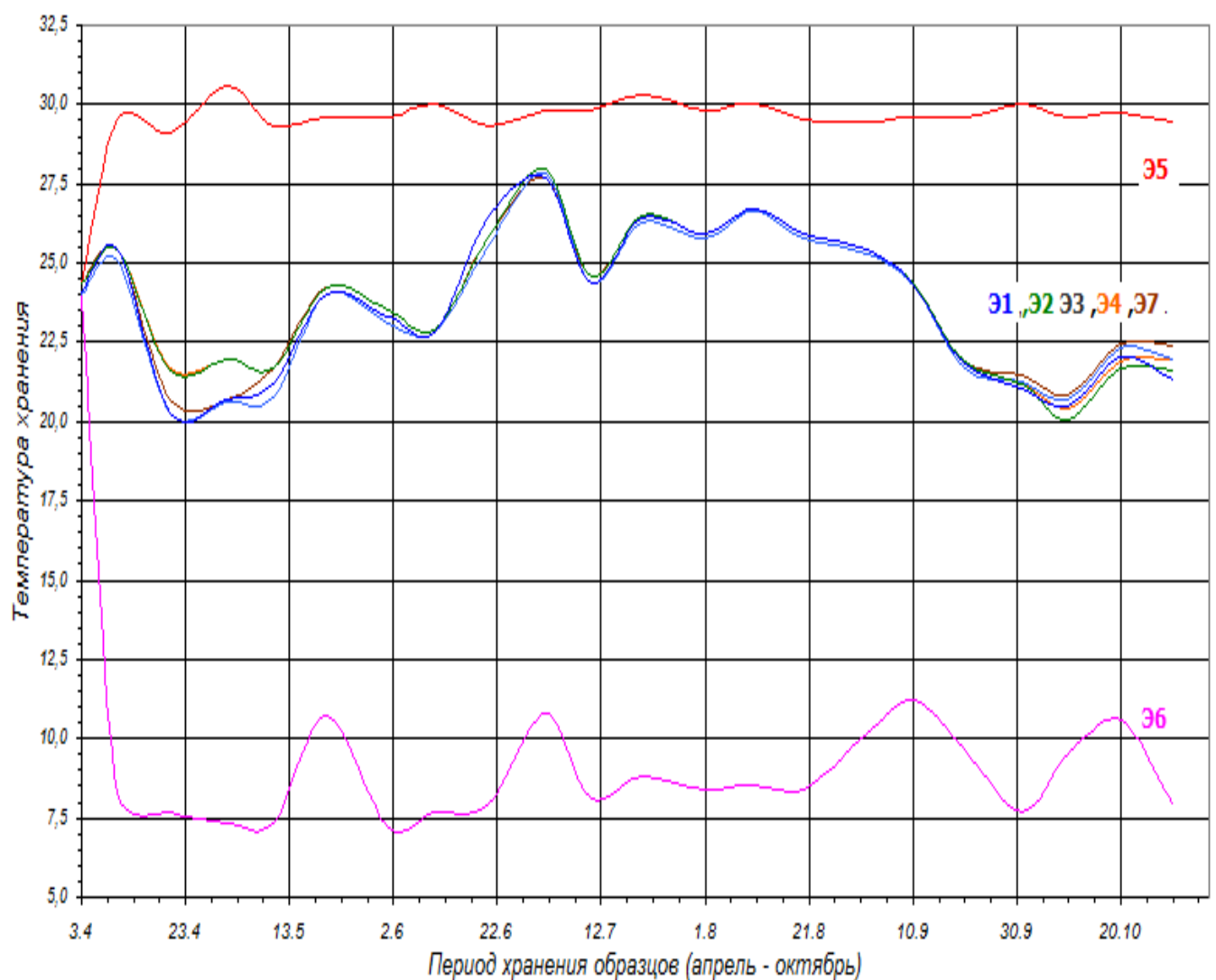


Рисунок 34 – Изменение температуры в эксикаторах в период хранения (Э1...Э7 номера эксикаторов в соответствии с таблицей 11)

Кислотное число жира в образцах зерна определяли по ГОСТ 31700-2012. Относительная погрешность метода составляла 10 %. Рассматривая графики (рисунок 35) изменения кислотного числа жира в хранящихся образцах зерна пшеницы в зависимости от относительной влажности воздуха в эксикаторе, можно отметить, что КЧЖ практически не изменяется по срокам хранения при влажности воздуха до 60 %. Значимый рост кислотного числа отмечается при относительной влажности воздуха более 70%. При этом увеличение кислотного числа существенно зависит от продолжительности хранения образцов зерна.

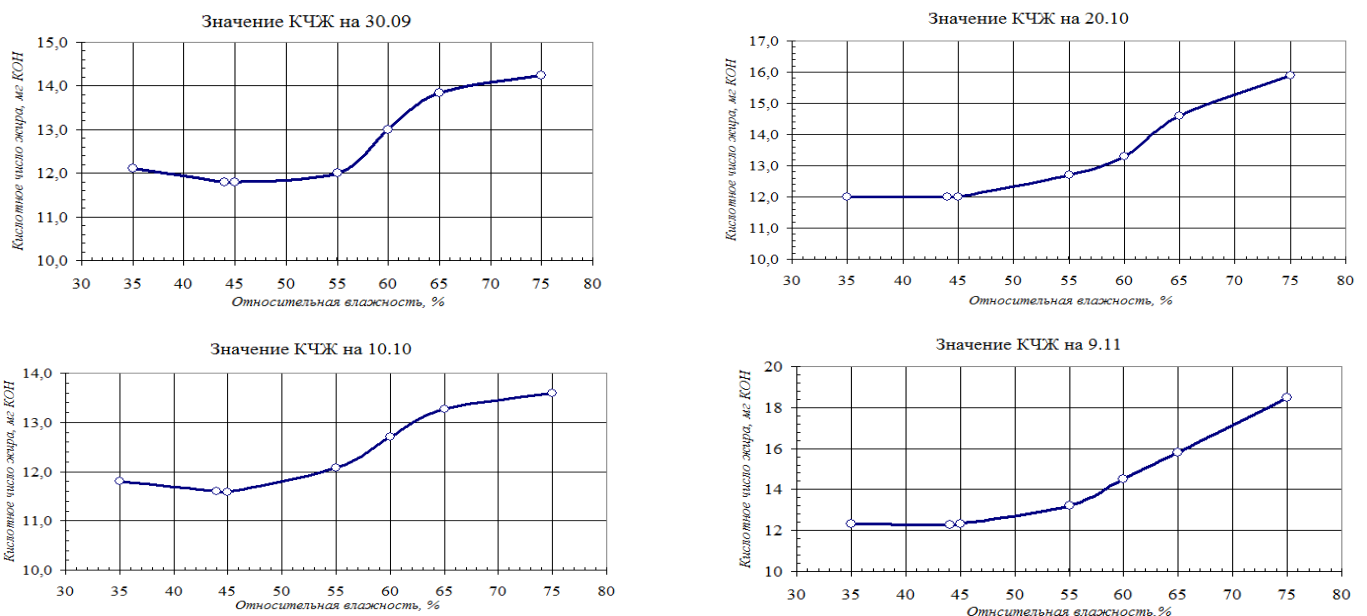


Рисунок 35 -Изменение КЧЖ в образцах зерна в зависимости от значения относительной влажности воздуха в период хранения

Значимое изменение кислотного числа жира (рисунок 36) наступает практически после 6 месяцев хранения образцов, во второй декаде сентября. На рисунке отмечено красной вертикальной линией.

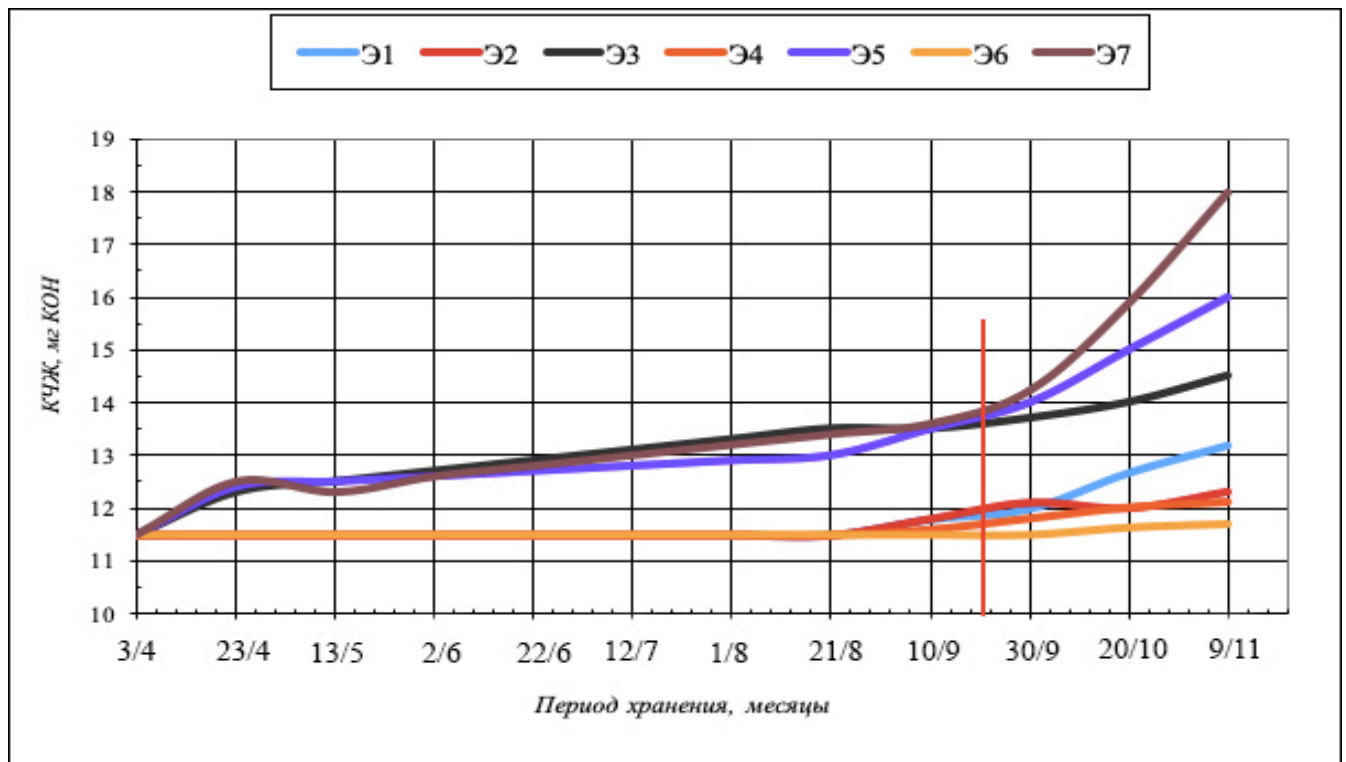


Рисунок 36 – Изменение КЧЖ в образцах зерна за период апрель-ноябрь

Лабораторное хранение образцов зерна пшеницы в эксикаторах с различными условиями по температуре и относительной влажности воздуха подтверждает, что изменение влажности зерна при хранении соответствует заданной относительной влажности воздуха внутри эксикатора [74]. Равновесное состояние наступает за период хранения от 3 до 8 недель с учетом значения относительной влажности воздуха.

Температура хранения и относительная влажность воздуха в эксикаторе влияет на изменение (рост) КЧЖ. Наибольшие изменения наступали на 6 и 7 и 8 месяцах хранения при относительной влажности воздуха более 65 % и температуре выше 20 °С.

При температуре хранения 10 °С, во всех случаях рост КЧЖ оставался незначительным и находился в пределах точности определения. Отмечено, что при значениях относительной влажности воздуха ниже 60 %, КЧЖ зерна пшеницы при этой температуре за 6 месяцев хранения практически не меняется.

По итогам хранения образцов зерна пшеницы в условиях различной температуры и относительной влажности воздуха в течение 8 месяцев можно отметить, что температура хранения в условиях эксперимента не влияет

значительно на рост кислотного числа жира в образцах. Более существенную роль по увеличению показателя КЧЖ играет относительная влажность воздуха в зерновой массе.

Выводы по третьей главе

Была 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

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 [110].

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.

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.

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.

Установлено, что температура хранения не оказывает значительного влияния на рост кислотного числа жира в образцах. Более существенную роль по увеличению показателя КЧЖ играет относительная влажность воздуха в зерновой массе.

ГЛАВА 4. Оценка эффективности металлических силосов большой емкости по удельному расходу электроэнергии на вентилирование зерна

Действующими нормативными документами допускается хранение в металлическом силосе сухого (влажностью не более 14 %), чистого, не заражённого и охлаждённого зерна. Доведение зерна до сухого и чистого состояния обеспечивается с помощью послеуборочной обработки (сушки, сепарирования и т.д.). Зерно охлаждают в силосе, как правило, наружным, более холодным, воздухом при помощи установок активного вентилирования [75]. Затраты на вентилирование составляют основную статью затрат на хранение зерна [5].

Эти затраты состоят из двух частей: полезной работы на преодоление сопротивления слоя зерна и второстепенной, связанной с потерями энергии в воздуховодах, каналах, перфорированном днище, при выводе воздуха из силоса, с утечками воздуха через неплотности [76]. Второстепенные затраты учитывают конструктивные особенности каждого из силосов [77]. Утечки воздуха наблюдаются в основном в нижней части силоса, в местах крепления вертикальных стенок к фундаменту [78].

Для оценки эффективности силоса как объекта технологической операции целесообразно определить долю полезной работы в общей структуре затрат, обеспечивающих сохранение качества зерна при хранении.

Распределение долей затрат зависит от степени заполнения силоса зерном. При вентилировании зерна в силосе, заполненном на 25 % от его вместимости, общие затраты делятся приблизительно поровну. При вентилировании зерна в силосе, заполненном на 75 %, полезные затраты превышают второстепенные более чем в два раза.

Для сравнения затрат на вентилирование, предлагается следующий критерий – удельные затраты электроэнергии ($\text{кВт} \times \text{ч}$) на охлаждение одной тонны зерна на 1°C . Однако этот критерий не учитывает сохранность качества зерна. Значение критерия уменьшается пропорционально уменьшению удельной подачи воздуха на

одной тонны. Чем меньше удельный расход воздуха на охлаждение, тем выше предложенный критерий оценки и рентабельнее силос для хранения. Обеспечение подачи нормативного объёма воздуха в зерновую массу для её охлаждения является основным условием сохранности зерна, исключая развитие плесеней при хранении [79].

Эффективность зернохранилища следует оценивать по удельным затратам электроэнергии на одну тонну зерна при обеспечении нормативной удельной подачи воздуха в зерновую массу не менее $10 \text{ м}^3/\text{ч} \times \text{т}$.

4.1 Экономическая эффективность хранения зерна на предприятии

Расчет технико-экономических показателей

Основными технико-экономическими показателями агрегатов, комплексов и пунктов являются часовая производительность, затраты труда и прямые затраты в расчете на одну тонну зерна, которые рассчитываются по следующим формулам:

затраты труда:

$$Z_T = O/P, \quad (63),$$

где O - обслуживающий персонал, чел.;

P - производительность, т/ч;

$$Z_T = 5/1,2 = 4,2 = 4 \text{ чел-ч/т}$$

Прямые затраты $Z_{\text{п}}$, р/т

$$Z_{\text{п}} = (A_3 + A_{\text{м}} + P_3 + P_{\text{м}} + \text{Э} + T + Z)/P_{\text{с}}, \quad (64),$$

где A_3 - амортизация здания, р.;

$A_{\text{м}}$ - амортизация машин и оборудования, р.;

P_3 - текущий ремонт здания, р.;

$P_{\text{м}}$ - Текущий ремонт и техобслуживание машин и оборудования, р.;

Э - затраты на электроэнергию, р.;

T - затраты на топливо, р.;

З- зарплата обслуживающему персоналу, р. [119];

Пс- производительность за год, т/год.

$$З_{п}=(170+100+300+150+6+1350+1400)/147=23,7=24 \text{ р/т}$$

Установлены следующие нормы отчислений, процент от балансовой стоимости (зарплаты): амортизация зданий - 2; амортизация оборудования - 10; текущий ремонт зданий - 4; текущий ремонт и техобслуживание машин и оборудования -13; начисление на зарплату обслуживающего персонала - 4,4; стоимость 1 кВт×ч электроэнергии - 7,01 р.

4.2 Стоимость зерна как критерий комплексной оценки экономической ситуации регионов Российской Федерации

Различные регионы Российской Федерации кроме географических и климатических условий характеризуются развитостью инфраструктуры, наличием и квалификацией профессиональных кадров, численностью населения, количеством и профилем предприятий, уровнем жизни. Вследствие этого степень экономического развития в каждом из субъектов различна [80]. Существующие критерии оценки степени развития экономики, опирающиеся на какой-либо один из вышеприведенных признаков, не позволяют судить в краткосрочной перспективе обо всей ситуации в целом: как о промышленной, так и социальной составляющих [81].

В военное время основополагающими критериями выживаемости региона будут являться численность, оснащённость, мобильность и боеспособность подконтрольных войск, а также их снабжение. Сюда относятся транспортные возможности, наличие и способность доставки боеприпасов, продовольствия, медикаментов. В мирное же время массовое перемещение войск, вооружений, боеприпасов и медикаментов не является приоритетным, скорее аномальным, тогда как наличие продовольствия – наряду с перемещением энергии, энергоносителей,

товаров, сырья и пассажиропотоком – остаётся одним из важнейших компонентов функционирования региона. Мало того, для физического выживания региона наличие и возможность доставки продовольствия является ключевым элементом [82].

Для обеспечения региона продуктами сельского хозяйства их надо произвести, доставить до места хранения, сохранить и осуществить это без потерь или с минимальными потерями [83]. Всё вышеперечисленное находится в прямой зависимости от наличия и степени развитости сельскохозяйственных угодий, оснащения соответствующей техникой и умеющими пользоваться этой техникой профессиональных кадров, энерговооружённости, транспортных возможностей, имеющихся сооружений и технологий [84]. Иными словами, для максимально рационального, с минимальными потерями на всех стадиях, обеспечения региона продовольствием необходима развитая инфраструктура не только сельского хозяйства и пищевой промышленности, но и смежных секторов экономики, в том числе и высокотехнологичных [85].

Уровень обеспеченности населения региона и одновременно уровень прожиточного минимума отражается в ценах на продовольствие. Наиболее значимыми продовольственными товарами для нашей страны являются продукты переработки зерна [86]. А поскольку из зерна производятся не только продукты питания, но и – напрямую и опосредованно – ряд товаров и сырья для других сегментов экономики (сельского хозяйства, эфиромасличного производства, лёгкой промышленности, изготовления лакокрасочной продукции, производства мебели, музыкальных инструментов, предметов быта и т.д.) цены на зерно отражают уровень экономического состояния региона [87, 116].

Поэтому предложены в качестве критерия комплексной оценки экономической ситуации использовать среднее значение цен на зерно.

В таблице 6 приведены цены за одну тонну основных зерновых культур для некоторых регионов, взятых в каждом федеральном округе Российской Федерации. Данные для указанной таблицы получены 13 ноября 2018 года.

Таблица 16. Цены зерновых культур за одну тонну в различных регионах РФ

ФО России/зерно (р./т)	Пшеница (4-5 кл.)	Кукуруза (3-4 кл.)	Семена. подсол.	Рис	Лён
Центральный ФО					
Московская область	9000	8200	16000	30000	16000
Калужская область	9300	7500	25000	-	-
Липецкая область	7000	8500	25000	-	22000
Костромская область	9300	10000	-	30000	-
Брянская область	9000	6500	27000	-	-
Владимирская область	8800	7500	23800	27000	-
Тульская область	9900	8500	26000	-	17000
Южный ФО					
Ростовская область	10500	8000	24700	36000	17000
Краснодарский край	11500	9000	25000	35000	16000
Северо-Западный ФО					
Ленинградская область	9500	10800	45000	35000	16000
Псковская область	9400	10000	46000	-	-
Мурманская область	10000	10000	50000	-	-
Калининградская область	8800	9000	-	27000	-
Дальневосточный ФО					
Хабаровский край	13000	11000	45000	32000	-
Сибирский ФО					
Новосибирская область	9300	16000	55000	40000	27000
Алтайский край	10000	13000	52000	38000	25000
Уральский ФО					
Свердловская область	9000	11500	50000	30000	20000
Ханты-Мансийский автономный округ	10000	-	50000	-	-

ФО России/зерно (р./т)	Пшеница (4-5 кл.)	Кукуруза (3-4 кл.)	Семена. подсол.	Рис	Лён
Приволжский ФО					
Нижегородская область	11600	8000	25000	27000	27000
Северо-Кавказский ФО					
Ставропольский край	10000	8800	25000	26000	26000
Крымский ФО					
Республика Крым	10300	13000	23000	28000	27000

Как видно из таблицы 16, критерий комплексной оценки экономического состояния региона, определяемый климатическими условиями, логистическими возможностями, развитостью инфраструктуры, наличием и квалификацией рабочей силы, выражаемый ценой на зерно, разнится в зависимости от региона [88].

Исходя из цен, приведенных в таблице, можно определить те регионы Российской Федерации, где экономическая ситуация наиболее или наименее эффективна.

Для примера, были рассмотрены Московскую и Новосибирскую области – административные центры которых находятся на одной географической широте, оба региона являются промышленно развитыми, населёнными, обладают достаточным количеством квалифицированных кадров, и Москва и Новосибирск являются крупными научными и культурными центрами [89].

В Московской области цена одной тонны абстрактного зерна, осреднённого по пяти культурам, приведенным в таблице 16 (без учёта объёмов производства и потребления по каждой культуре), составляет:

$$(9\,000+8\,200+16\,000+30\,000+16\,000)/5=15,84 \text{ р./т,}$$

в то время, как в Новосибирской области тот же показатель равен:

$$(9\,300+16\,000+55\,000+40\,000+27\,000)/5=29,46 \text{ р./т,}$$

что в два раза дороже. Таким образом, предлагаемый подход показывает, что экономическая ситуация в Московской области вдвое эффективнее, чем в

Новосибирской. И это несмотря на то, что в Новосибирской области климат суше, чем в Московской, т.е. более благоприятный для хранения зерна [90]. Дело в том, что из-за более суровых климатических условий любые строительные сооружения в Новосибирской области получаются дороже, чем в Московской [91]. Поскольку цена определяется стоимостью выращивания, сбора, транспортировки и хранения зерна, соответственно отражает обоснованность производства его на данной территории или завоза из других регионов, то предложенный критерий качественно верно описывает действительность [92, 93, 94, 95].

Следует отметить, что данные соображения относятся к краткосрочной перспективе – типичным в этом отношении примером является Крымский федеральный округ. При благоприятных погодных условиях в Крымском ФО, цена за тонну зерна одна из самых высоких в нашей стране, это связано с введенными международными санкциями против республики после того, как она вошла в состав Российской Федерации и разрывом сложившихся хозяйственных связей с материковой Украиной. Таким образом, повышение цен на зерно в Крыму носит временный характер и цены постепенно опустятся по мере нормализации экономической обстановки на полуострове (обеспечение электроэнергией, газом, сырьём и товарами по каналам, альтернативным сложившимся за время нахождения Крыма в составе Украины).

Стоимость тонны зерна для каждого региона Российской Федерации обусловлена несколькими причинами: климатическими особенностями, наличием соответствующих угодий, предприятий, техники, доступной рабочей силы, транспортными возможностями, условиями хранения, а также размером урожая – чем он больше, тем цена ниже [96, 97, 98]. Все вышеуказанные признаки сильно отличаются друг от друга в разных регионах и целых федеральных округах России, соответственно различаются и технологии на разных стадиях технологической цепочки производства зерна. Однако одно остаётся неизменным для абсолютно всех регионов и любых видов, и сортов зерна – это многократное превышение сроков хранения над суммарным временем жатвы, скирдования, доставки до мест хранения и предварительной подготовки [99, 100, 101]. Поэтому хранение является

важнейшей составляющей, влияющей на конечную цену зерна. В зависимости от того сколько можно сохранить зерна через полгода, год, а то и несколько лет, будет формироваться конечная цена на него. Очень важно, чтобы зерно портилось как можно меньше за большее время хранения, тогда конечная стоимость его будет ниже. Если год был урожайным и сельскохозяйственной продукции в избытке, больше чем потребность рынка, то её стоимость снижается, при таком стечении обстоятельств очень важно убрать зерно на долгосрочное хранение, дожидаться, когда потребность в нём увеличится и продать по более высокой цене. Всё это целесообразно только при использовании технологий, позволяющих сохранять зерно на протяжении долгого времени без потери его количества и качества.

В заключении можно сказать, что стоимость зерна является комплексным показателем, отражающим общеэкономическую ситуацию в регионе, при этом одной из её основных составляющих является стоимость хранения в металлических силосах больших емкостей. Сократив затраты на хранение зерна в МСБЕ, без потери его количества и качества, снизим цены на зерно, тем самым улучшим общую экономическую ситуацию в регионе. Добиться снижения затрат на хранение зерна в МСБЕ, причём не столько в сокращении расходуемой электроэнергии, амортизации механизмов и оплате сотрудников, сколько в уменьшении количества пересыпаний зерна приводящих к повреждению защитной оболочки зёрнышек и тем самым способствующих увеличению порчи [102], можно только за счёт применения новых технологий хранения и переработки [103, 104]. Именно такие технологии, основанные на инновационных решениях, опирающихся на новое осмысление теплофизических процессов в зерновой массе [105, 106, 107], хранения в зерна в металлических силосах большой ёмкости [108, 109] и разрабатываются нами в настоящее время.

Выводы по четвертой главе

Для сравнения затрат на вентилирование применялся критерий – удельные затраты электроэнергии ($\text{кВт}\times\text{ч}$) на охлаждение одной тонны зерна на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Данный критерий не учитывает сохранность качества зерна. Его значение уменьшается пропорционально уменьшению удельной подачи воздуха на одной тонны. Чем меньше удельный расход воздуха на охлаждение, тем выше предложенный критерий оценки и рентабельнее силос для хранения. Обеспечение подачи нормативного объёма воздуха в зерновую массу для её охлаждения является основным условием сохранности зерна, исключающим развитие плесеней при хранении.

Эффективность зернохранилища оценивалась по удельным затратам электроэнергии на одну тонну зерна при обеспечении нормативной удельной подачи воздуха в зерновую массу не менее $10 \text{ м}^3/\text{ч} \times \text{т}$.

Установлено, что стоимость зерна является комплексным показателем, отражающим общеэкономическую ситуацию в регионах РФ, при этом одной из её основных составляющих является стоимость хранения в МСБЕ. Сократив затраты на хранение зерна в МСБЕ, без потери его количества и качества, понизятся цены на зерно, тем самым улучшив общую экономическую ситуацию в регионах Российской Федерации.

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.

Перечень сокращений и условных обозначений

BCB _{нз}	влажностное содержание воздуха над зерном
BCBПC _з	влажностное содержание воздуха поверхностного слоя зерна 100 мм
КЧЖ	кислотное число жира
МП	межзерновое пространство
МС	металлический силос
МСБЕ	металлический силос большой емкости
ОВ	относительная влажность
ОВВ	относительная влажность воздуха
ОВВМЗ _п	относительная влажность воздуха межзернового пространства
САВ	система активного вентилирования
ТВ _{нз}	температура воздуха над зерном
ТВПC _з	температура воздуха поверхностного слоя зерна 100 мм
ТНВ	температура наружного воздуха

Список используемой литературы

1. Сорочинский В. Ф. Кинетика охлаждения зерна после сушки на установках активного вентилирования / В. Ф. Сорочинский // «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе» - Курск, 2015. - С. 230-235.
2. Активное вентилирование зерновых масс // Читальный зал: электронный журнал. 2019. URL: <http://chitalky.ru/?p=1436> (дата обращения 10.02.2019)
3. Инструкция № 9-7-88 по хранению зерна, маслосемян, муки и крупы // Судебные и нормативные акты РФ: электронный журнал. 2019. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-minkhleboproduktov-sssr-ot-24061988-n-185/instruktsiia-n-9-7-88-po-khraneniuiu/> (дата обращения 2.03.2019)
4. Инструкция по хранению зерна в металлических зернохранилищах // Министерство хлебопродуктов СССР: электронный журнал. 1988. URL: <http://33.fsvps.ru/fsvps-org-docs/33/laws/ussr185.pdf> (дата обращения 9.04.2019)
5. Разворотнев А. С., Гавриченко Ю. Д. Оценка эффективности металлических силосов по удельному расходу электроэнергии на вентилирование зерна различных культур / А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченко // Хлебопродукты - 2017. № - 10. - С. 53-55.
6. Инструкция по борьбе с вредителями хлебных запасов // Библиотека нормативно-правовых актов Союза Советских Социалистических Республик: электронный журнал. 1991. URL: http://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_19398.htm (дата обращения 3.03.2019).
7. Нормы технологического проектирования предприятий послеуборочной обработки и хранения продовольственного фуражного зерна и семян зерновых культур и трав НТП 16-93 // Электронная библиотека: электронный журнал. 1993. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200036316> (дата обращения 3.05.2019).
8. Кечкин И. А. Обеспечение сохранности зерна в металлических силосах большой вместимости / И. А. Кечкин // Аллея науки. – 2018. - № 3 - С. 359-362.
9. Лугарёв А. Л. Хранение зерновых масс ячменя в металлических силосах / А. Л. Лугарёв. – М.: Издательство Москва. 1981. С. 115.
10. Разработать рекомендации по хранению, вентилированию, обеззараживанию зерна в силосах новых конструкций из сборного железобетона с конструктивной защитой диаметром 6 м и в металлическом исполнении 15,2; 18,2; 22,8 м. / Отчет (промежуточный) Кубанского филиала ВНИИЗ. Краснодар. - 1982. - С.13-28.
11. Кан Г. В., Александрова Н. Е. Исследование качества зерна пшеницы при хранении в металлическом силосе большой емкости / Г. В. Кан, Н. Е. Александрова // Труды ВНИИЗ. – М.: 1981. - Вып. 96. - С. 24-31.

12. Мачихина Л. И., Алексеева Л. В., Львова Л. С. Научные основы безопасности зерна (хранение и переработка) / Л. И. Мачихина, Л. В. Алексеева, Л. С. Львова. - М.: ДеЛи принт. - 2007. - С. 106-108
13. Жидко В. И., Резчиков В. А., Уколов В. С. Зерносушение и зерносушилки / В. И. Жидко, В. А. Резчиков, В. С. Уколов. – М.: Колос. 1982. - С. 71.
14. Новоселов С. В. Инструкция по активному вентилированию зерна и маслосемян (техника и технология) / С. В. Новоселов // ЦНИИТЭИ Минхлебопродуктов СССР. – М, 1989. - С. 66.
15. Разработать рекомендации по хранению, вентилированию и обеззараживанию зерна в силосах новых конструкций из сборного железобетона с конструктивной защитой Ø6 м. и в металлическом исполнении Ø15,2; 18,0 и 22,8 м. / Отчет о НИР. ВНИИЗ. – М, 1983. - С. 20-35.
16. Разработать рекомендации по хранению, вентилированию и обеззараживанию зерна в силосах новых конструкций из сборного железобетона с конструктивной защитой и металлическом исполнении диаметром 15,2 и 22,8 м. / Отчет Казахского филиала ВНИИЗ. – Целиноград, 1982. - С. 10-42.
17. Алексеева Л. В., Кизатова М. Ж., Артамонова Э. Г. Применение метода планирования многофакторного эксперимента при постановке исследований по хранению зерна/ Л. В. Алексеева, М. Ж. Кизатова, Э. Г. Артамонова // Труды ВНИИЗ. - 1989. - Вып.111. - С. 144-153.
18. Мачихина, Л. И., Алексеева Л. В., Закладной Г. А. Общий технологический регламент для элеваторов и хлебоприемных предприятий. / Мачихина, Л. И., Алексеева Л. В., Закладной Г. А. – М, 2005. - С.78.
19. Реконструкция и модернизация металлических зернохранилищ для хранения влажного и свежееубранного зерна пшеницы / Отчет Казахского филиала ВНИИЗ. – Целиноград, 1988. - С.42-56.
20. Провести исследования условий хранения, вентилирования, хранения и обеззараживания зерна в силосах новых конструкций и разработать рекомендации по режимам хранения зерна/ Отчет Сибирского филиала ВНИИЗ. – Новосибирск, 1982. - С.23-35.
21. Сорочинский В. Ф., Горяев А. Б., Березина Т. С. Особенности аэродинамики и тепломассообмена в слое зерна при активном моделировании / В. Ф. Сорочинский, А. Б. Горяев, Т. С. Березина // Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства. – Москва, 2018. - С. 72-76.
22. Березина Т. С., Власенко Г. П., Горяев А. Б., Захаров А. В. Влияние климатических факторов на параметры процесса хранения зерна в металлических силосах / Т. С. Березина, Г. П. Власенко, А. Б. Горяев, А. В. Захаров // Энергосбережение – теория и практика. - Москва. - С. 21-24.

23. Kaliyan N., Morey R. V., Wilcke W. F. Mathematical model for simulating headspace and grain temperatures in grain bins / N. Kaliyan, R.V. Morey, W. F. Wilcke // American Society of Agricultural Engineers. - 2005. - C. 1851-1863.
24. Zhang Y., Li C., Ma X., Experiment and numerical simulation of layer resistance parameters in dryer / Y. Zhang, C. Li, X. Ma // Nongye Jixie Xuebao. 2014. - №7. - C.216-221.
25. Stankevych G., Kats A., Vasilyev S. Investigation of hygroscopic properties of the spelt grain / G. Stankevych, A. Kats, S. Vasilyev // Технологический аудит и резервы производства. - 2018. - №3. - C.37-41.
26. Gadpayle K. A., Fulekar M. H., Bhattacharyya R., Pal M. Additional N supply improves grain yield in Triticale better than wheat under elevated CO2 environment / K. A. Gadpayle, M. H. Fulekar, R. Bhattacharyya, M. Pal // Indian Journal of Plant Physiology. - 2018. - 23(3). - C.521-528.
27. Alghabari F., Ihsan M. Z. Effects of drought stress on growth, grain filling duration, yield and quality attributes of barley / F. Alghabari, M. Z. Ihsan // Bangladesh Journal of Botany. - 2018. - 47(3). - C.421-428.
28. Solis J., Gutierrez A., Mangu V., Baisakh N., Linscombe S. Genetic mapping of quantitative trait loci for grain yield under drought in rice under controlled greenhouse conditions / J. Solis, A. Gutierrez, V. Mangu, N. Baisakh, S. Linscombe // Frontiers in Chemistry. - 2018. - 5. - C. 435.
29. Bhatta M., Belamkar V., Baenziger P. S., Morgounov A. Genome-wide association study reveals novel genomic regions for grain yield and yield-related traits in drought-stressed synthetic hexaploid wheat / M. Bhatta, V. Belamkar, P. S. Baenziger, A. Morgounov // International Journal of Molecular Sciences. - 2018. - 19(10). - C.342-347.
30. Vasiliev A. N., Budnikov D. A., Gracheva N. N., Smirnov A. A. Increasing efficiency of grain drying with the use of electroactivated air and heater control / A. N. Vasiliev, D. A. Budnikov, N. N. Gracheva, A. A. Smirnov // Handbook of research on renewable energy and electric resources for sustainable rural. Pennsylvania. - 2018. - C. 255-282.
31. Shen H., Shou J. - P. Study on the heat transfer process of grain drying heat exchange bed / H. Shen, J. - P. Shou // Asian journal of information technology. - 2017. - №11. - C. 689-691.
32. Gu D. Airflow distribution and its relation to bulk grain drying / D. Gu // The University of Saskatchewan. - 1994. - C. 123-132.
33. Беляева М. А. Оптимизация пищевой и биологической ценности мясных полуфабрикатов в процессе тепловой обработки с целью обеспечения населения качественными продуктами питания / М. А. Беляева // монография. - Москва: Русайнс, 2017. - С. 70-78.
34. Сорочинский В. Ф., Гаряев А. Б., Горячева Е. М. Математическая модель процесса переноса влаги при активном вентилировании зерна в элеваторах / В. Ф.

- Сорочинский, А. Б. Горяев, Е. М. Горячева // МНТК Плановский. – Москва, 2016. - С.320-324.
35. Сорочинский В. Ф. Изменение коэффициентов диффузии влаги и массоотдачи единичной зерновки в процессах сушки и охлаждения / В. Ф. Сорочинский // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов). – Москва, 2002. - С. 76-79.
36. Vassiliev V., Magni F., Chernishev S., Kostege V. Impact of the 3d flow effects on the silo combustor thermal state / V. Vassiliev, F. Magni, S. Chernishev, V. Kostege // Proceeding of the ASME Turbo Expo Sep. - 2012. - С. 881-890.
37. Toffolo M. B., Boaretto E., Martin M. A., Master D. M. Microarchaeology of a grain silo: insights into stratigraphy, chronology and food storage at late bronze age ashkelton / M. B. Toffolo, E. Boaretto, M. A. Martin, D. M. Master // Journal of Archaeological Science. - 2018. - С.177-188.
38. Bonner M. R., Alavanja M. C. Pesticides, human health, and food security / M. R. Bonner, M. C. Alavanja // Food and Energy Security. - 2017. - 6(3). - С.89-93.
39. Davies W. J., Ribaut J. M. Stress resilience in crop plants: Strategic thinking to address local food production problems / W. J. Davies, J. M. Ribaut // Food and Energy Security. - 2017. - 6(1). - С.12-18.
40. Pollock C., Sustainable farming: Chasing a mirage? / C. Pollock // Food and Energy Security. - 2016. - 5(4). - С.205-209.
41. Cervelin B. H., Conti D., Diniz-Ehrhardt M. A., Martínez J. M. A computer model for particle-like simulation in broiler houses / B. H. Cervelin, D. Conti, M. A. Diniz-Ehrhardt, J. M. Martínez // Computers and Electronics in Agriculture. - 2017. - С.1-14.
42. Oates M. J., Ruiz-Canales A., Ferrández-Villena M., López A. F. A low cost sunlight analyser and data logger measuring radiation / M. J. Oates, A. Ruiz-Canales, M. Ferrández-Villena, A. F. López // Computers and Electronics in Agricultur. - 2017. - С.38-48.
43. Gilmore C., Asefi M., LoVetri J., Paliwal J. Industrial scale electromagnetic grain bin monitoring / C. Gilmore, M. Asefi, J. LoVetri, J. Paliwal // Computers and Electronics in Agriculture. - 2017. - С. 210-220.
44. García P. J., García-Gonzalo E., Bové J., Duran-Ros M., Puig-Bargués J. Modeling pressure drop produced by different filtering media in microirrigation sand filters using the hybrid ABC-MARS-based approach, MLP neural network and M5 model tree / P. J. García, E. García-Gonzalo, J. Bové, M. Duran-Ros, J. Puig-Bargués // Computers and Electronics in Agriculture. - 2017. - С.65-74.
45. Huang Y., Li C. Real-time monitoring system for paddy environmental information based on DC powerline communication technology / Y. Huang, C. Li // Computers and Electronics in Agriculture. - 2017. - С.51-62.

46. Stone G. D., Glover D. Disembedding grain: Golden Rice, the Green Revolution, and heirloom seeds in the Philippines / G. D. Stone, D. Glover // *Agriculture and Human Values*. - 2017. - C.87-102.
47. Bhatta M., Belamkar V., Baenziger P. S., Morgounov A. Genome-wide association study reveals novel genomic regions for grain yield and yield-related traits in drought-stressed synthetic hexaploid wheat / M. Bhatta, V. Belamkar, P. S. Baenziger, A. Morgounov // *International Journal of Molecular Sciences*. - 2018. - 19(10). - C.24-32.
48. Odriozola-Maritorena M., Martin K., Flores I., Campos-Celador Á., Sala J. M. Ventilation requirements based on carbon dioxide concentration criteria: implications on IAQ and energy use / M. Odriozola-Maritorena, K. Martin, I. Flores, Á. Campos-Celador, J. M. Sala // *International Journal of Ventilation*. - 2018. - C.56-71.
49. Linares P., García-Ortega S., Larrumbide E. The influence on surface condensation risk of lower ventilation rates: the case of the proposal of indoor air quality requirement for the Spanish regulations / P. Linares, S. García-Ortega, E. Larrumbide // *International Journal of Ventilation*. - 2018. - C.182-191.
50. Belleri A., Avantaggiato M., Psomas T., Heiselberg P. Evaluation tool of climate potential for ventilative cooling / A. Belleri, M. Avantaggiato, T. Psomas, P. Heiselberg // *International Journal of Ventilation*. - 2018. - C.204-211.
51. Larsson U., Moshfegh B. Comparison of ventilation performance of three different air supply devices: a measurement study / U. Larsson, B. Moshfegh // *International Journal of Ventilation*. - 2017. - 16(2). - C.84-98.
52. Zhou B., Fan J., Feng L., Cheng J., Chen L. Flow simulation around double cylinders based on Lattice Boltzmann method at low Reynolds numbers / B. Zhou, J. Fan, L. Feng, J. Cheng, L. Chen // *International Journal of Ventilation*. - 2017. - 16(2). - C.124-133.
53. Sugahara A., Kotani H., Momoi Y., Sagara K., Fujiwara R. PIV measurement and CFD analysis of airflow around building roof with various building installations / A. Sugahara, H. Kotani, Y. Momoi, K. Sagara, R. Fujiwara // *International Journal of Ventilation*. - 2017. - 16(3). - C.230-243.
54. Cui S., Perret-Gentil M., Stabat P., Barthelmé A. F., Wurtz E. A global modelling approach of natural ventilation with acoustic and daylighting constraints / S. Cui, M. Perret-Gentil, P. Stabat, A. F. Barthelmé, E. Wurtz // *International Journal of Ventilation*. - 2016. - 15(1). - C.1-14.
55. Кечкин И. А. Активное вентилирование зерна в металлических силосах / Кечкин И. А. – В.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 65с.
56. Кечкин И. А. Разворотнев А. С., Гавриченко Ю. Д. 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.

57. Борисенко Д. И., Исаев А. С., Грибова Н. С., Кечкин И. А. Разработка экспериментального стенда для исследований очагов самосогревания в сыпучих средах / Д. И. Борисенко, А. С. Исаев, Н. С. Грибова, И. А. Кечкин // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2016. - Вып. №4. - С. 848-853.
58. 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.
59. 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.
60. 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. 276-280.
61. Кечкин И. А., Разворотнев А. С., Гавриченков Ю. Д. Обеспечение сохранности зерна в металлическом силосе / И. А. Кечкин, А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченков // Инновационное развитие пищевой, легкой промышленности и индустрии гостеприимства. - 2017. - С. 194-196.
62. 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.
63. Kechkin I. A., Gavrichenkov Yu. D., Razvorotnev A. S. 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.
64. 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.
65. 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.
66. 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.

67. Кечкин И. А. Хранение зерна в металлическом силосе вместимостью 10000 тонн / И. А. Кечкин // Международная научно-практическая конференция. - 2018. - С. 104-106.
68. Кечкин И. А. Зависимость кислотного числа жира от условий хранения зерна пшеницы / И. А. Кечкин // Сельское хозяйство и продовольственная безопасность: технологии, инновации, рынки, кадры: тезисы докладов научно-практической конференции. - 2019. - С. 124-128.
69. Кечкин И. А. Управление воздушными потоками внутри металлического силоса при хранении зерна / И. А. Кечкин // Сельское хозяйство и продовольственная безопасность: технологии, инновации, рынки, кадры: тезисы докладов научно-практической конференции. - 2019. - С. 92-94.
70. 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. 156-159.
71. Kechkin I. A., Ermolaev V. A., Romanenko A. I., Ivanov M. V., Gurkovskaya E. 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.
72. Kechkin I. A., Ermolaev V. A., Romanenko A. I., Tarakanova V. A., Buzetti K. D. 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.
73. Kechkin I. A., Ermolaev V. A., Romanenko A. I., Buzetti K. D., Gurkovskaya E. A. The control and management scheme of air flows in the inner space of a steel silo during grain storage / I. A. Kechkin, V. A. Ermolaev, A. I. Romanenko, K. D. Buzetti, E. A. Gurkovskaya / Materials Science and Engineering. - 2020. - С.123-129.
74. Личко Н. М., Елисеева Л. Г., Агапкин А. М. К 100-летию со дня рождения профессора Л. А. Трисвятского / Н. М. Личко, Л. Г. Елисеева, А. М. Агапкин // Товаровед продовольственных товаров. - 2012. - С. 24-29.
75. Горяев А. Б., Березина Т. С., Сорочинский В. Ф. Особенности аэродинамики и тепломассообмена в слое зерна при активном вентилировании / А. Б. Горяев, Т. С. Березина, В. Ф. Сорочинский // Международного научно-технического семинара, посвящённого 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева. - 2018. - С. 72-76.
76. Ванцкул А. С., Горячева Е. М., Горяев А. Б., Сорочинский В. Ф. Исследование влияния различных факторов на время охлаждения слоя зерна в металлических силосах / А. С. Ванцкул, Е. М. Горячева, А. Б. Горяев, В. Ф. Сорочинский // Сборник

- научных трудов VI-ого Международного научно-технического Симпозиума, Международного научно-технического Форума. - 2017. - С. 101-103.
77. Березина Т. С., Власенко Г. П., Гаряев А. Б., Захаров А. В. Влияние климатических факторов на параметры процесса хранения зерна в металлических силосах / Т. С. Березина, Г. П. Власенко, А. Б. Гаряев, А. В. Захаров // Энергосбережение - теория и практика труды Девятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов. - 2018. - С. 21-24.
78. Беляева М. А., Кечкин И. А. Технологическая схема хранения зерна в металлических силосах большой емкости / М. А. Беляева, И. А. Кечкин // Пищевая промышленность. - 2020. - Вып. №1. - С. 46-49.
79. Беляева М. А., 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.
80. Мачерет Д. А. Создание железных дорог и экономический рост / Д. А. Мачерет // Мир транспорта. - 2011. - №1. - С. 164-169.
81. Беляева М. А. Моделирование технико-экономических систем / М. А. Беляева // Учебное пособие. - 2018. - 268с.
82. Святова О. В., Зюкин Д. А., Панкова Т. И., Осиневич Л. М. Композиция достижения продовольственной безопасности Российской Федерации / О. В. Святова, Д. А. Зюкин, Т. И. Панкова, Л. М. Осиневич // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. - 2019. - № 3. - С. 122-128.
83. Авдеева В. А. Логистика предприятий аграрной отрасли экономики / В. А. Авдеева // Фулльная и прикладная наука: состояние и тенденции развития. - 2019. - С. 97-100.
84. Бобровский Е. А. Развитие спортивной инфраструктуры как фактор социально-экономического развития слабозаселенных территорий / Е. А. Бобровский // Электронный научный журнал. - 2018. - № 4 (37). - С. 8.
85. Миненко А. В., Водясов П. В. Методы оценки эффективности модели совершенствования инфраструктуры развития АПК в форме территории опережающего социально-экономического развития / А. В. Миненко, П. В. Водясов // Экономика и бизнес: теория и практика. - 2019. - № 2. - С. 83-86.
86. Панкратов Г. Н., Мелешкина Е. П., Витол И. С., Кандроков Р. Х., Жильцова Н. С. Особенности продуктов переработки двухкомпонентных смесей пшеницы и льна / Г. Н. Панкратов, Е. П. Мелешкина, И. С. Витол, Р. Х. Кандроков, Н. С. Жильцова // Хлебопродукты. - 2018. - № 12. - С. 42 – 46.
87. Тюрбеева Б. А., Бекляева Д. В., Болдырева В. Е., Очиров С. В. Современное социально-экономическое состояние регионов России / Б. А. Тюрбеева, Д. В. Бекляева, В. Е. Болдырева, С. В. Очиров // Экономика и предпринимательство. - 2017. - № 6 (83). - С. 298-300.

88. Исаева О. В., Исаев Д. И. Зерновой экспорт России: факторы и механизмы ценообразования / О. В. Исаева, Д. И. Исаев // Синергия Наук. - 2018. - № 23. - С. 249-256.
89. Жихаревич Б., Прибышин Т. Анализ согласованности стратегий субъекта федерации и его административного центра: апробация подхода / Б. Жихаревич, Т. Прибышин // Проблемы теории и практики управления. - 2016. - № 2. - С. 36-44.
90. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения РФ. Методические рекомендации МР 2.3.1.2432-08. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. -36 с.
91. Паршев А. П. Почему Россия не Америка/ А. П. Паршев. – М.: «Крымский мост-9Д, ООО «НТЦ «Форум». - С. 416
92. Казакова Н. А., Лаханова А. М., Наседкина Т. И. Практические проблемы учета и анализа производства зерна по справедливой стоимости / Н. А. Казакова, А. М. Лаханова, Т. И. Наседкина // Управленческий учет. - 2011. - № 7. - С. 61-67.
93. Егоров Г. А. Управление технологическими свойствами зерна / Г. А. Егоров // Воронеж: ВГУ, 2000. – 348 с.
94. Афанасьев В. А. Теория и практика специальной обработки зерновых компонентов в технологии комбикормов/ В. А. Афанасьев // Монография. – Воронеж: ВГУ, 2002. –296 с.
95. Bogatyrev A. N., Pryanichnikova N. S., Makeeva I. A. Natural food products - health of the nation Foodindustry / A. N. Bogatyrev, N. S. Pryanichnikova, I. A. Makeeva // Materials Science and Engineering. – 2017. - С. 26-29.
96. Safonova E. E., Kharitonova E. V., Timoshenkova I. A. Nutrition industry and the role of functional food products in the population food safety / E. E. Safonova, E. V. Kharitonova, I. A. Timoshenkova // Modern science: current problems of theory and practice. - 2016. - С. 79-83.
97. Shahov S. V., Saranov I. A., Sadibaev A. K., Malibekov A. A., Litvinov E. B., Gruzlov P. B. A study of the forms of moisture in canola by the method of thermogravimetric analysis / S. V. Shahov, I. A. Saranov, A. K. Sadibaev, A. A. Malibekov, E. B. Litvinov, P. B. Gruzlov // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. - 2019. - 1(79). - С. 27-31.
98. Gurkovskaya E. A., Larionova A. A., Zaitseva N. A., Prantsuz O. S., Zhavnerov A. N., Belyaeva E. A., Semenova A. A. Assessment of the economic effects of the introduction of innovations in the investment and construction cycle / E. A. Gurkovskaya, A. A. Larionova, N. A. Zaitseva, O. S. Prantsuz, A. N. Zhavnerov, E. A. Belyaeva, A. A. Semenova // EurAsian Journal of BioSciences. - 2019. - Т. 13. - № 2. - С. 2041-2049.
99. Kovalenko V. P., Glebova I. A., Grankin V. F., Antipov A. V., Kechkin I. A., Kirsanova M. M. Management of investment activity in the regional economy / V. P. Kovalenko, I. A. Glebova, V. F. Grankin, A. V. Antipov, I. A. Kechkin, M. M. Kirsanova // Monograph. - 2019. - С.123-130.

100. Истомина А. И., Перов В. И. Технологическое развитие как устойчивое конкурентное преимущество предприятия питания / А. И. Истомина, В. И. Перов // Траектории развития материалы Первой международной научной конференции. - 2018. - С. 342-349.
101. Мустя А., Шмайлова Т. А. Значение хранения и переработки зерна пшеницы / А. Мустя, Т. А. Шмайлова // Материалы Международной студенческой научной конференции. - 2019. - С. 203-204.
102. Трисвятский Л. А. Хранение зерна / Л. А. Трисвятский. – М.: Агропромиздат, 1985. - С. 351-354.
103. Burlankov S. P., Ananov M. A., Sedova N. V., Gazhur A. A., Ananova O. M. Forecasting the development of agricultural production in the context of food security / S. P. Burlankov, M. A. Ananov, N. V. Sedova, A. A Gazhur., O. M. Ananova // Scientific Papers. Series: Management, Economic Engineering and Rural Development. - 2018. - Т. 18. - № 3. - С. 45-53.
104. Давыдов А. М., Давыдов Д. М., Кирпичников В. П., Давыдова Е. А. Анализ и обоснование основных параметров теплоносителя для конвективного аппарата / А. М. Давыдов, Д. М. Давыдов, В. П. Кирпичников, Е. А. Давыдова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. - 2018. - С. 68-72.
105. Лыков А. В. Тепломассообмен / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. - С. 105-122.
106. Гинзбург И. П. Газодинамика и теплообмен / И. П. Гинзбург // Сборник статей. - 1975. - С. 23-36.
107. Резчиков В. А. Новое в зерносушении / В. А. Резчиков. – М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1979. – 7с.
108. McCalmont J. P., Donnison I. S., Farrar K., Clifton-Brown J. C., McNamara N. P. An interyear comparison of CO₂ flux and carbon budget at a commercial-scale land-use transition from semi-improved grassland to *Miscanthus x giganteus* / J. P. McCalmont, I. S. Donnison, K. Farrar, J. C. Clifton-Brown, N. P. McNamara // Gcb Bioenergy. - 2017. - 9(1). - С. 229-245.
109. Townsend T. J., Wilson P., Sparkes D. L. Food and bioenergy: reviewing the potential of dual-purpose wheat crops / T. J. Townsend, P. Wilson, D. L. Sparkes // Gcb Bioenergy. - 2017. - 9(3). - С. 525-534.
110. Кечкин И. А. Схема вентилирования и методика проведения работ по вентилированию зерна в металлических силосах большой емкости / И. А. Кечкин // Сборник научных трудов XIII Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов организаций в сфере сельскохозяйственных наук. - 2019. - С. 146-151.
111. Кечкин И. А. Особенности хранения зерна злаковых культур в металлических силосах и его охлаждения активным вентилированием / И. А. Кечкин //

Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов отделения сельскохозяйственных наук российской академии наук. - 2016. - С. 131-134.

112. Кечкин И. А. Методика проведения работ по вентилированию зерна в силосе вместимостью 10000 тонн / И. А. Кечкин // Аллея науки. - 2018. - С. 501-504.

113. Козин Е. В. Термоактивируемые процессы при высокотемпературной микронизации бобов сои и крупы перловой и пшеницы: диссертация ... кандидата технических наук: 05.18.12/ Е. В. Козин // – Москва, 2011. – 156с.

114. 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.

115. 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.

116. 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.

117. Автоматизация бункеров активного вентилирования зерна // Библиофонд: электронная библиотека студента. 2013. URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=598615#text> (дата обращения 10.01.2020).

118. Приезжева Л. Г., Сорочинский В. Ф., Вережникова И. А., Коваль А. И., Яицких А. В. Изменение биохимических, физико-химических и микробиологических свойств пшеничной хлебопекарной муки в процессе созревания / Л. Г. Приезжева, В. Ф. Сорочинский, И. А. Вережникова, А. И. Коваль, А. В. Яицких // Хлебопродукты. - 2017. - №8. - С. 38-40.

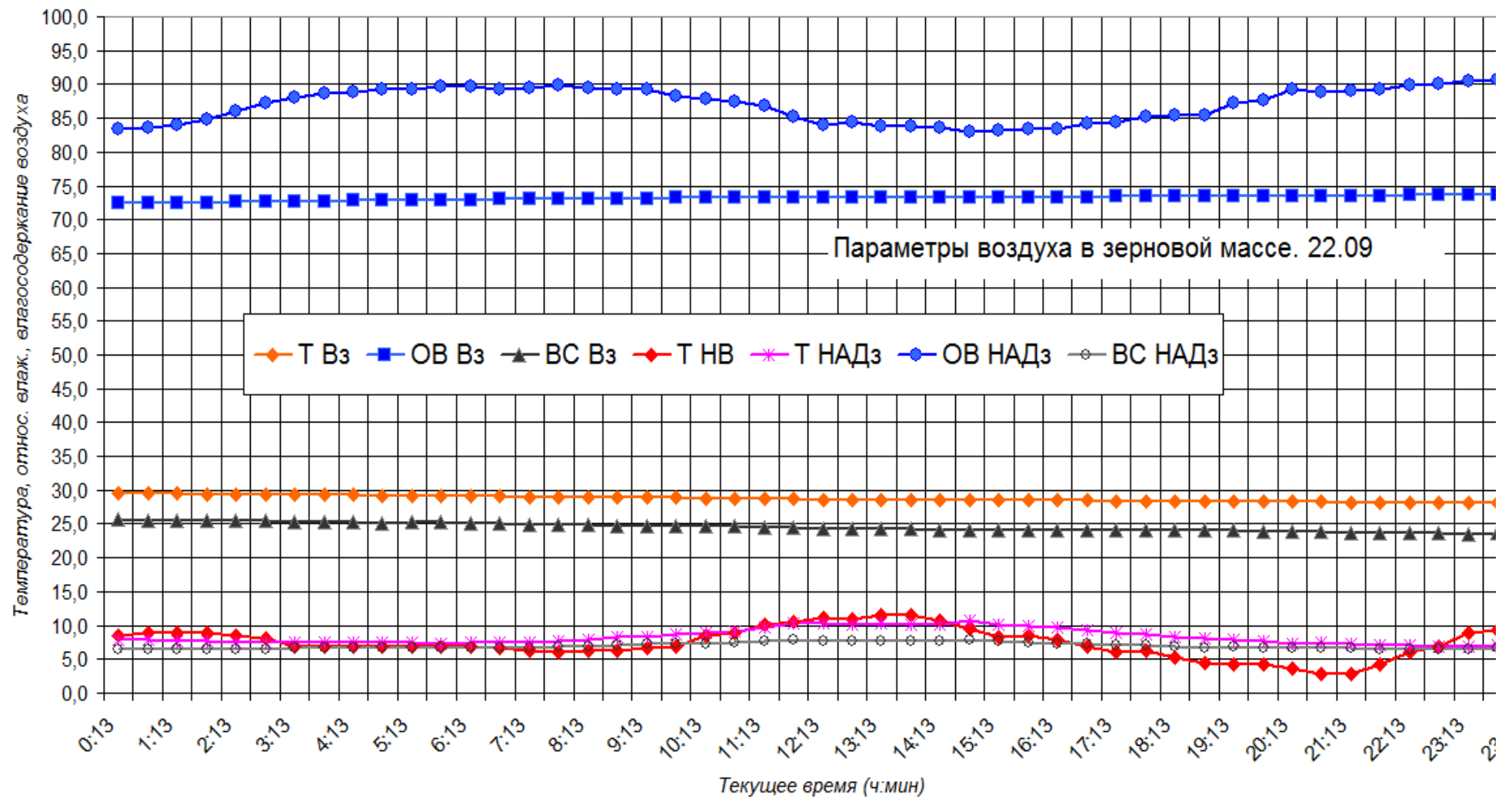
119. Поздняков Г.М. Технология хранения и переработки продукции растениеводства: методические указания для выполнения курсовой работы [Текст] / Г.М. Поздняков; федеральное гос. бюджетное образоват. учреждение высшего проф. образов. « Пермская гос. с.-х. акад. им. акад. Д.Н. Прянишникова». – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2014. – 54 с.

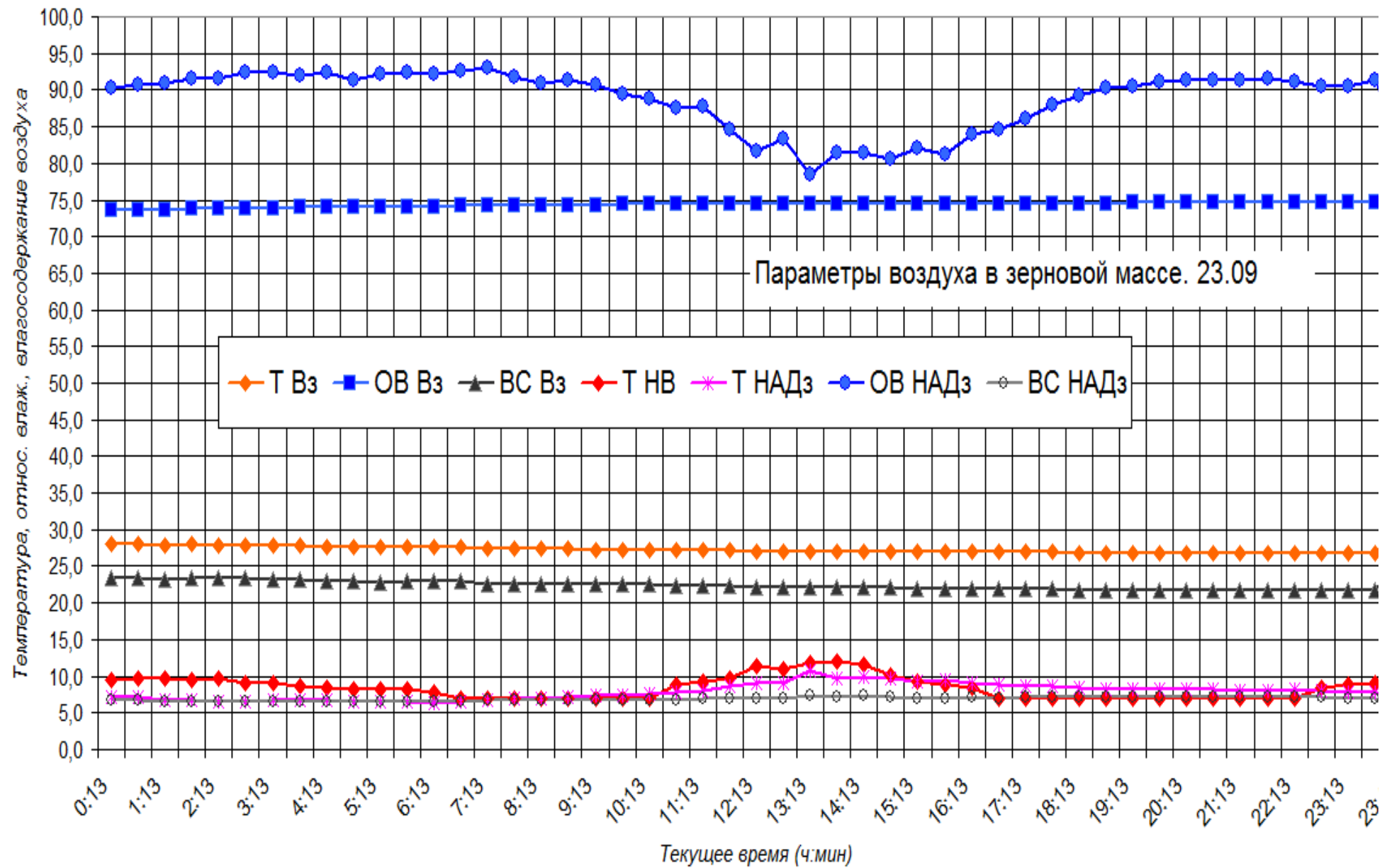
120. Кечкин И. А. Использование математического моделирования при определении продолжительности охлаждения зерна в металлических силосах/ И. А. Кечкин // Сб. научных трудов ученых и специалистов к 90-летию ВНИИХ - 2020. - С. 175-179.

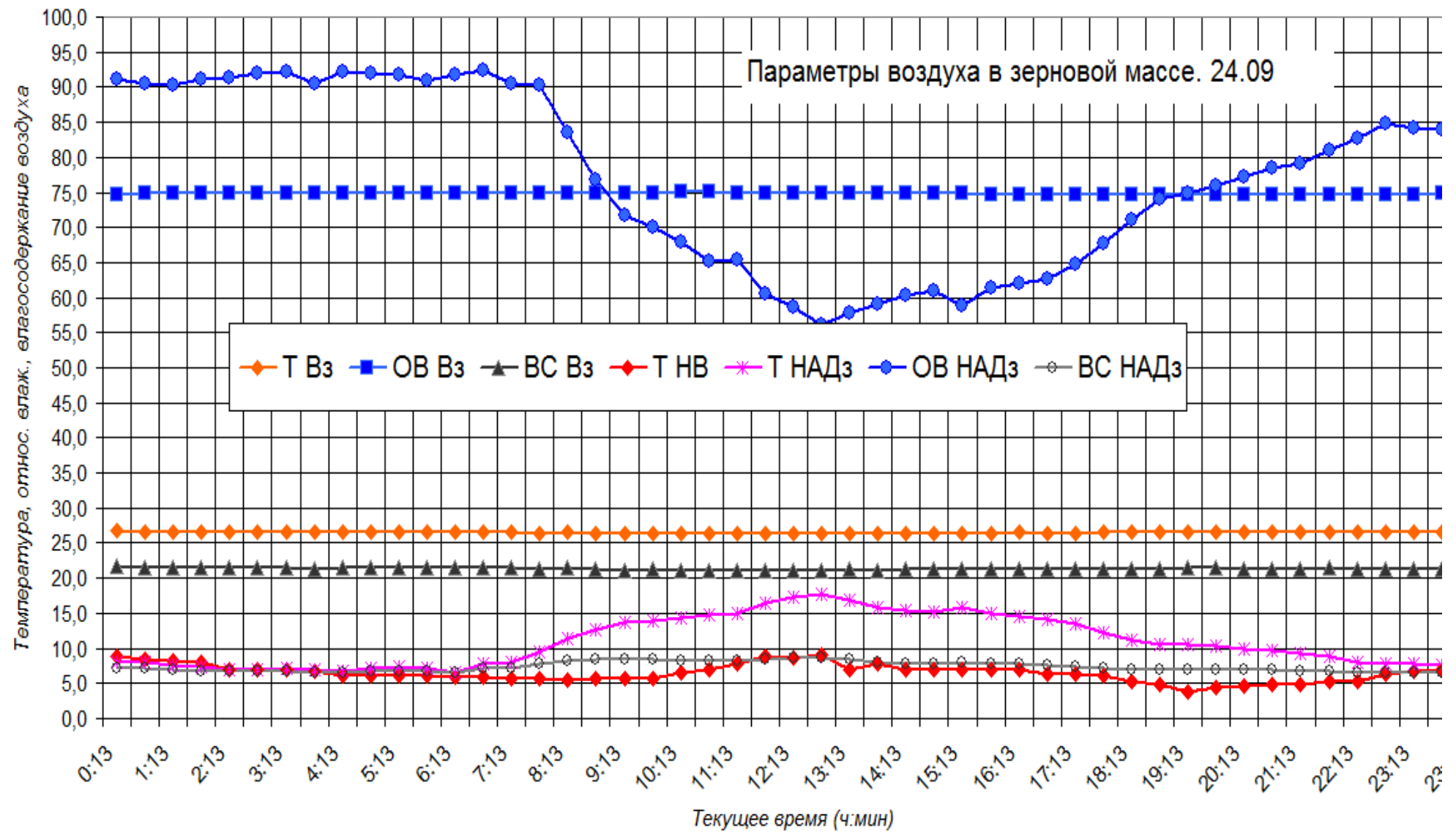
121. Беляева М. А., Кечкин И. А. Тепломассообменные процессы при длительном хранении зерна пшеницы в металлических силосах / М. А. Беляева, И. А. Кечкин // Пищевая промышленность. - 2020. - Вып.№6. - С. 57-60.

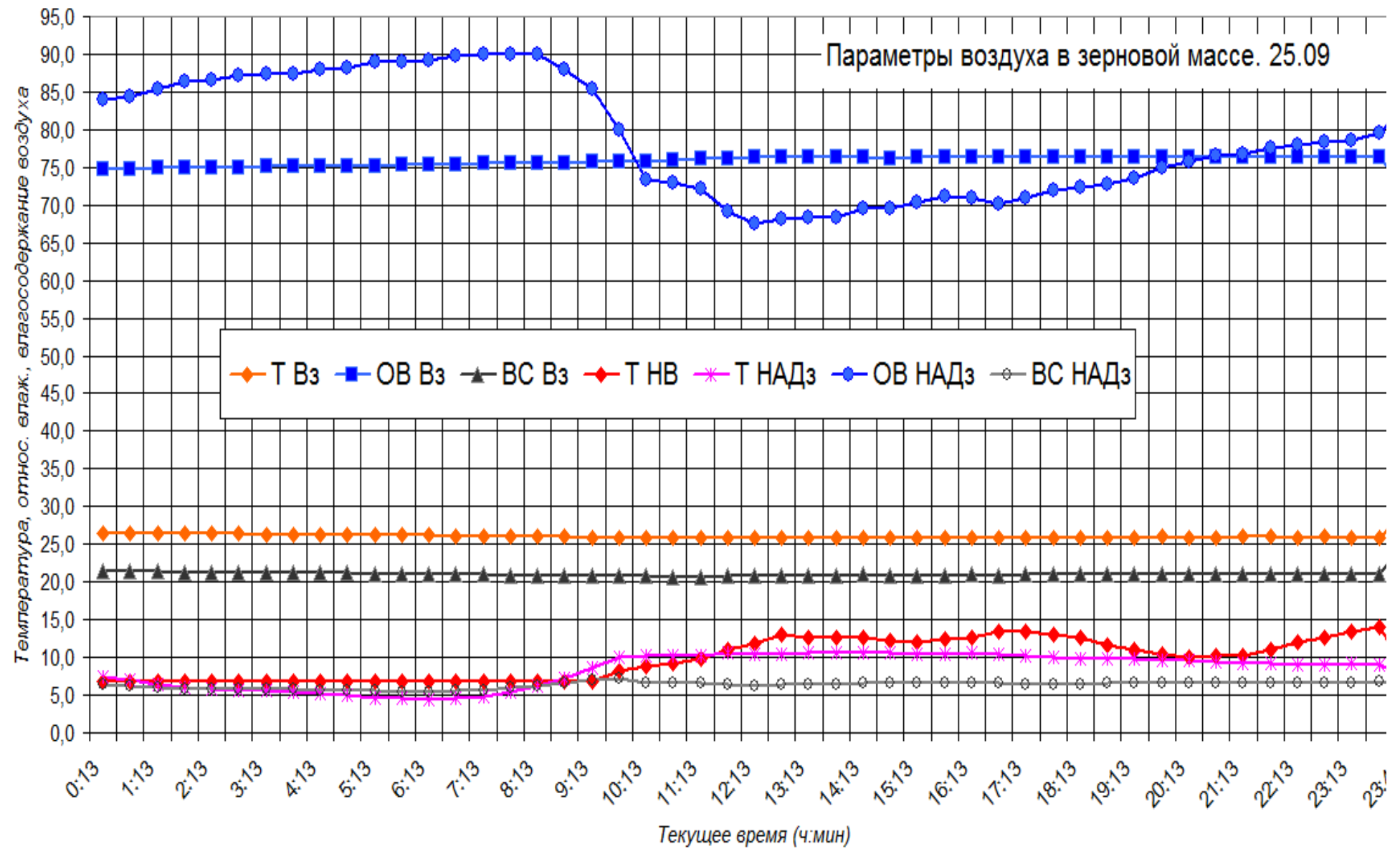
Приложение А

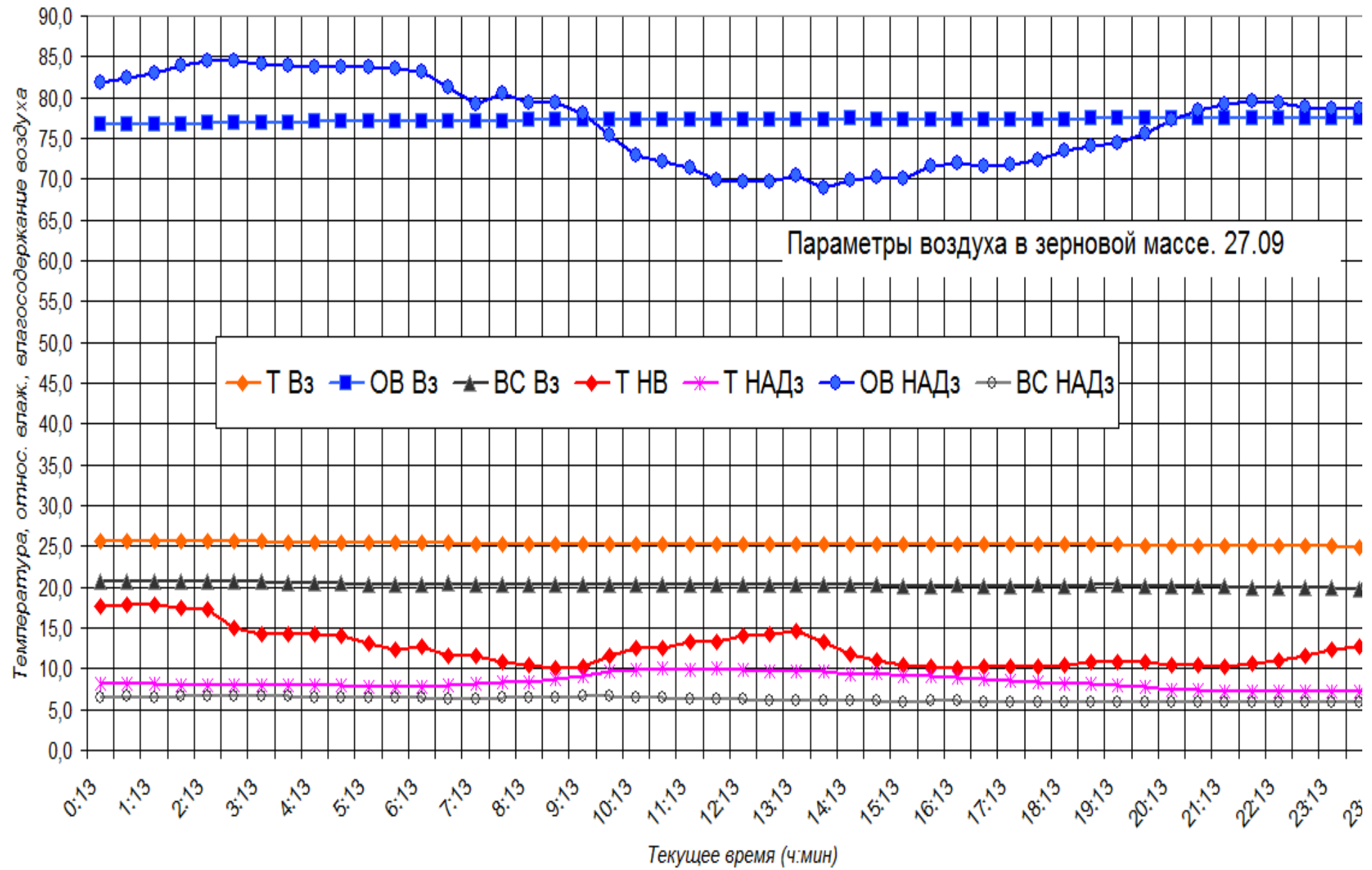
Суточные значения изменений температуры и относительной влажности за период с 21 сентября по 19 октября в металлическом силосе 10 000 тонн.

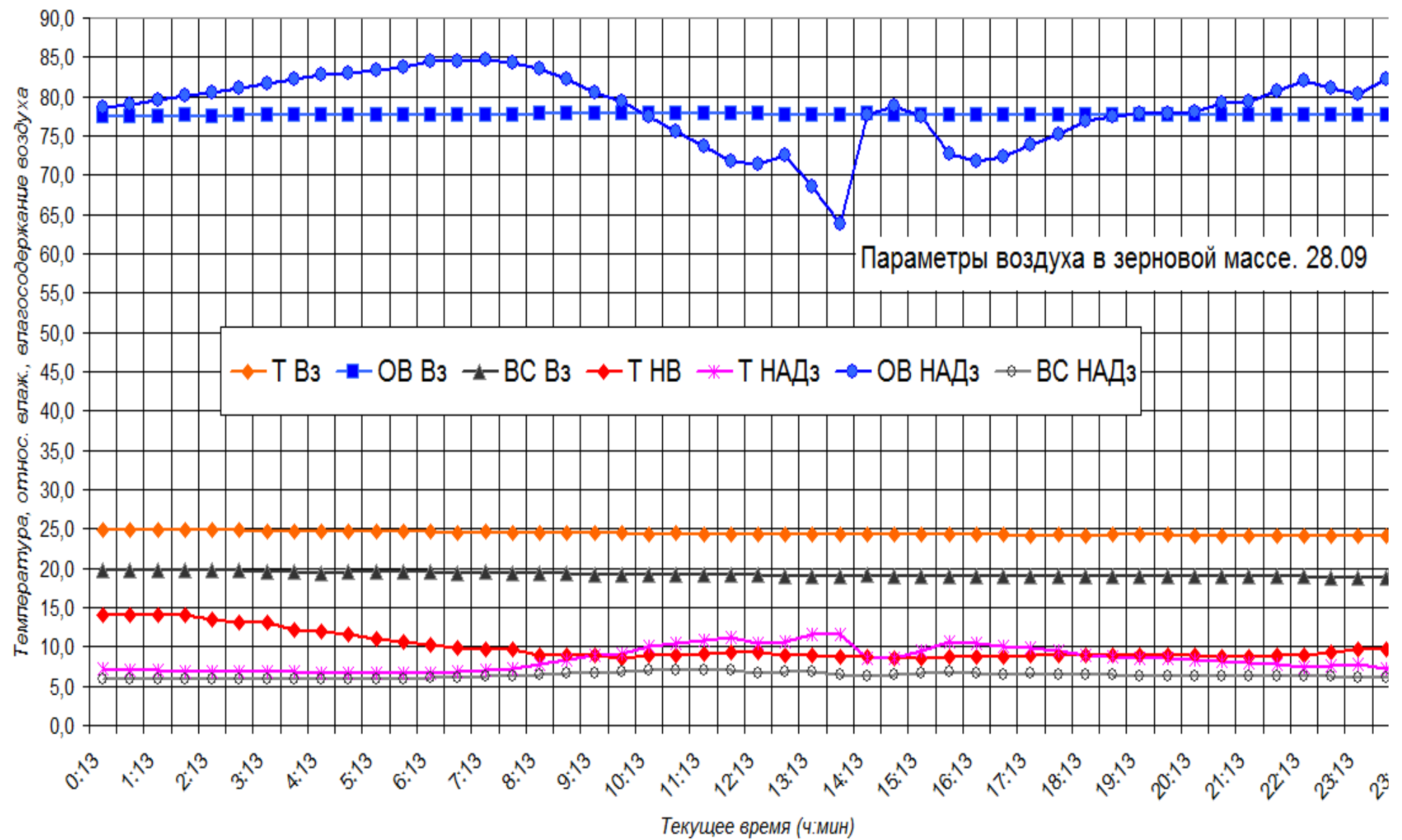


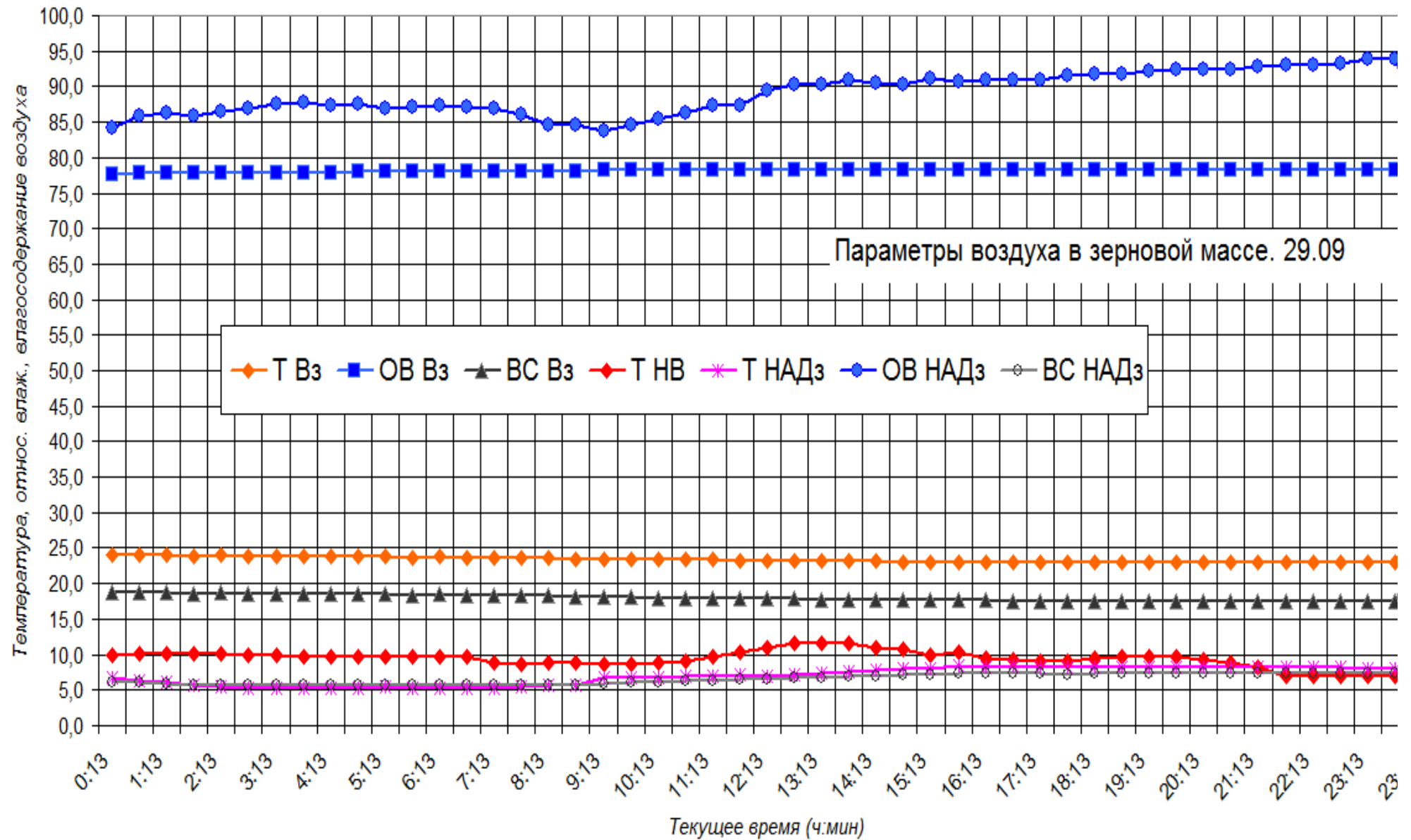


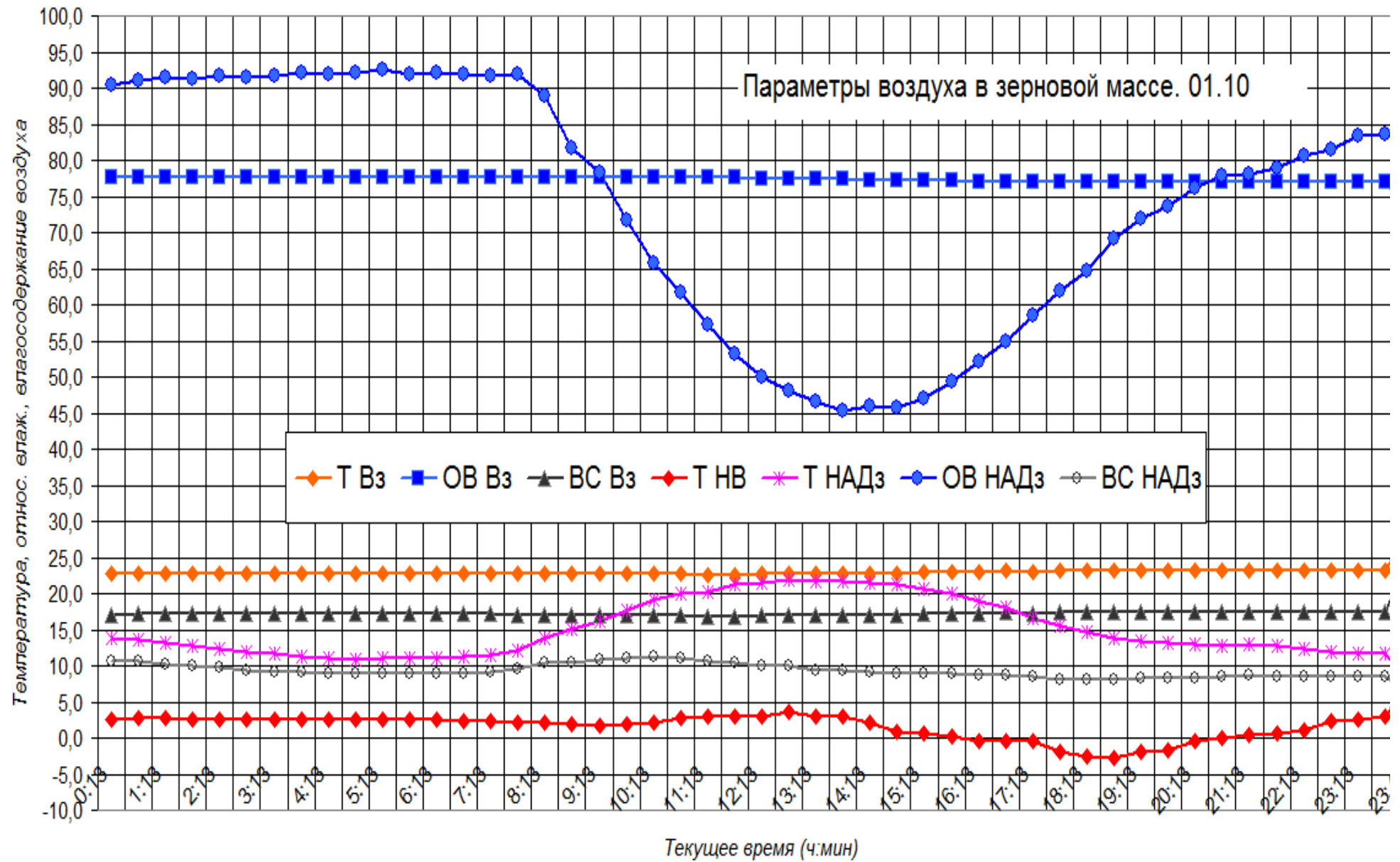


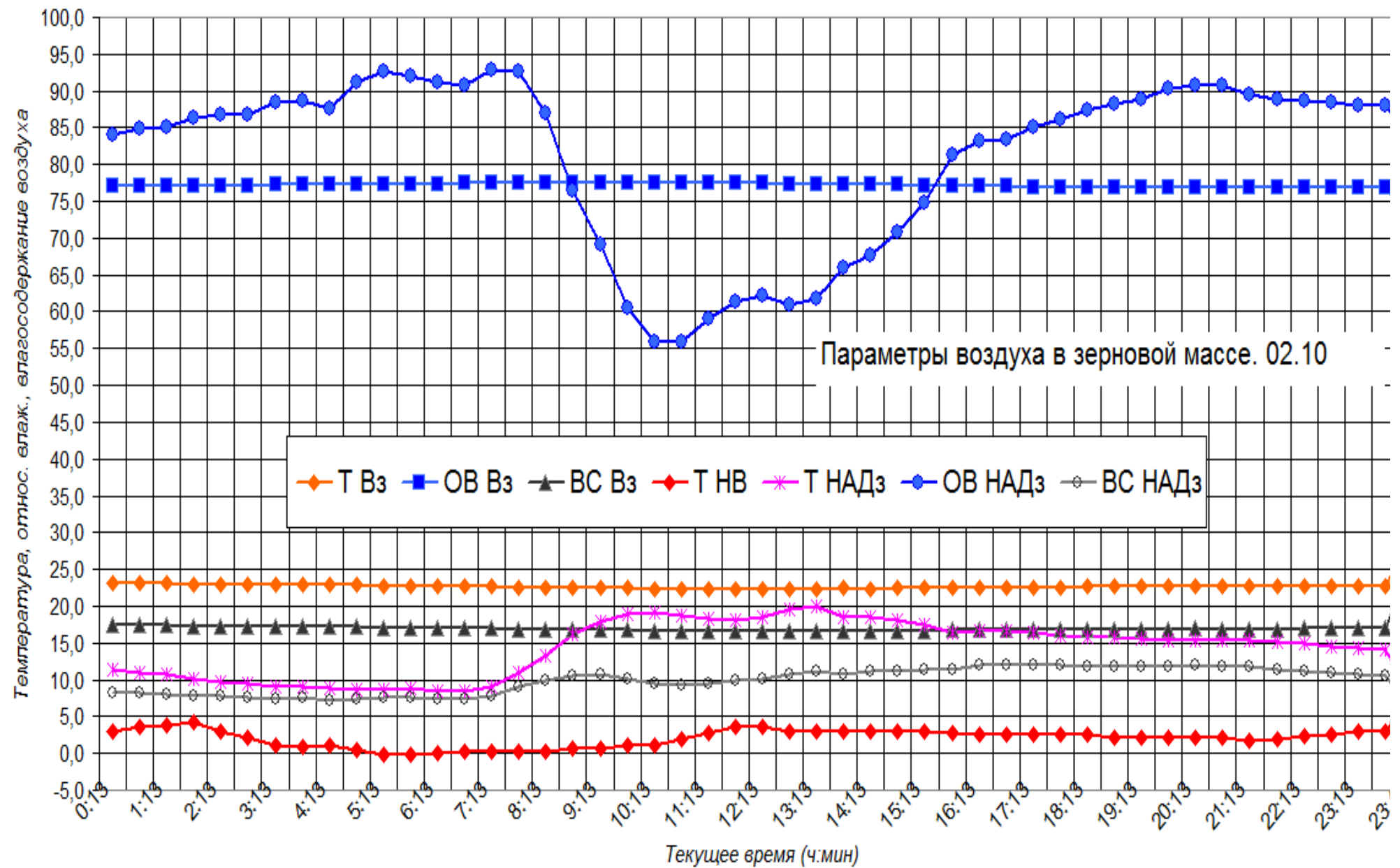


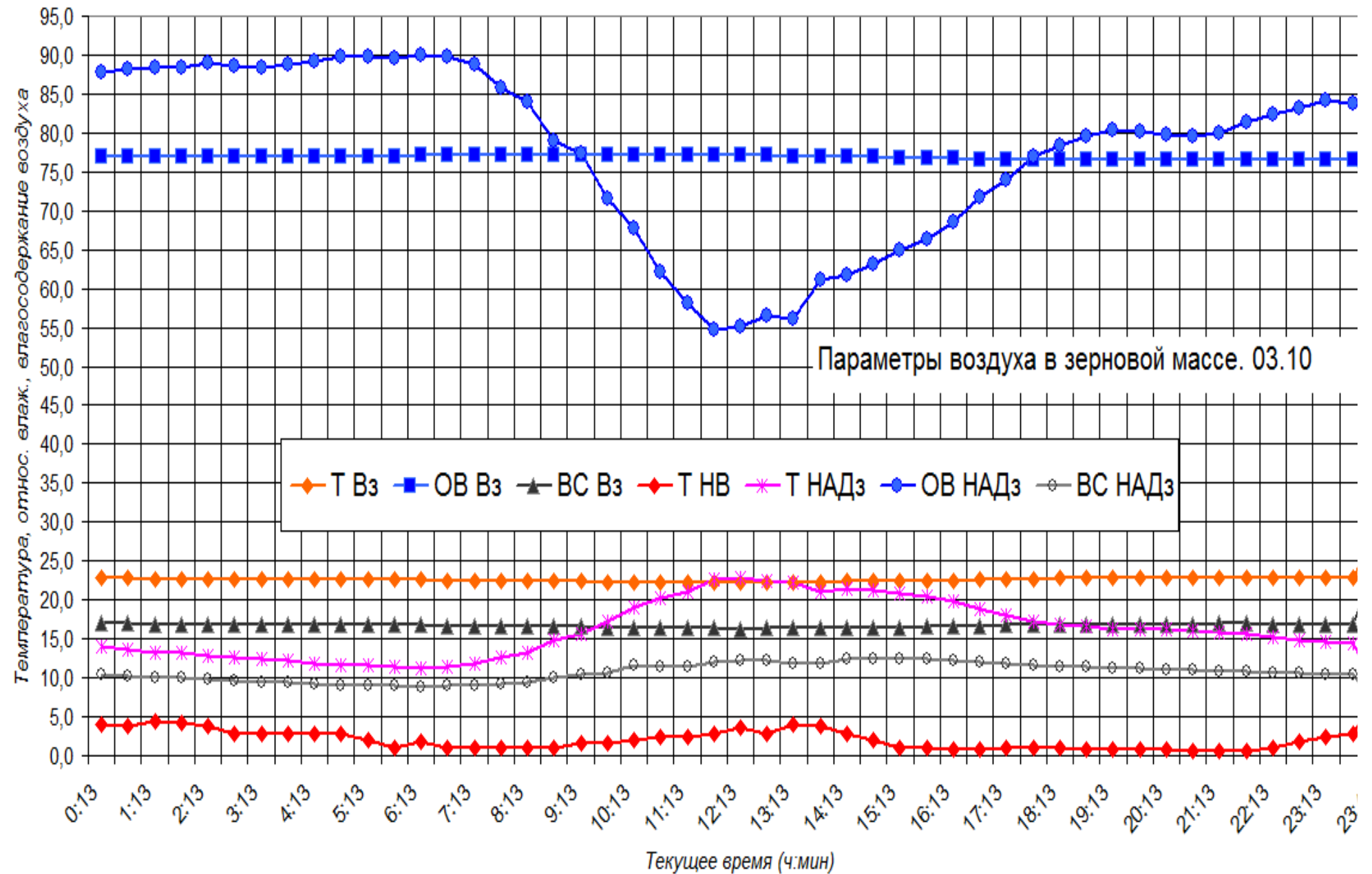


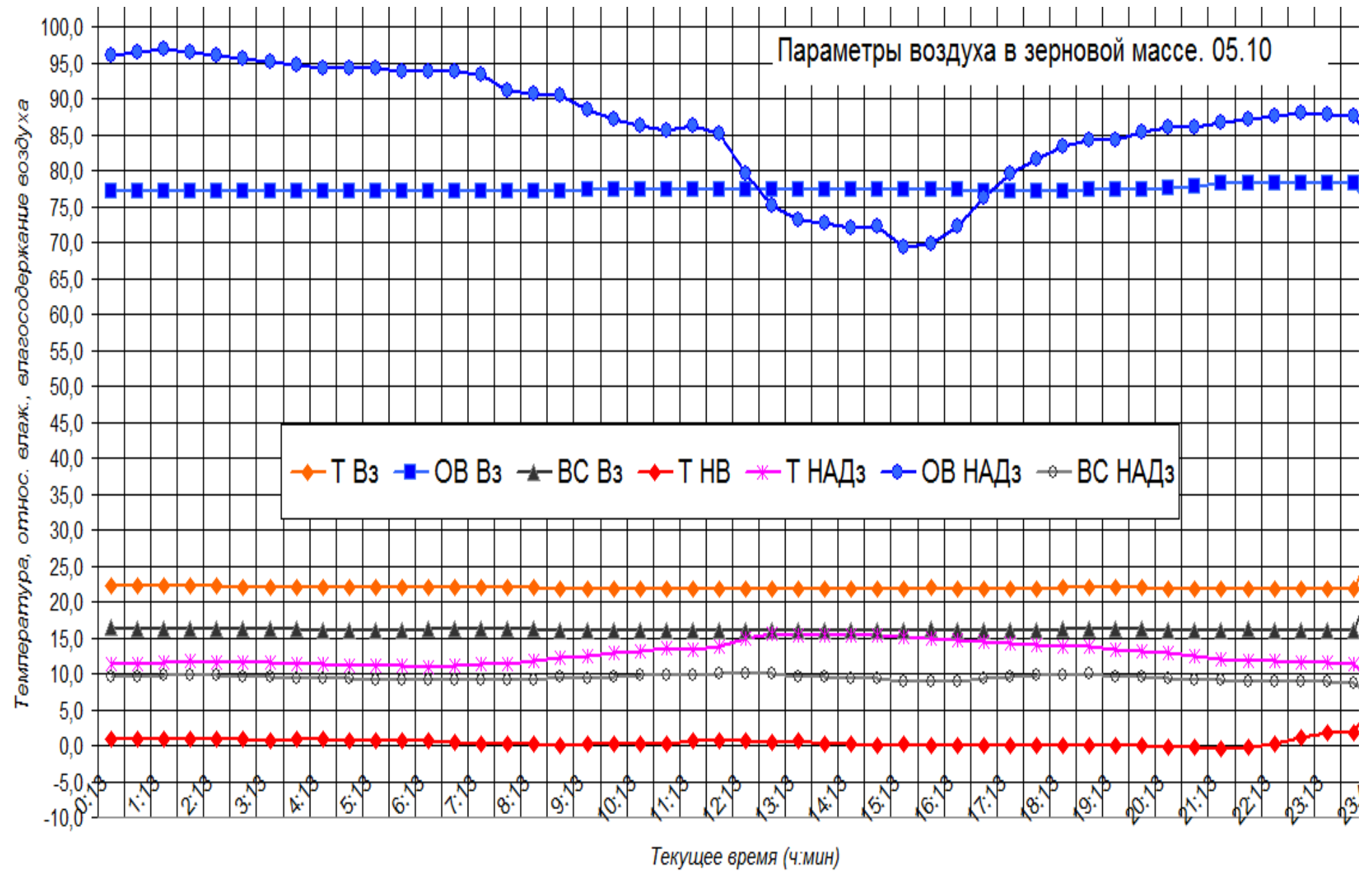


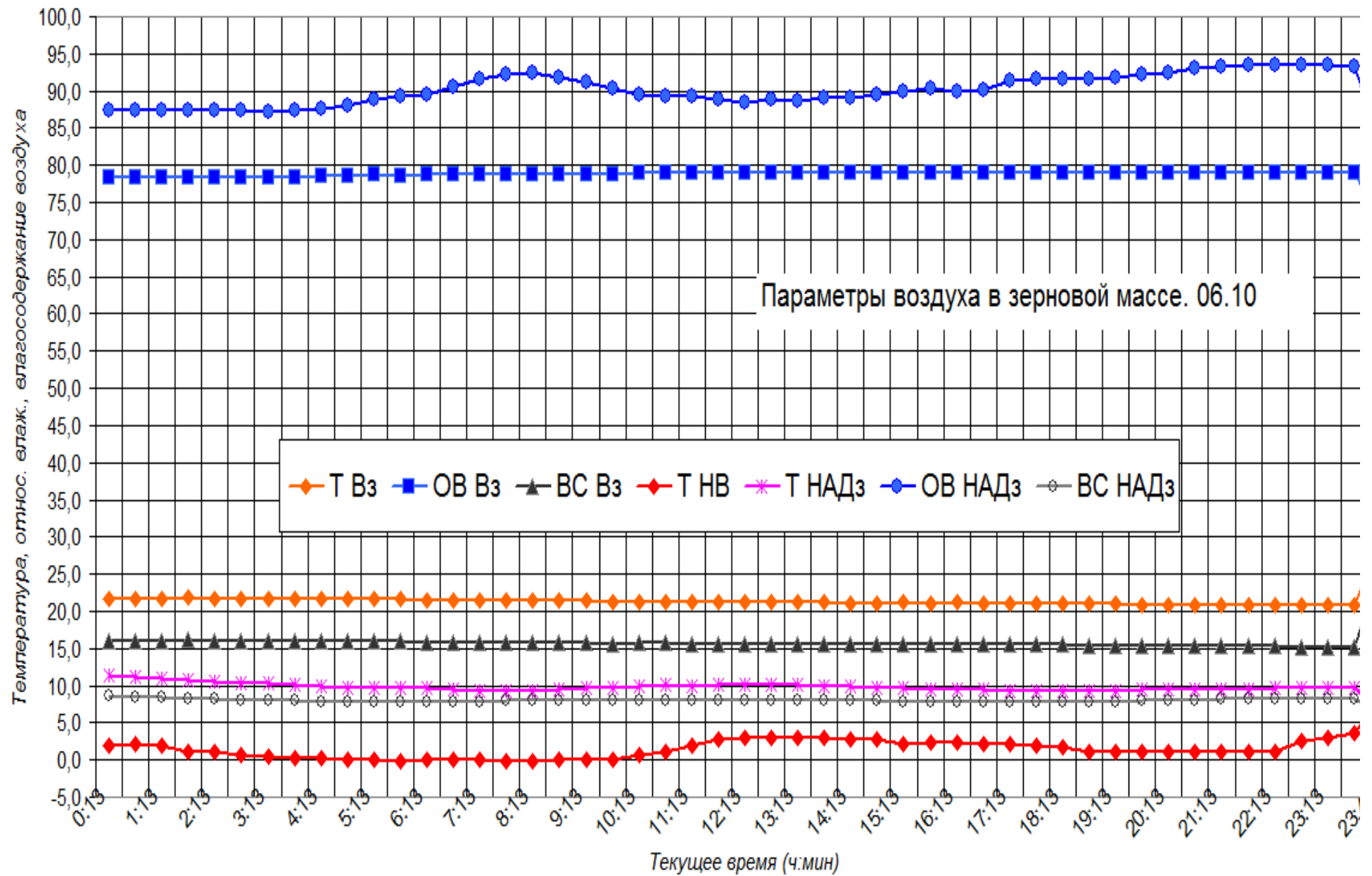


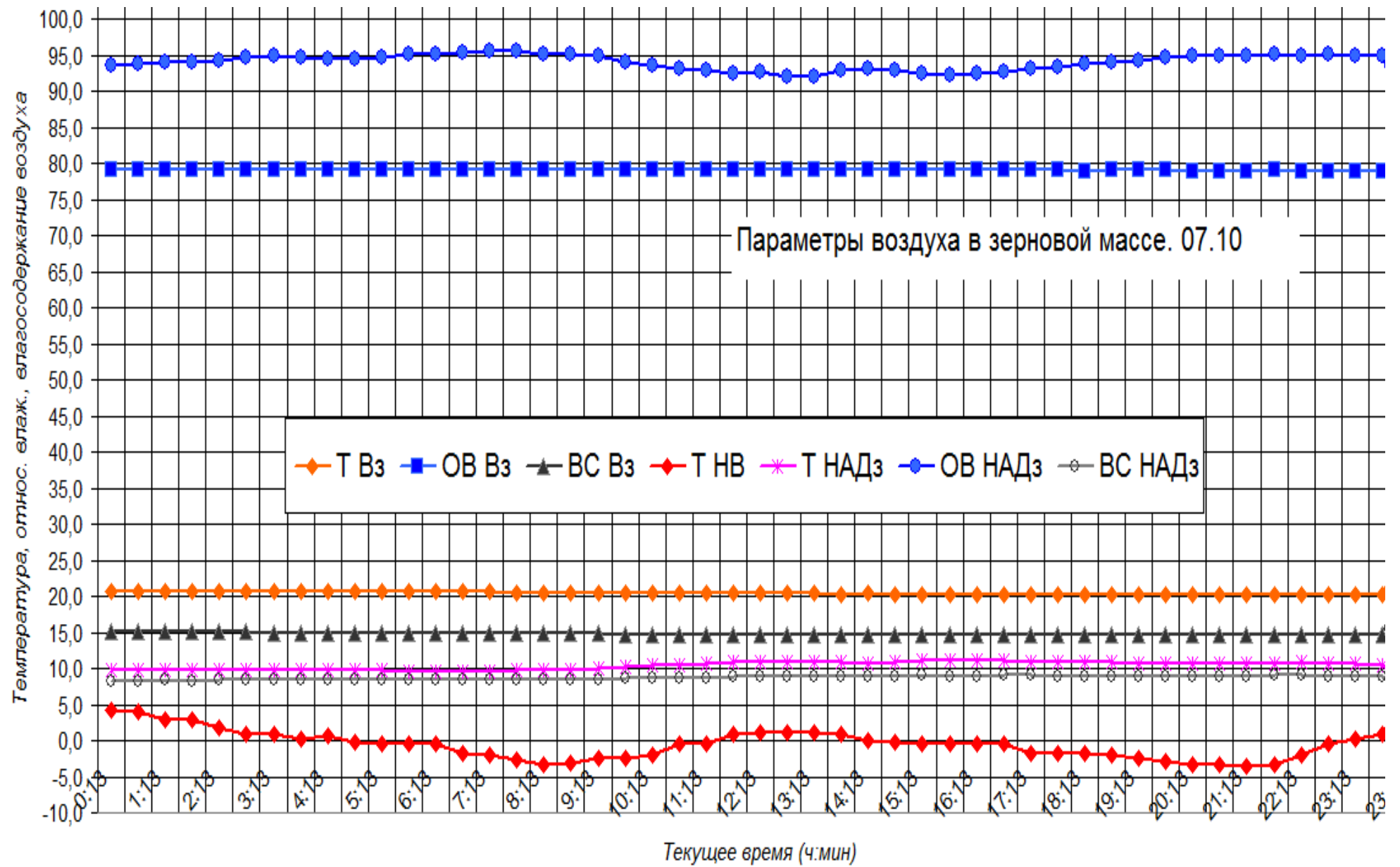


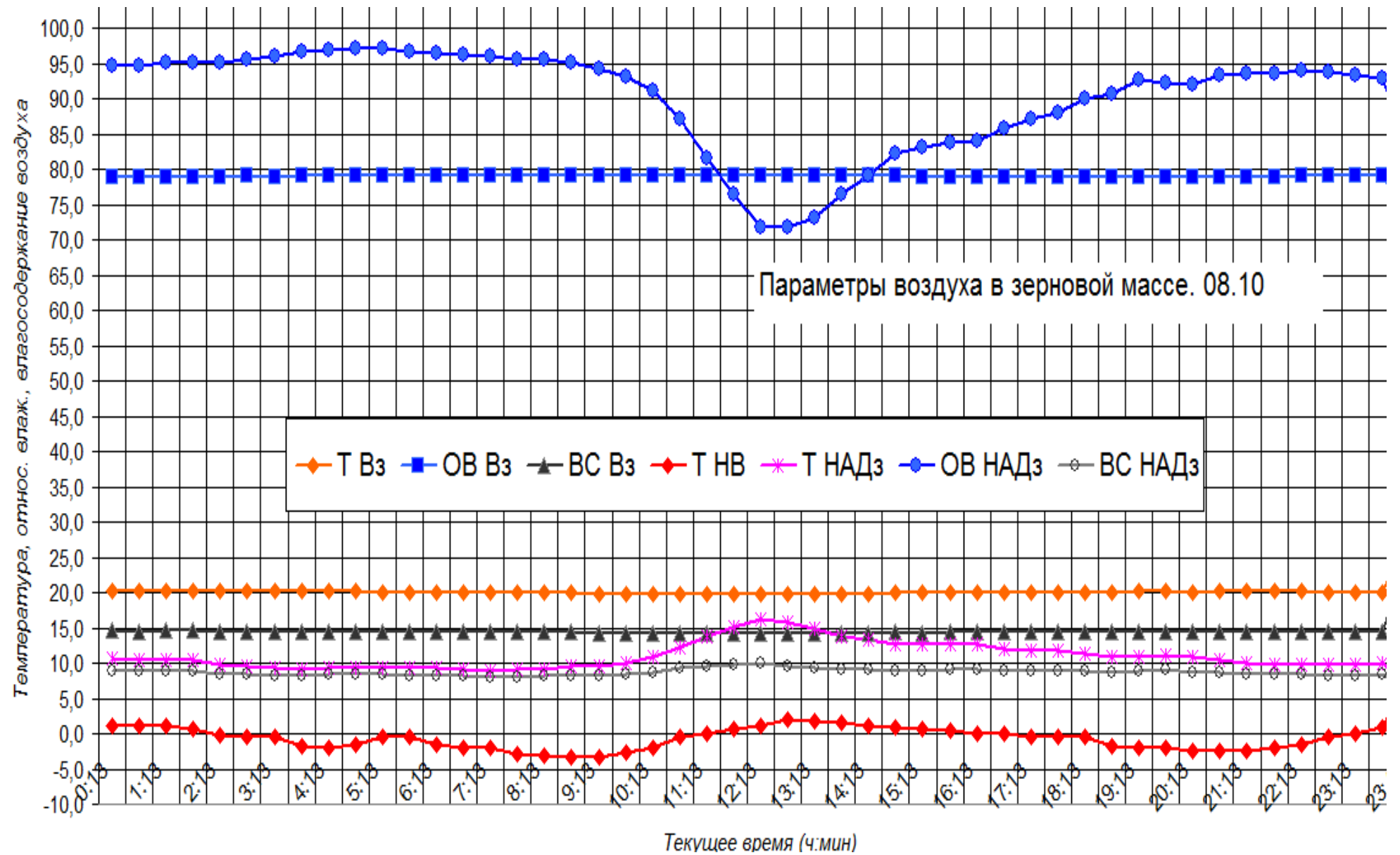


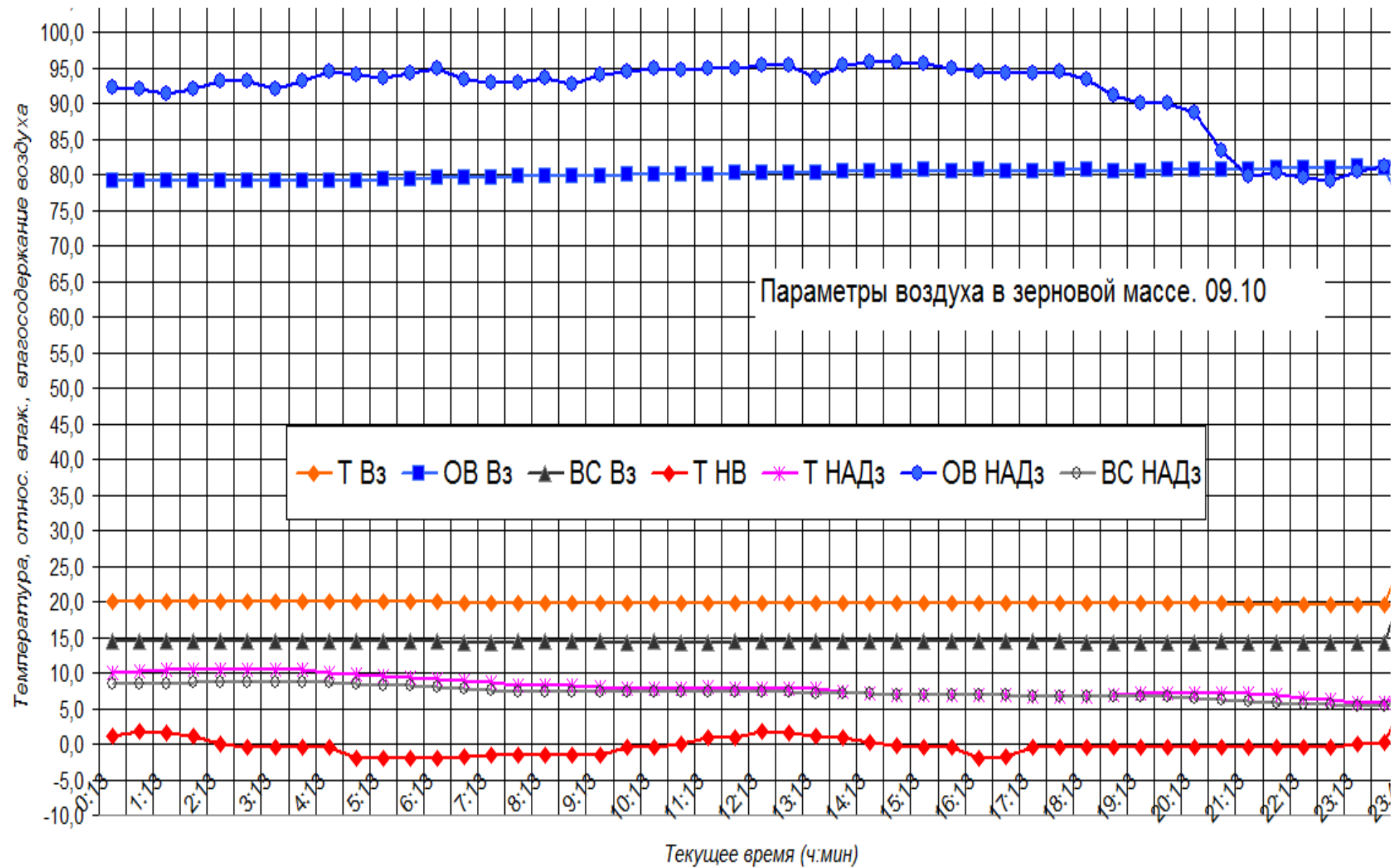


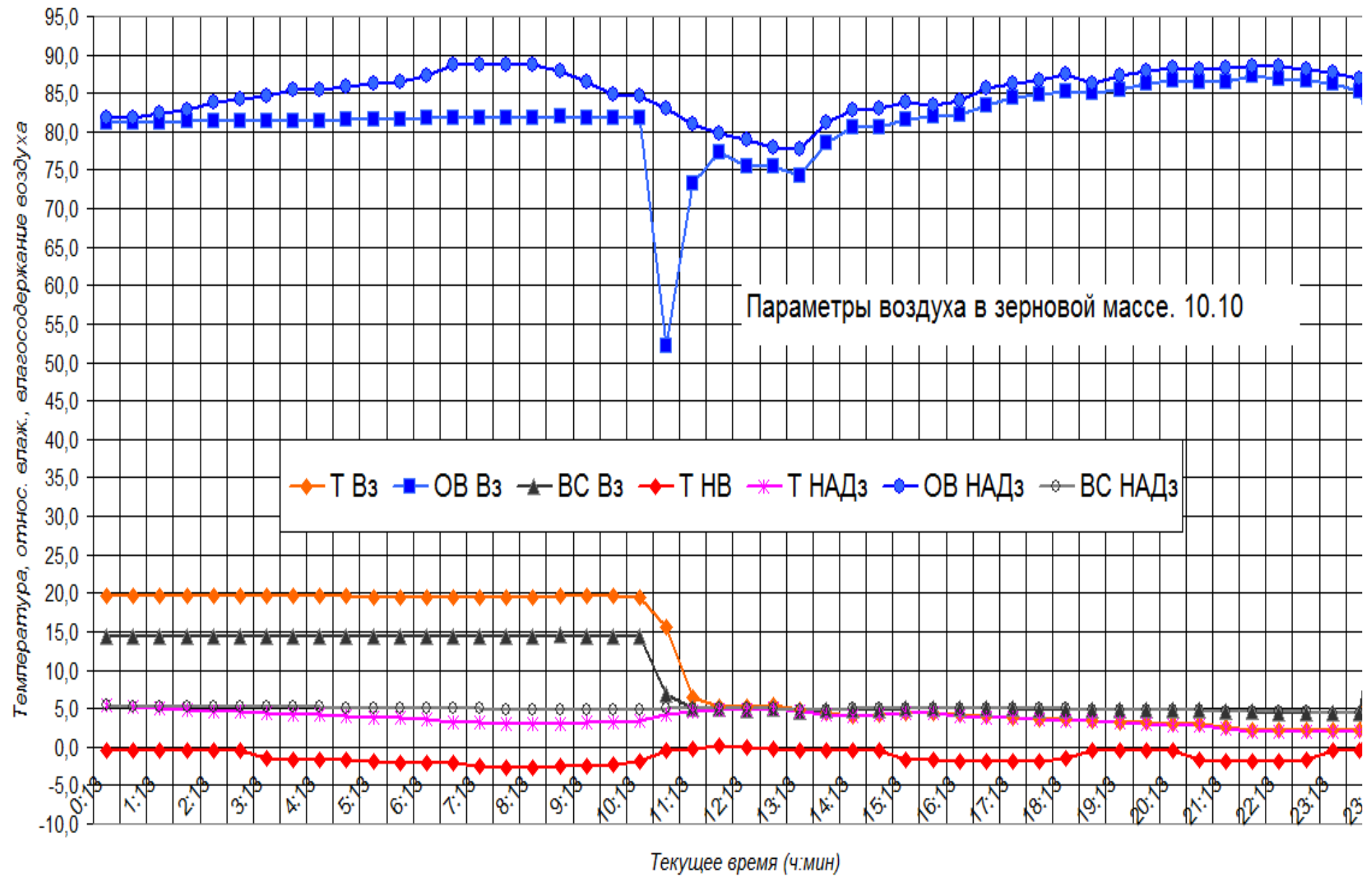


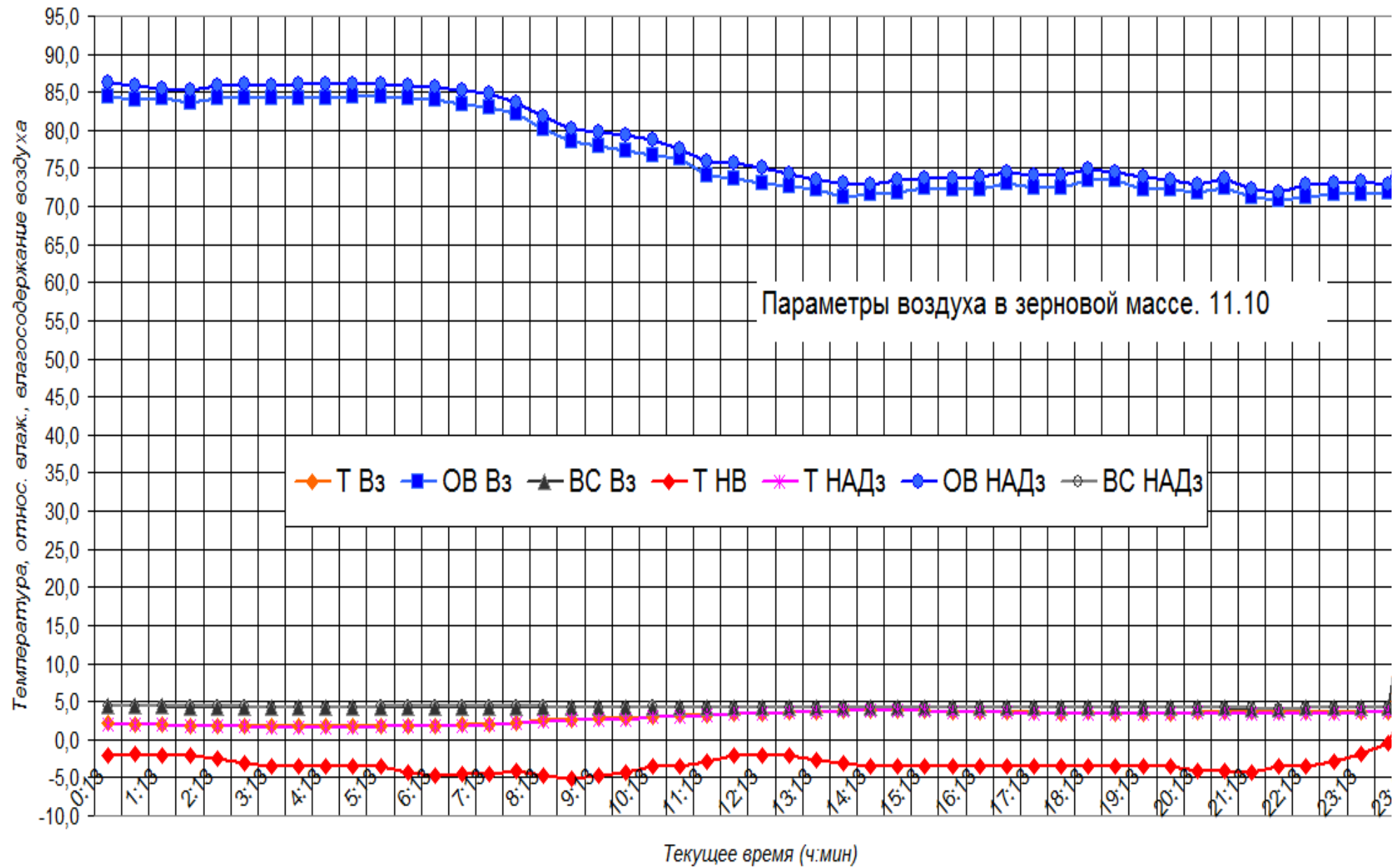


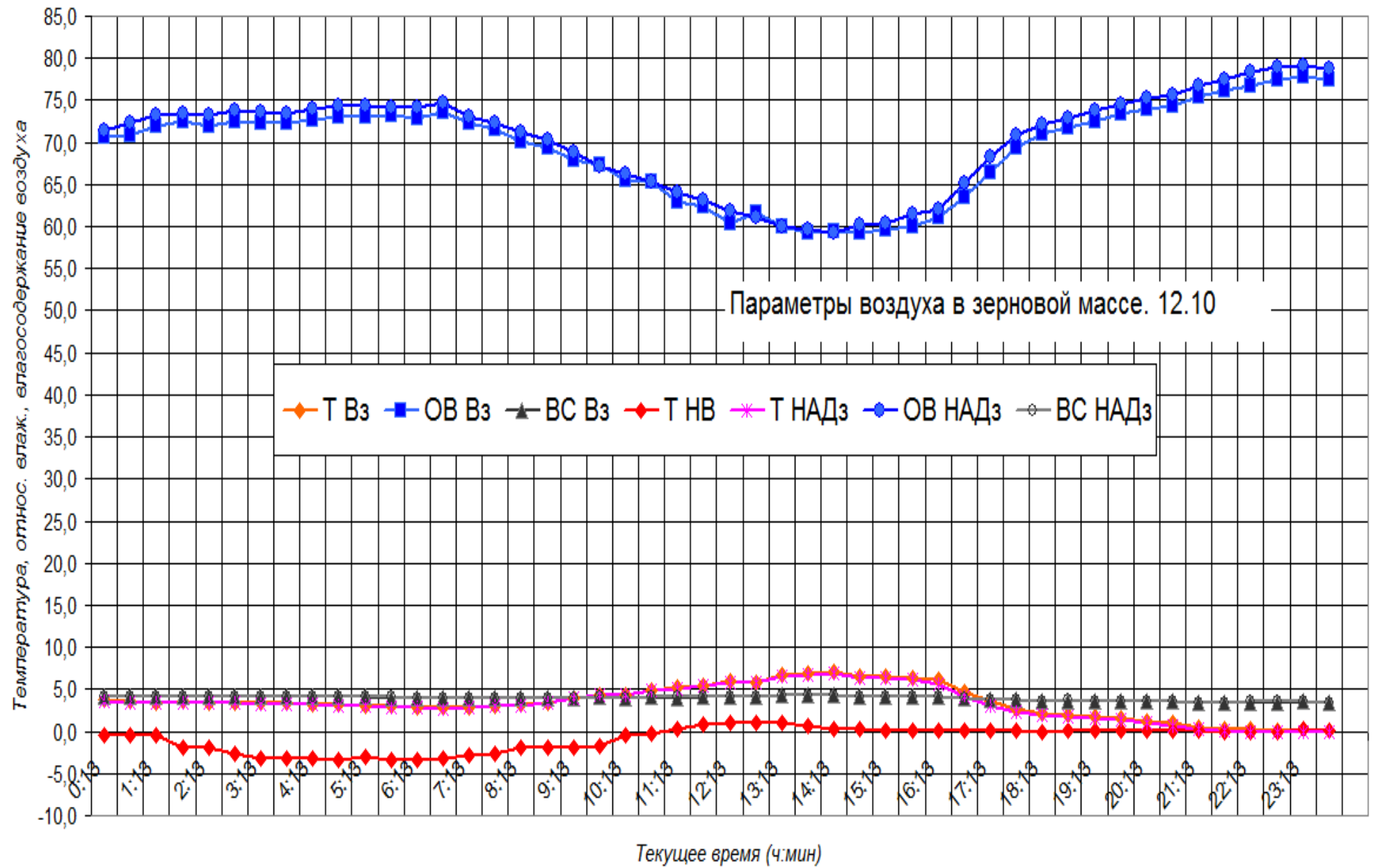


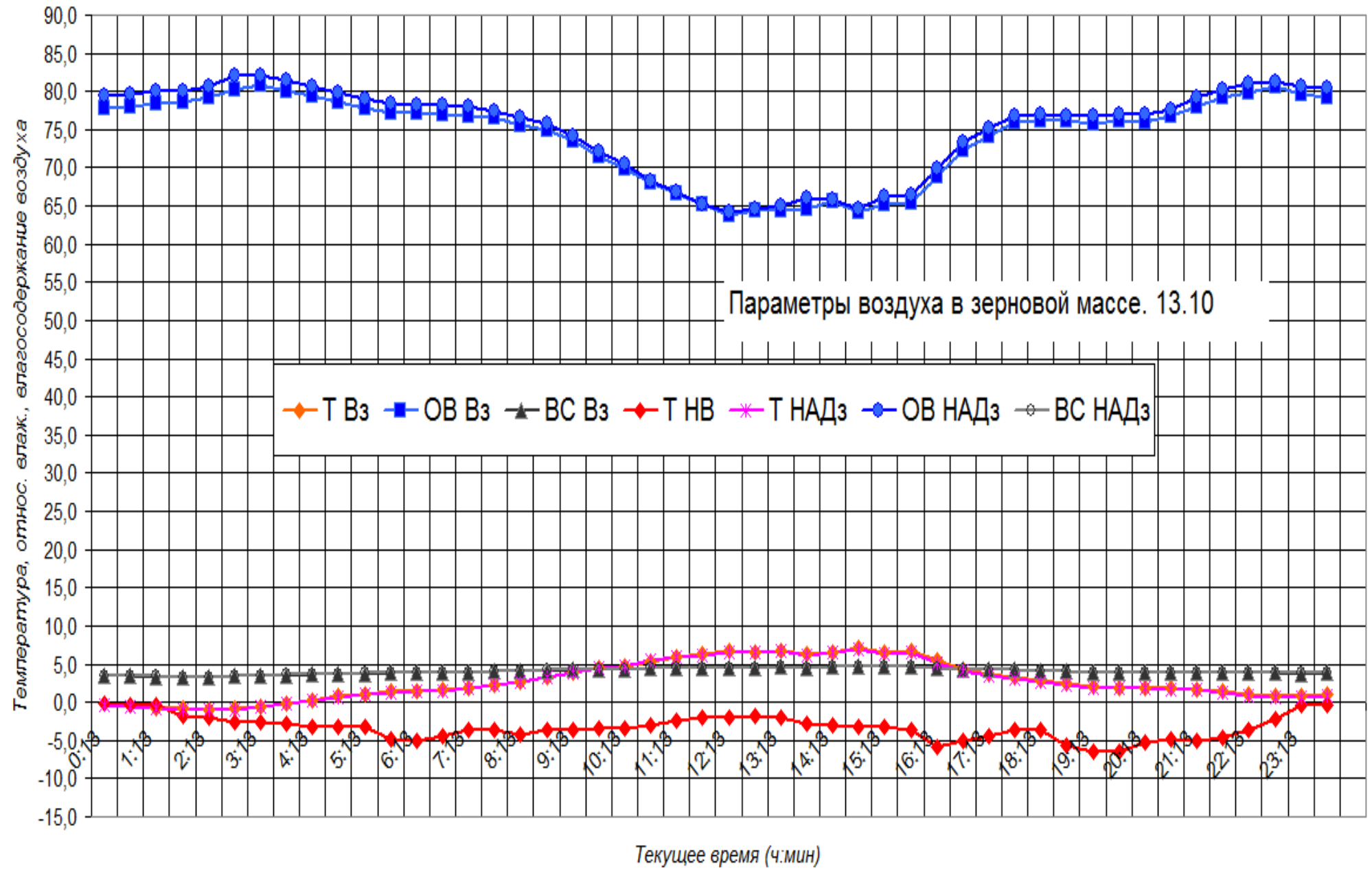


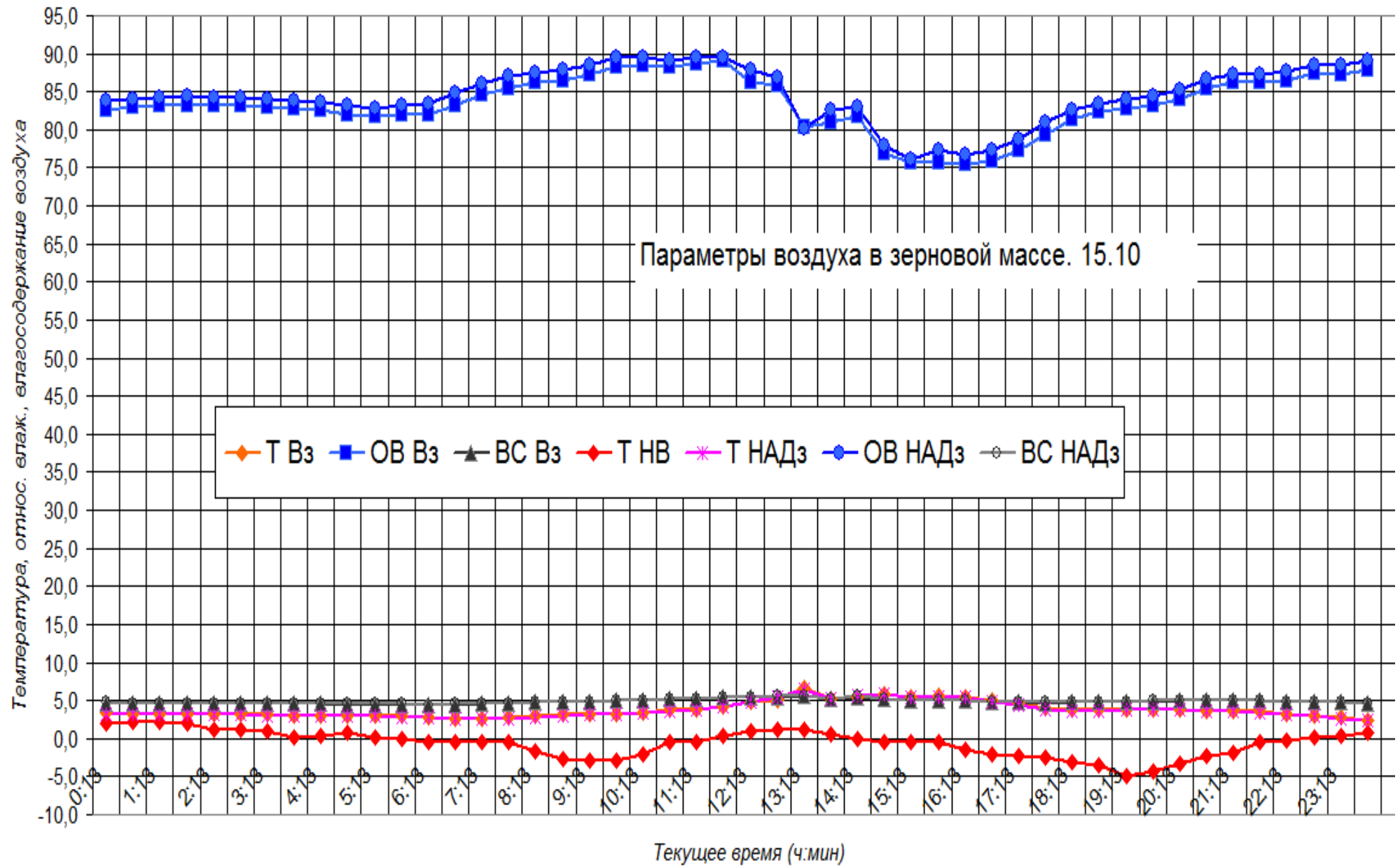


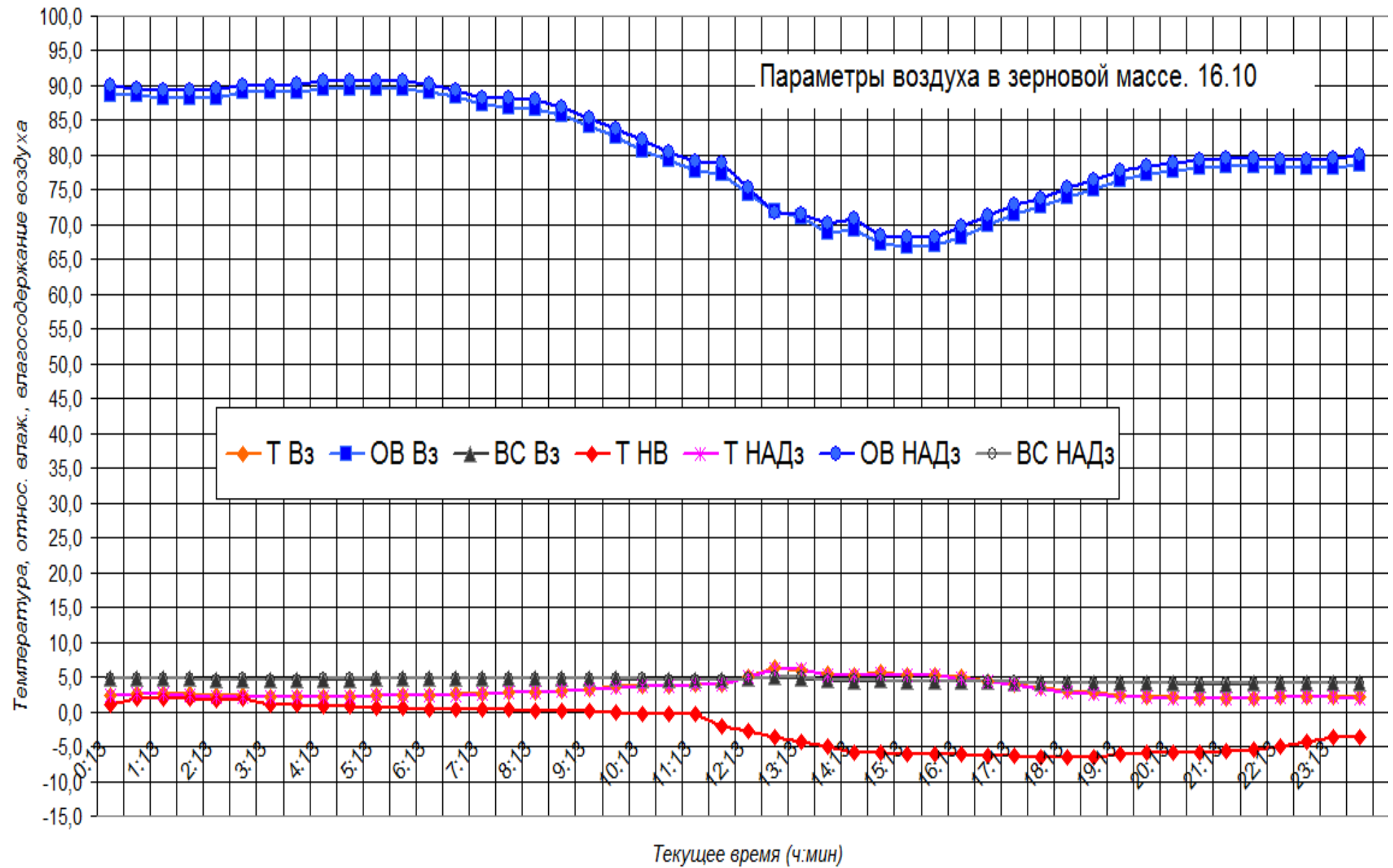


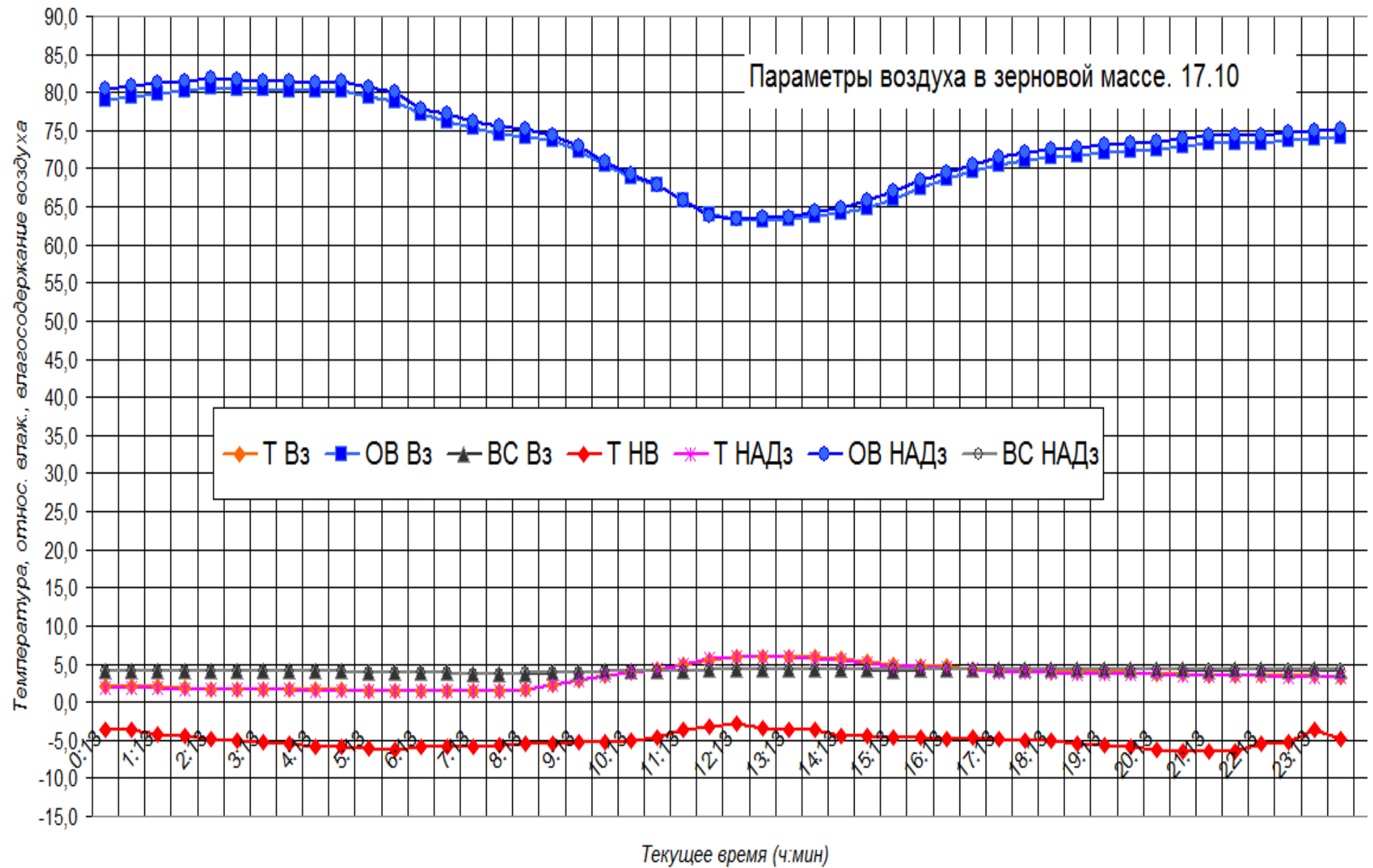


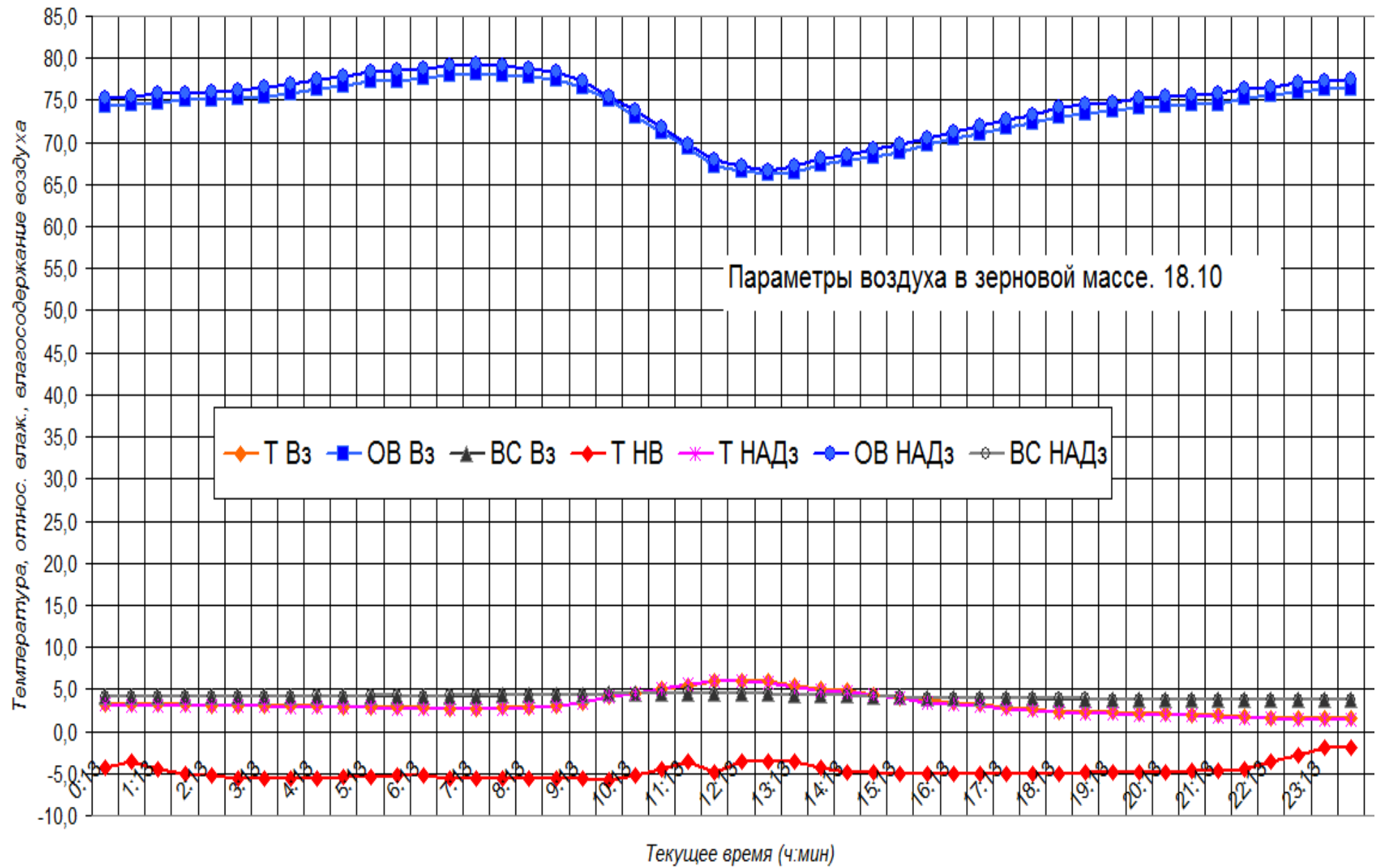


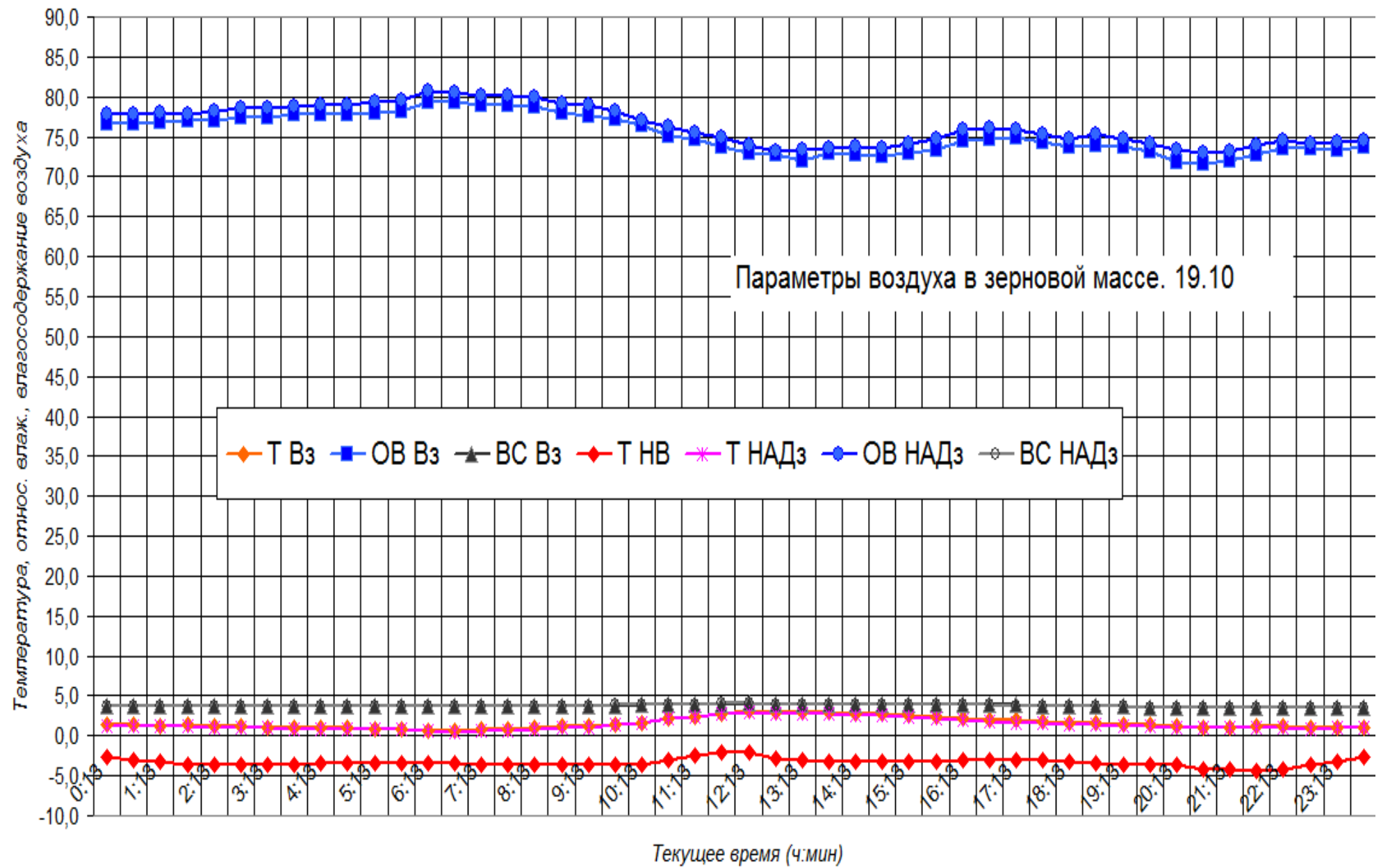












Приложение Б

Программный код обработки данных в программной среде MATLAB.

```
files_in_tables = dir("tables");
l = length(files_in_tables);
AV.temp = zeros(l-2,1);
AV.hum = zeros(l-2,1);
AV.tr = zeros(l-2,1);
for i=3:length(files_in_tables)
path = join(["tables/",files_in_tables(i).name], "");
S=readtable(path);
S=table2array(S);
ls = size(S);
temp = zeros(ls(1)-8,1);
hum = zeros(ls(1)-8,1);
tr = zeros(ls(1)-8,1);
for j = 8:ls(1)
C = textscan([S{j,4}], '%f');
temp(j-7) = C{1,1}(1);
C = textscan([S{j,5}], '%f');
hum(j-7) = C{1,1}(1);
C = textscan([S{j,6}], '%f');
tr(j-7) = C{1,1}(1);
end
AV.temp(i-2) = mean(temp);
AV.hum(i-2) = mean(hum);
AV.tr(i-2) = mean(tr);
end
plot(AV.temp)
```


figure

plot(AV.hum)

figure

plot(AV.tr)

Графики убыли влаги и приращения температуры

tuy = List[t, du]

tu = N[Transpose[tuy]]

gu = ListPlot[tu, Frame -> True, GndLmet -> Automatic, PlotRange ->
Automatic, PlotStyle -> PointSize[0.02], FrameLabel -> ('t,c', "dU"),
RotateLabel -> True]

thy = List[h, du]

th = N[Transpose[thy]]

gh = ListPlot[th, Frame -> True, GridLines -> Automatic, PlotRange ->
Automatic, PlotStyle -> PointSize[0.02], FrameLabel -> ("H, кДж/м2, "U/Uo"),
RotateLabel -> True]

tty = List[t, tt]

tt = N[Transpose[tty]]

gt = ListPlot[tt, Frame -> True, GridLines -> Automatic, PlotRange ->
Automatic, PlotStyle -> PointSize[0.02], FrameLabel -> ('t,c', "dΓ"),
RotateLabel -> True]

МОДЕЛЬ НАГРЕВА

T_1 = List[t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8, t9]

Dt_1 = List[dt1, dt2, dt3, dt4, dt5, dt6, dt7, dt8, dt9]

k = 9

tlx = tl[[k]]

xy1 = List[tlx, dtl[[k]]]

xy0 = N[Transpose[xy1]]

a = .

b = .

c = .

```

x=.
y=.
f:=a*(1-Exp[-x/b])
wn1 =Nonlinear_ModelFit(xy0, f,{ {a.80.200},{b,10,100}} ,x]
bv2=wn1["RSquared"]
k1 =wn1 ["ParameterTable"]
a=kl[[1,1,2,2]]
b=kl[[1,1,3,2]]
x=.
y=.
fg=a*(1-Exp[-t1[[k]]/b])
mx=Max[fg]
my=Max[dt]
g11 =Plot[x,{x,0,mx+10},Frames->Trues,GridLines->Automatik,FrameLabel -
>{"ΔT расч., °C", "ΔT, C"}]
xy_2=List[fg,dtl[[k]]]
xy_3=N[Transpose[xy2]]
g_12=ListPlot[xy3,Frame->True,GridLines->Automatic,PlotRange-
>{0,my+10},PlotStyle->PointSize[0.02], FrameLabel->{"ΔT расч., °C","ΔT,
°C"},Rotate_Label->True]
Show[g_11,g_12]
МОДЕЛЬ НАГРЕВА по данным U0=с учетом температуры среды
1 - c*Tc
lt=Join[t1,t2,t3]
lts=Join[ts1,ts2,ts3]
1 dtt=Join[dt1 ,dt2,dt3]
t=Join[t4,t5,t6]
ts=Join[ts4,ts5,ts6]
dtt=Join[dt4,dt5 ,dt6]
Length[t1]

```

```

Length[tc]
Length[dt]
xyl=List_[t,ts,dt]
xy0=N[Transpose[xy1]]
a=.
b=.
c=.
x=.
y=.
f:=a*(1-Exp[-x/b/(1-c*y)])
wn1 =NonlinearModelFit_[xy0,f,{a,10,200},{b,50,10000},{c,0,200}}, {x,y}]
bv2=wn1["RSquared"]
kl=wn1["ParameterTables"]
a=kl[[1, 1,2,2]]
b=kl[[1,1,3,2]]
c=kl[[1,1,4,2]]
x=.
y=.
fg=a*(1-Exp[-t/b/(1-c*ts)])
mx=Max[f_g]
my=Max[dt]
g11 =Plot[x,{x,0,mx+10},Frame->
True,GridLines->Automatic,FrameLabel->
{"ΔTpacч.,°C","ΔT,°C"}]
xy2=List[fg,dt]
xy3=N[Transpose[xy2]]
g12=ListPlot[xy3,Frame->True,GridLines->
Automatic,PlotRange->{0,my+10},
PlotStyle->PointSize[0.02],
FrameLabel->{"ΔTpacч.,°C","ΔT,°C"} ,RotateLabel ->True]

```

```

Show[g11 ,g12]
TcΛc
xy1=List[t,ts,dt]
xy0=N[Transpose[xy1]]
a=.
b=.
c=.
x=.
y=.
f:=a*(1-Exp[-x/b/yΛc])
wn1=NonlinearModelFit_[xy0,f,{ {a,10,200},{b.50.10000},{c.0.200}},
{x,y}]
bv2=wn1["RSquared"]
k1=wn1["ParameterTable"]
a=k1[[1,1,2,2]]
b=k1[[1,1,3,2]]
c=k1[[1,1,4,2]]
x=.
y=.
fg=a*(1-Exp[-t/b/tsΛc])
mx=Max[f_g]
my=Max[dt_t]
g11 =Plot[x,{x,0,mx+10},Frames->
True,GridLines->Automatik,FrameLabels->
{"ΔTpacч., °C","ΔT, °C"}]
xy2=List[fg,dt]
xy3=N[Transpose[xy2]]
g12=ListPlot[xy3,Frame->True,GridLines->
Automatic,PlotRange->{0,my+10},
PlotStyle—>PointSize[0.02], FrameLabel->{"ΔTpacч, °C","ΔT, °C"}],

```

```

RotateLabel->True]
Show[g11,g12]
Совокупные данные с учтенной температурной средой
t=Join[t1,t2,t3,t4,t5,t6,t7,t8,t9]
ts=Join[ts1,ts2,ts3,ts4,ts5,ts6,ts7,ts8,ts9]
dt_t=Join[dt1,dt2,dt3,dt4,dt5,dt6,dt7,dt8,dt9]
Length[t]
Length[ts]
Length[dt_t]
xy1=List[t,ts,dt]
xy0=N[Transpose[xy1]]
a=.
b=.
c=.
x=.
y=.
z=.
f:=a*(1-Exp[-x/b/(1-c*y)])
wn1 =NonlinearModelFits[xy0, f,{ {a,10,200},{b,20,80},{c,0,0.1}},{x,y}]
bv2=wn1["RSquared"]
k1=wn1["ParameterTable"]
a=k1[[1,1,2,2]]
b=k1[[1,1,3,2]]
c=k1[[1,1,4,2]]
x=.
fg=a*(1-Exp[-t/b/(1-c*ts)])
mx=Max[fg]
my=Max[dt]
g11 =Plot[x,{x,0,mx+10},Frame->
True,GridLines->Automatic,FrameLabels->

```

```

{"ΔТрасч., °C","ΔТ, °C"}],
xy2=List_[fg,dt]
xy3=N[Transpose[xy2]]
g12=ListPlot[xy3 ,Frame->True,GridLines->
Automatic,PlotRange->{0,my+10},PlotStyle->
PointSize[0.02], FrameLabel->
{"ΔТрасч., °C","ΔТ, °C"}],RotateLabel->True]
Show_[g1_1,g1_2]

```

Совокупные данные с учетом температурной среды и влагосодержания исходного

```

t=Join[t1,t2,t3,t4,t5,t6,t7,t8,t9]
ts=Join[ts1,ts2,ts3,ts4,ts5,ts6,ts7,ts8,ts9]
dt=Join[dt1,dt2,dt3,dt4,dt5,dt6,dt7,dt8,dt9]
u0=Join[u10,u20,u30,u40,u50,u60,u70,u80,u90]
Length[t]
Length[ts]
Length[dt]
Length[u0]
xy1=Lists[t,ts,u0,dt]
xy0=N[Transpose[xy1]]
a=.
b=.
c=.
x=.
y=.
z=.
f:=a*(1-Exp[-x/z/b/(1-c*y)])
wnl=NonlinearModelFit[xy0,f,{a,10,200},{b,20,80},{c,0,1},{x,y,z}]
bv2=wnl["RSquared"]
k1=wnl["ParameterTable"]

```

```

a=k1[[1,1,2,2]]
b=k1[[1,1,3,2]]
c=k1[[1,1,4,2]]
x=.
fg=a*(1-Exp[-t/u0/b/(1-c*ts)])
mx=Max[fg]
my=Max[dt]
g11=Plot[x,{x,0,mx+10},Frame->
True,GridLines->Automatic,FrameLabel->
{"ΔТрасч, °C", "ΔТ, °C"}],
xy2=List_[fg,dt]
xy3=N[Transpose[xy2]]
g12=ListPlot[xy3,Frame->True,GridLines-> Automatic, PlotRange->
{0,my+10},PlotStyle->PointSize[0.02],FrameLabel->
{"ΔТрасч., °C", "ΔТ, °C"}],RotateLabel->True]
Show[g11,g12]
Interrupt[]

```

МОДЕЛИ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ИНТЕГРАЛЫ

```

tta=Exp[-ta/(273+tt0+tc*ttx)]
y1=List[t,tta]
yy=N[Transpose[y1]]
yt=Take[yy,{1,n1}]
zz:=Take[yt,i]
zi:=ListIntegrates[zz,3]
xy=Table[zi,{i,1,n1}]
z1=xy
n1=n1+1
n12
n2
yt=Take[yy,{n11,n12}]

```

```

Length[yt]
zz:=Take[yt,i]
zi:=ListIntegrate[zz,3]
xy=Table[zi,{i,1,n2}]
z2=xy
n21=n12+l
n13
n3
yt=Take[yy,{n21,n13}]
Length[yt]
zz:=Take[yt,i]
zi:=ListIntegrate[zz,3]
xy=Table[zi,{i,1,n3}]
z3=xy
n31=n13+l
n14
n4
yt=Take[yy,{n31,n14}]
Length[yt]
zz:=Take[yt,i]
zi:=ListIntegrate[zz,3]
xy=Table[zi,{i,1,n4}]
z4=xy
n41=n14+l
n15
n5
yt=Take[yy,{n41,n15}]
Length[yt]
zz:=Take[yt,i]
zi:=ListIntegrate[zz,3]

```



```

xy=Table[zi,{i,1,n5} ]
z5=xy
n51=n15+1
n16
n6
yt=Take[yy,{n51,n16} ]
Length[yt]
zz:=Take[yt,i]
zi:=ListIntegrate[zz,3]
xy=Table[zi,{i,1,n6} ]
z6=xy
xys=Join[z1,z2,z3,z4,z5,z6]
Length[xys]
Length[u0]
Length[uu]
xy1:=List[uu,xys]
xy0=N[Transpose[xy1]]
ListPlot[xy0,Frame ->True,GridLines ->Automatic,PlotRange ->
Automatic, PlotStyle->PointSize[0.02], FrameLabel ->{"U/UO","F(T,t)"},
RotateLabel->True]
a=.
b=.
x=.
f:=-a*Log[x]
wnl=NonlinearModelFit[xy0,f,a,x]
bv2=wnl["RSquared"]
av2=wnl["BestFitParameters"]
Interrupt[]
a=.
b=.

```

```

x=.
y=.
xy2:=List[u0,uu,xys]
xy3=N[Transpose[xy2]]
f:=-a*yΛ(1-b) * (xΛ(1-b)-1)/(1-b)
wn2=NonlinearModelFit[xy3,f,{a,0.005},{b,5},{y,x}]
av1 =wn2["RS quared"]
bv1 = wn2["BestFitParameters"]
Interrupt[]
ac=Input["Ввестиa"]
bc=Input["Ввестиb"]
a=ac
b=bc
f1 =-u0Λ(1-b)* (uuΛ(1-b)-1)/(1 -b)
xy4=List[xys,f1]
xy5=N[Transpose[xy4]]
gut=ListPlot[xy5,Frame->True,GridLines->Automatic,
PlotRange->Automatic,PlotStyle->PointSize[0.02],
FrameLabel->{"F(T,t)","F(U)" },RotateLabel->True]
xy
xm=Max[xy]
gl:=Plot[x/a,{x,0,xm}]
Show[gut,gl]

```

Приложение В (справочное)

БиоТехнологии АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

393000, Тамбовская обл., Никифоровский район, р. п. Дмитриевка, ул. Колхозная, д.18, тел/факс (47536) 3-08-54
ИНН: 6811005988, КПП: 681101001, ОГРН: 1076807000380.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК КЕЧКИНА ИВАНА АЛЕКСАНДРОВЧИА

Настоящим актом подтверждаем, что результаты научных исследований Кечкина Ивана Александровича, выполненные в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, посвященной повышению эффективности процессов охлаждения зерна при активном вентилировании в металлических силосах большой ёмкости приняты к использованию на предприятии АО «БИОТЕХНОЛОГИИ».

Результаты исследований Кечкина Ивана Александровича актуальны, представляют практический интерес для эффективного внедрения на предприятиях хранения и переработки пищевой продукции.

Кечкин / И.А. Кечкин/
«10» августа 2019 г.

Заведующий ПТЛ
Долгих /Н.В. Долгих/
«10» августа 2019 г.



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
 «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН

ДИПЛОМ

*За лучшую работу, представленную молодым ученым
 21-ой Международной научно-практической конференции,
 посвященной памяти Василия Матвеевича Горбатова*

Кечкин И.А.

**ХРАНЕНИЕ ЗЕРНА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ
 СИЛОСЕ ВМЕСТИМОСТЬЮ 10000 ТОНН**

Врио Директора
 ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем
 им. В.М. Горбатова» РАН, д.т.н.



О.А.Кузнецова

Москва - 2018





