

Особенности изменения температуры пристенных слоев зерна пшеницы при хранении в силосах элеваторов

Лоозе Валерий Владимирович

ФГБУ Научно-исследовательский институт проблем хранения Росрезерва

Адрес: Москва, 11033, Волочаевская ул. д. 40, корп. 1

E-mail: vaalfa@yandex.ru

Гурьева Ксения Борисовна

ФГБУ Научно-исследовательский институт проблем хранения Росрезерва

Адрес: Москва, 11033, Волочаевская ул. д. 40, корп. 1

E-mail: guriewa.ksen@yandex.ru

Белецкий Сергей Леонидович

Всероссийский научно-исследовательский институт кондитерской

промышленности – филиал Федерального научного

центра пищевых систем им. В. М. Горбатова

Адрес: Москва, 107023, Электrozаводская ул. д. 20, стр. 3

E-mail: grain-miller@yandex.ru

Костромина Татьяна Геннадьевна

ФГБУ Научно-исследовательский институт проблем хранения Росрезерва

Адрес: Москва, 11033, Волочаевская ул. д. 40, корп. 1

E-mail: kazbanova.t@yandex.ru

Динамика изменения внутренних температур в железобетонных силосах освещена в отечественных и зарубежных исследованиях в недостаточной мере. Цель данной статьи – изучение динамики изменения температуры зерна в центре силоса традиционным способом с помощью термоподвесок, а также по горизонтальным слоям, определение толщины пристенного зернового слоя подверженного наибольшему нагреванию/охлаждению, а также выделения в нём критичного слоя. Представлен анализ результатов мониторинга температурного режима хранения пшеницы с помощью измерительной системы из термогигрометров (логгеров) типа DS1923-F5. Исследование проведено в течение годового цикла в наружных силосах элеватора, расположенного в умеренном климате Западно-Сибирской климатической области. Изучено распределение температур по вертикали силосов по трем уровням (верхний, средний и нижний), распределение температур по горизонтали силосов (на разном расстоянии от стенки силоса от 5 до 75 см). Сделан сравнительный анализ данных температурного режима в силосах, расположенных с южной и северной сторон элеватора. Получены новые оригинальные данные с термогигрометров, которые статистически обработаны. Определена толщина пристенного слоя зерновой массы, наиболее подверженного нежелательным температурным воздействиям для наружных силосов южной и северной сторон элеватора. пристенных слоёв зерна и отстоящих от наружной стены до одного метра. Показано, что наиболее критичным с более высокой температурой является верхний уровень, где необходимо более тщательно контролировать качество зерна. Средний и нижний уровни находятся в более благоприятных температурных условиях сохранности. К наиболее критичным горизонтальным слоям зерна (т.е. имеющим в летний период температуру выше 15 °C) на нижнем уровне отнесены слои от пристенного до отстоящего от стен силоса на 35 см, а на верхнем уровне все слои от пристенного до отстоящего от стен силоса на 75 см.

Ключевые слова: температура, контроль, термоподвеска, термогигрометр, южная сторона, северная сторона, климат, зерно, пшеница, качество, хранение, наружный силос, элеватор, железобетон, теплопроводность

Введение

Влияние температуры хранения на качество зерна

В зерне, заложенном на длительное хранение, продолжают процессы обмена веществ, свойственные живым организмам. Их интенсивность при определенных неблагоприятных условиях может повыситься настолько, что значительно изменяется состав и свойства компонентов. Исследования, посвященные влиянию условий хранения на качество зерна разных культур (Тохтиева, 2016; Черкасов, 2013; Усатиков & Малеева, 2007), свидетельствуют о том, что температурный режим хранения является определяющим фактором сохранности зерна. Возможными причинами нагрева зерна в период хранения являются дыхательные, микробиологические процессы и развитие вредителей. В результате дыхательных процессов происходят биологические потери зерна. Многочисленные исследования показали отрицательное влияние повышенных температур на интенсивность дыхания зерна (Гурьева & Иванова, 2016; Орловцева и др., 2016). Энергия дыхания возрастает при повышении температуры и влажности, а резко увеличивается при увеличении влажности до значения 15 % и температуры до 30.

Влияние условий хранения на биологические свойства и пораженность плесневыми грибами зерна пшеницы и ячменя было изучено (Waszkiewicz & Sypula, 2008). Ими было показано увеличение числа плесневых грибов родов *Aspergillus* и *Penicillium* с возрастанием влажности зерна и температуры хранения. Из литературных источников (Трисвятский, 1991; Мачихина, 2006) также известно, что пониженные температуры до 10-11 °С большинство насекомых переносят плохо: насекомые становятся вялоподвижными, не питаются, поэтому задерживается развитие всех стадий. Температура 0 °С и ниже губительна для большинства насекомых. На этом факторе основаны профилактические мероприятия борьбы с вредителями хлебных запасов.

Похожие данные, опубликованные зарубежными исследователями (Wilkes & Copeland, 2008), показали, что температура 4 °С позволяет избежать снижения качества зерна, однако при температуре 30 °С возрастание содержания высокомолекулярных субъединиц глютеина в мягкой пшенице отрицательно повлияло на хлебопекарные свойства муки из исследованного зерна.

Температура хранения влияет на продолжительность хранения продовольственного зерна (Yahya, 2001). Этот исследователь разработал экспериментальную установку для измерений допустимого времени хранения пшеницы в зависимости от температуры воздуха, влажности и степени повреждения зерна. По результатам статистического вариационного анализа было показано, что при увеличении температуры хранения, влажности и степени поврежденности зерна допустимая длительность хранения снижается. Увеличение температуры хранения с 4 до 40 °С для зерна одной и той же влажности уменьшает допустимый срок хранения в 2-3 раза. Пониженные температуры обеспечивают хорошую сохранность не только продовольственного зерна, но и семян (Chamurliyski & Stoyanova, 2012). Хранение семян мягкой пшеницы из селекционной коллекции в морозильной камере позволило сохранить генетические ресурсы в течение 10-летнего периода. Оптимальной температурой хранения признан уровень не выше +10 °С, при которой зерно находится в охлажденном состоянии, снижается интенсивность дыхания, жизнедеятельности вредителей и микрофлоры (Малеева и др., 2012; Орловцева и др., 2016; Гурьева и др., 2013).

Таким образом, температура зерна относится к физическим факторам риска при длительном хранении зерна, и для того чтобы своевременно выявлять возникновение очагов с повышенной температурой в зерновой насыпи необходимо измерение температуры зерна.

Обоснование и алгоритм экспериментальных исследований

Зерно на длительное многолетнее хранение размещается в силосы элеваторов из сборного или монолитного железобетона, поскольку именно железобетонные конструкции наилучшим образом сглаживают воздействие наружных колебаний температур воздуха. В железобетонных силосах элеваторов зерно хранится большой массой, емкость силоса шириной 3 м и высотой до 30 м, имеет в основном небольшую поверхность соприкосновения с наружным воздухом в надсилосном и подсилосном помещениях, кроме внешних силосов. Наружный силос взаимодействует с окружающей средой по всей поверхности наружной стены. Именно поэтому состояние зерна по температуре необходимо контролировать по всей хранящейся массе (Трисвятский, 1991; Масло и др., 2014). Измерение температуры зерна должно осуществляться дистанционно с использованием централизо-

ванного пульта контроля температуры и автоматического по заданной программе считывания, накопления и выдачи результатов измерения. Средства, применяемые для контроля температуры, должны обладать высокой чувствительностью и малой погрешностью измерения (Мерзляков и др., 2010; Масло и др., 2014; Бибик, 2014).

В период хранения зерна необходимо применять способы поддержания температуры и влагосодержания зерна, при этом наиболее эффективным признано активное вентилирование охлажденным воздухом, имеющим температуру окружающей среды. Большую помощь в организации вентилирования оказывают математические методы с разработкой компьютерных моделей для расчета тепло- и массопередачи (Montross et al., 2002; Abbouda, 2001). Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных получено для хорошо герметизированных емкостей.

Научные работы последних лет посвящены в основном исследованию мониторинга температуры, режима вентилирования, тепломассообменных процессов и технологических основ процесса вентилирования в *металлических силосах* большой емкости (Кечкин 2019; Беляева & Кечкин, 2020а; Беляева & Кечкин, 2020б; Разворотнев & Гавриченко, 2020; Yisa et al., 2018). При этом, в литературе приведено мало данных по исследованию динамики изменения внутренних температур в *железобетонных силосах*, к тому же они получены достаточно давно с использованием аналогового оборудования с низким функционалом (Сологубик и др., 1981; Анастасиади и др., 1981; Шендеров & Сорока, 1994). Поэтому проведение экспериментальных исследований актуально для уточнения механизма миграции температуры внутри железобетонных силосов.

Стационарные измерительные устройства, применяемые в силосе - термоподвески, предназначены осуществлять контроль температурного режима хранения, но они расположены на значительном удалении от наиболее критичного слоя зерна, расположенного у наружной стены силоса элеватора.

Цель данной статьи – описать эксперимент по исследованию динамики изменения температуры зерна как в центре силоса традиционным способом с помощью термоподвесок, так и на трех горизонтальных уровнях, при помощи специально созданной измерительной системы логгеров, определения размера пристенного зернового слоя подверженного наибольшему

нагреванию/охлаждению, а также выделения в нём критичного слоя.

Материалы и методы исследования

Объекты исследования

Объектами исследования служили наружные силоса элеватора из сборного железобетона, заполненные пшеницей 3 класса. Элеватор расположен в зоне умеренного климата южной континентальной Западно-Сибирской климатической области.

Оборудование и схемы его закладки

Для контроля температуры зерна в центре силоса по вертикали применяли следующее оборудование: автоматизированная система диспетчерского контроля АСДК-1152/6 с термоподвесками ТП-8, ТП-01, ТП-32, представляющая аппаратно-программный комплекс. Термоподвески снабжены шестью датчиками (по 2 датчика на верхний, средний и нижний зерновой слой). В соответствии с требованиями длительного хранения зерна регистрация температуры в силосах с помощью системы АСДК проводилась 2 раза в неделю в течение всего срока хранения пшеницы (до 6 лет).

Для контроля горизонтального распределения температуры пристенных слоев зерновой массы был создан измерительный комплекс iBDL (Рисунок 1), состоящий из трех измерительных систем из термогигрометров (логгеров) (тип DS1923-F5), каждая по 8 штук. Установленные в металлические держатели логгеры были закреплены при помощи жгутов (Рисунок 2), общее количество логгеров 24 штуки. Логгеры настроили на измерение параметров температуры два раза в сутки в продолжении



Рисунок 1. Измерительная система с термогигрометрами DS1923-F5 и аксессуарами



Рисунок 2. Крепление логгеров в металлические держатели

годового цикла. Логгеры на канатах (Рисунок 3) были расположены внутри зерновой массы пшеницы на разных расстояниях (от 5 до 75 см) от внутренней поверхности наружного силоса согласно схеме, приведенной на Рисунке 5. Схема размещения логгеров по вертикали силосов на трех уровнях приведена на Рисунке 6. Параметры наружного климата, измерял один датчик в климатической будке расположенной снаружи силоса (Рисунок 4).

Этапы мониторинга температурных параметров внутри силоса были следующие :

- на первом этапе (март 2018 по март 2019 гг) контролировали температурный режим во внешнем силосе элеватора с южной стороны;
- на втором этапе (апрель 2019 по апрель 2020 гг) датчики были перемещены во внешний силос элеватора с северной стороны.



Рисунок 4. Термогигрометр DS1923-F5 установленный в наружной климатической будке



Рисунок 3. Расположение термогигрометров на канате внутри силоса

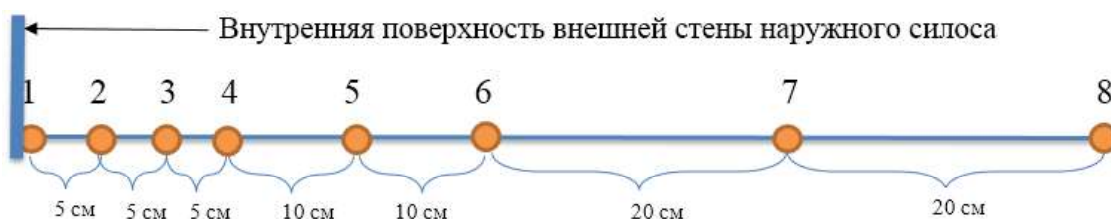


Рисунок 5. Схема крепления термогигрометров от 1 до 8 слоя на горизонтальной подвеске

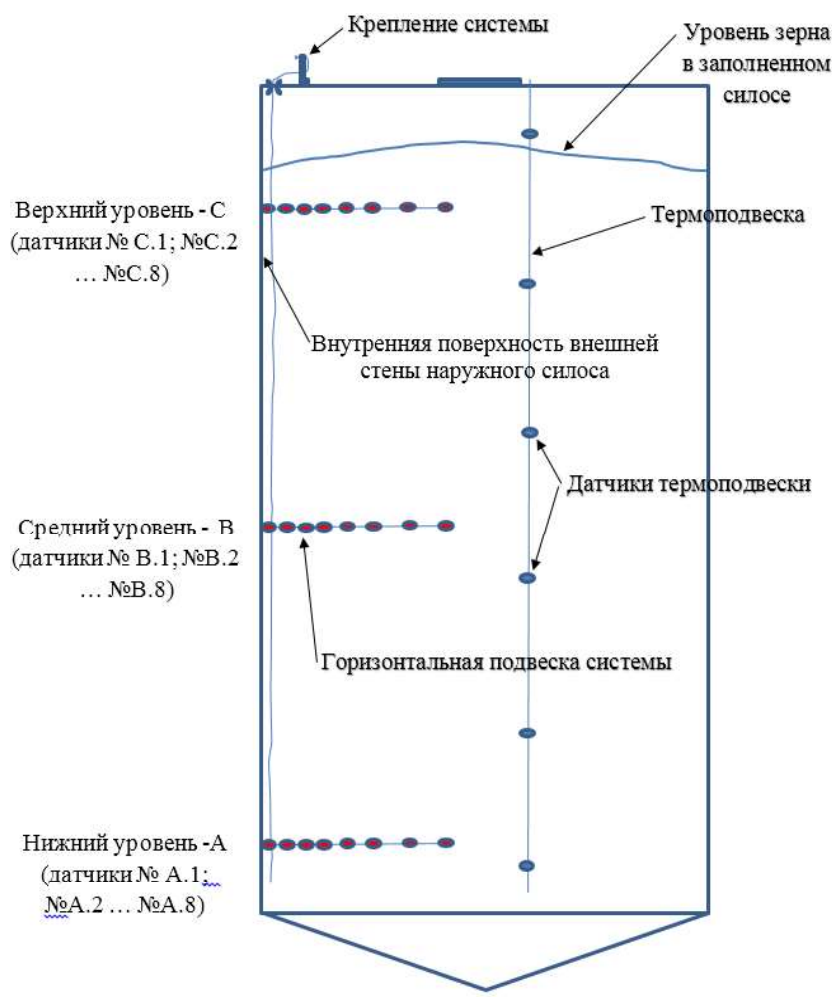


Рисунок 6. Схема закладки горизонтальных подвесок из термогигрометров по вертикали силоса
А - на нижнем уровне (2-3 метра насыпи зерна), В – на среднем уровне (16-17 метров насыпи зерна)
и С – на верхнем уровне (25-26 метров насыпи зерна)

Анализ данных

Статистическая обработка всех полученных данных с термогигрометров проводилась с использованием специализированного программного обеспечения iBDL. Методы статистической обработки экспериментальных данных также подробно изложены в предыдущей нашей работе (Белецкий & Лоозе, 2019).

Результаты и их обсуждение

Распределение температур зерна по вертикали по центру силоса (контроль по термоподвескам). Характер изменения температуры зерновой массы при хранении в течение 2014-2019гг представлен на Рисунок 7, а статистические результаты обработки данных в Таблице 1.

Для континентального климата сибирского региона характерна динамика изменения температуры наружного воздуха в годовом цикле, о чём свидетельствует значительный интервал между зимним и летним периодом (от минус 15 °С до плюс 23 °С). Температура зерна в центре силоса изменяется периодически в след за температурой наружного воздуха, но изменяется с запаздыванием на 3-4 месяца. Данный факт свидетельствует о хороших теплоизолирующих свойствах стен из железобетона. Для обеспечения требуемых температурных условий длительного хранения зерна и выполняются периодические охлаждения зерна. На формирование температурного режима оказывает незначительное влияние конвекционный процесс внутри массы зерна. Конвекция в межзерновом пространстве возникает из-за наличия разницы давлений воздуха снаружи и внутри силосов и наличия разницы температур по высоте



Рисунок 7. Температурные данные зерновой массы в центре силоса по слоям при хранении за 2014-2019 гг. и наружный воздух

заполненного силоса. Известно, что конвекционный процесс обладает сильной инерцией в массе зерна, поскольку в силосах большой объём и скважистость для пшеницы составляет в среднем 30-40%, именно поэтому необходимо значительное время для снижения или повышения температуры (Мерзляков и др., 2010).

Таблица 1
Статистическая обработка данных температуры наружного воздуха и зерновой массы в центре силоса за 2014-2019гг.

	наружный воздух	верх- ний слой	сред- ний слой	нижний слой
Среднее	4,49	7,2	5,75	4,02
Мода	18	17	12	11
Дисперсия выборки	192.72	74.36	44.06	67.16
Минимум	-28	-11	-8	-12
Максимум	26	23	20	18

Расположенное на разной высоте зерно в силосе элеватора, по разному изменяет свою температуру в течении года. Из Рисунка 7 видно, что максимальная температура хранящегося зерна в центре силоса наблюдалась во все годы в верхнем слое в июле-сентябре и составляла 15-20 °С; минимальное значение температуры зерна (минус 6-10 °С) было достигнуто тоже в верхнем слое. В 2018 была отмечена наибольшая разница температур в годовом цикле между отрицательными и положительными значениями она составляла около 22 °С. В течение 2015, 2016, 2017гг. разброс данных по температуре зерна в годовом цикле составлял меньшую амплитуду: максимум (от 13 до 18 °С) в основном приходился на верхний слой в авгу-

сте – сентябре, минимум (от минус 6 °С до минус 10 °С) – на нижний слой в феврале-марте.

Анализ обработанных данных в течение годового цикла наблюдений, представленных в Таблице 1 показал, что температура по вертикали зерновой массы в центре силоса различается по слоям: нижний и средний слои в большей степени имеют стабильные температуры, чем верхний слой. Данные статистического показателя «мода», – это то значение в анализируемой совокупности данных, которое встречается чаще других показывает, что нижний слой наиболее часто имеет температуру 11 °С, средний 12 °С, а верхний 17 °С. Подтверждается доступность верхних слоёв воздействию атмосферного воздуха в большей степени, чем средних и нижних, так как имеют соприкосновение с воздухом надсилосного пространства. Рекомендуется применять профилактические меры по снижению температуры в надсилосном этаже с наступлением весенне-летнего, ограничивая доступ в него тёплого воздуха.

Статистических анализ измеренных параметров температуры зерна в силосах позволил установить корреляционную зависимость между температурой наружного воздуха и температурой зерна по слоям. Проведенная оценка влияния температуры наружного воздуха на температуру зернового слоя выявила заметную положительную корреляцию с верхним слоем зерна ($r=+0,62$), и слабую положительную корреляцию с нижним и средним слоями зерновой массы (соответственно $r=+0,20$ и $r=+0,34$). Это свидетельствует о слабом влиянии наружной температуры на температуру зерна, следствие хороших теплоизолирующих свойств стен силосного корпуса и ограничение доступа наружного воздуха. Ранее в литературе не встре-

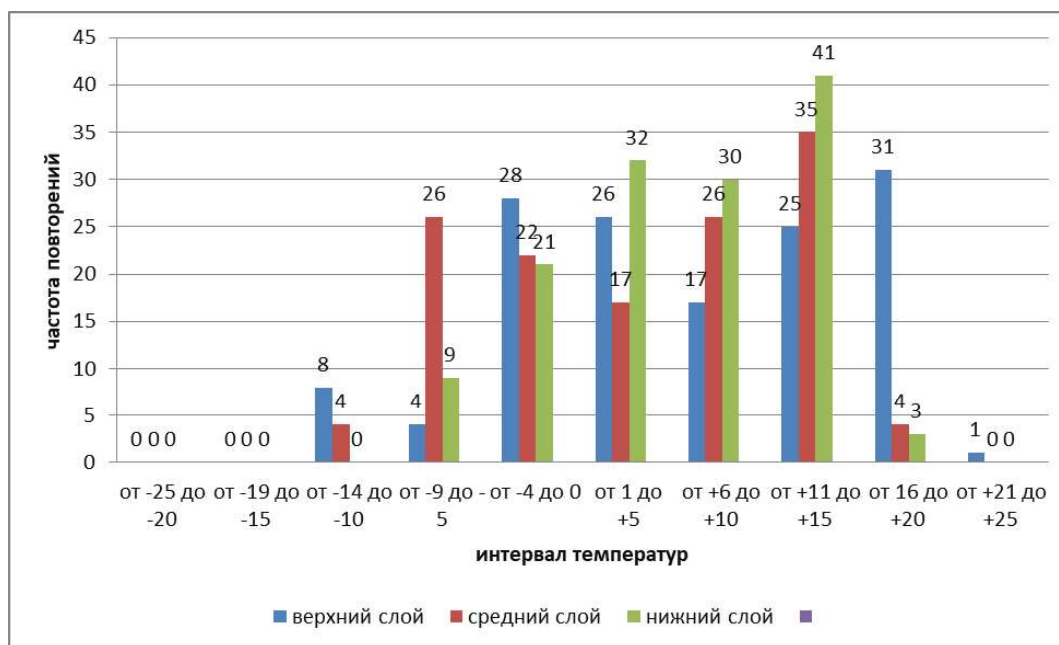


Рисунок 8. Распределение значений температур зерновой массы за 2014-2019 гг. в центре силоса в зависимости от высоты расположения в силосе

чали оценку влияния параметров наружного воздуха на температуру зерновой массы.

Характер разброса значений температур зерновой массы на разных по высоте уровнях в силосе элеватора представлены на гистограмме распределения температур, Рисунок 8. На Рисунке 8 наглядно представлены три слоя имеющие примерно одинаковый температурный разброс значений по количеству повторений. Отличия наблюдаются только по абсолютной величине. Особенно следует отметить, что в рекомендуемом для длительного хранения зерна интервале температур располагается наибольшее количество измеренных температур для нижнего и среднего слоя зерновой массы. Верхний слой характеризуется наличием повышенных температур. Зерно верхнего слоя находится в критически опасной температурной зоне.

Таким образом, при хранении на элеваторах и складах зерно подвергается воздействию температур, связанных с сезонными колебаниями, что подтверждает литературные данные (Скрябин, 2006; Скрябин, 2008). Степень этого влияния зависит от влажности зерна и температуры окружающей среды. Колебания атмосферных условий вызывают колебания температуры внутри хранящейся зерновой массы, размещенной в силосной

емкости, а под воздействием температурных перепадов наружного воздуха в насыпи происходит влагоперенос, т.е. перемещение влаги к более холодным участкам, вызывая их увлажнение, что может привести к повышению влажности зерна выше критической¹. В наиболее неблагоприятных условиях находятся пристенные слои зерна в силосе, в направлении которых происходит основной перенос влаги. Для устранения возможности увлажнения пристенных слоев зерна рекомендовано уменьшить потенциал переноса влаги, т.е. температурные перепады, и проводить аэрацию зерна с целью выравнивания температуры в периферийных слоях.

Распределение температур пристенных слоев зерновой массы (контроль по термогигрометрам (логгерам))

Оценка результатов мониторинга температурного режима хранения пшеницы с помощью измерительной системы из термогигрометров (логгеров) типа DS1923-F5 проведена по следующим направлениям:

- распределение температур по вертикали силосов – датчики были заложены на трех уровнях: 1 – верхний уровень, 2 – средний уровень, 3 – нижний уровень;

¹ Громошин, Н. А., & Новиков, С. А. (1982). Патент РФ № 959679. Способ хранения кондиционного зерна в металлических хранилищах. Федеральный институт промышленной собственности. https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000959679_19820923_A1_SU/

- распределение температур по горизонтали силосов (измерения проводились в 8 точках на разном расстоянии от стенки силоса: пристенный, 5 см, 10 см, 15 см, 25 см, 35 см, 55 см, 75 см;
- сравнительный анализ данных температурного режима в силосе, расположенном с северной стороны элеватора (2017-2018 гг.) и в

силосе, расположенном с южной стороны элеватора (2018-2019 гг.).

Анализ температуры зерна по уровням вертикали силосов

На Рисунках 9-12 представлены графики значений наружной температуры и температуры зерна

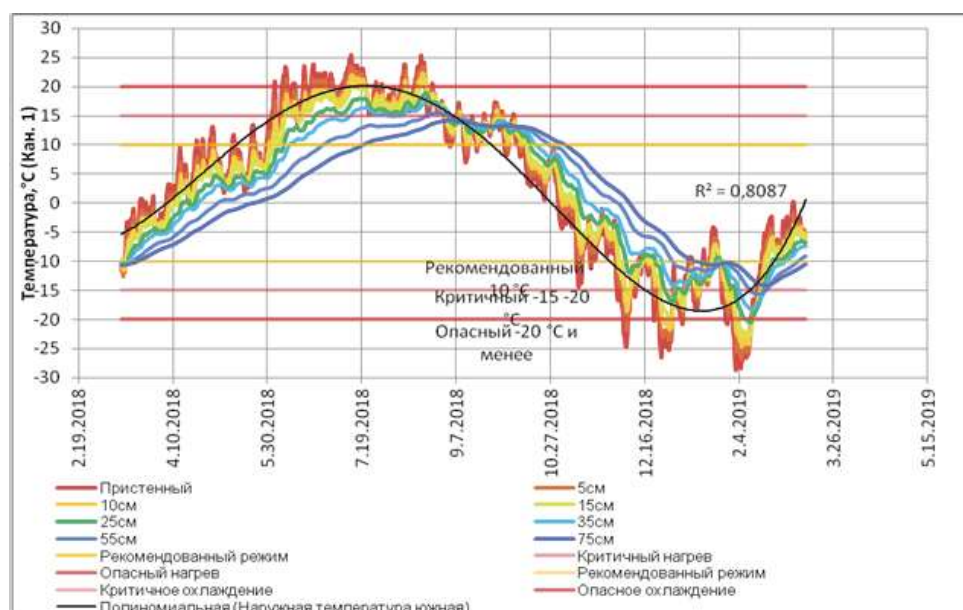


Рисунок 9. Южный нижний уровень. Графики значений наружной температуры и температуры зерновой массы на разных расстояниях от стены силоса

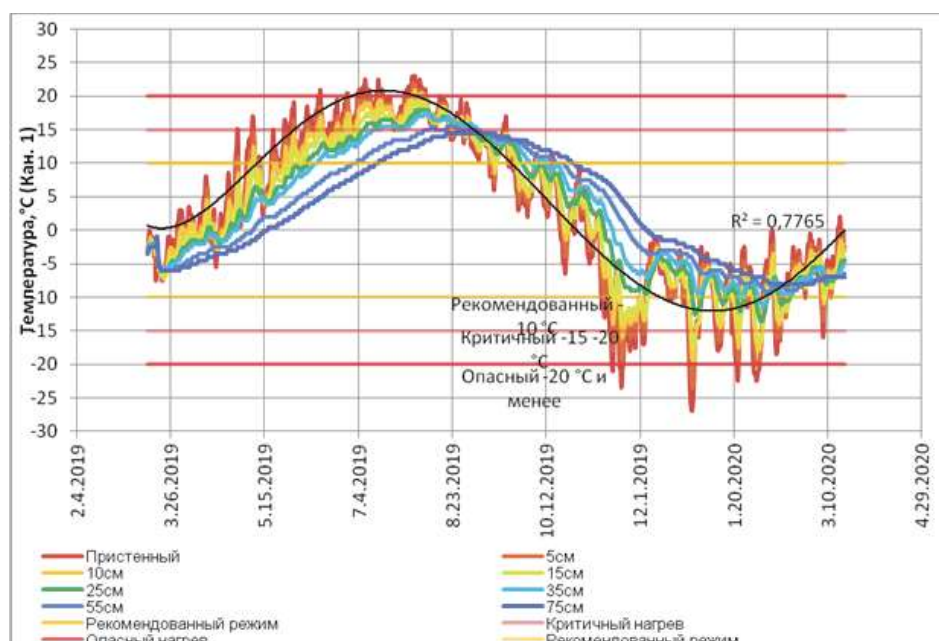


Рисунок 10. Северный нижний уровень. Графики значений наружной температуры и температуры зерновой массы на разных расстояниях от наружной стены внешнего силоса

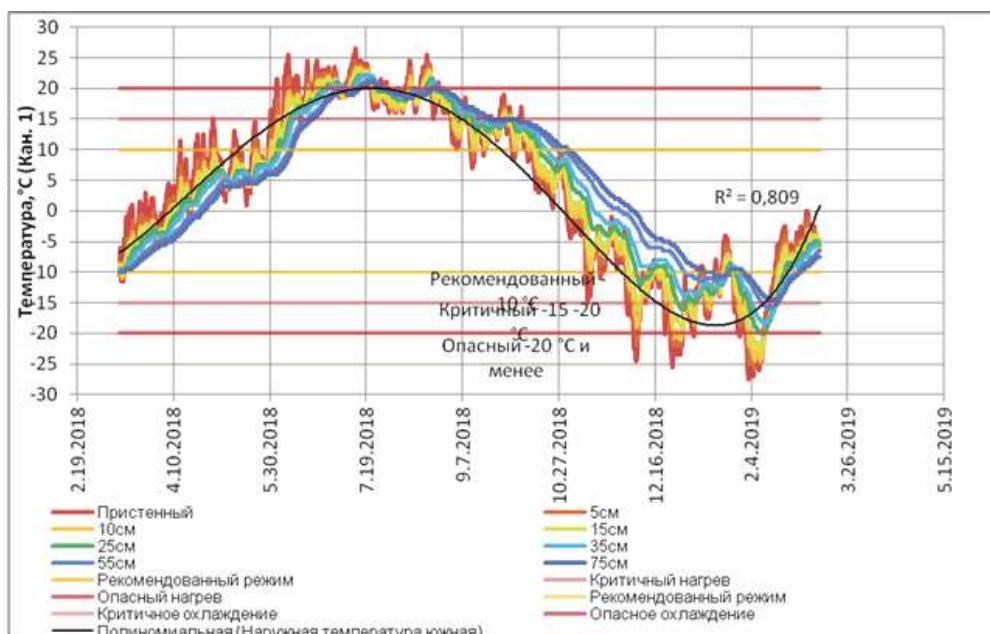


Рисунок 11. Южный верхний уровень. Графики значений наружной температуры и температуры зерновой массы на разных расстояниях от наружной стены внешнего силоса

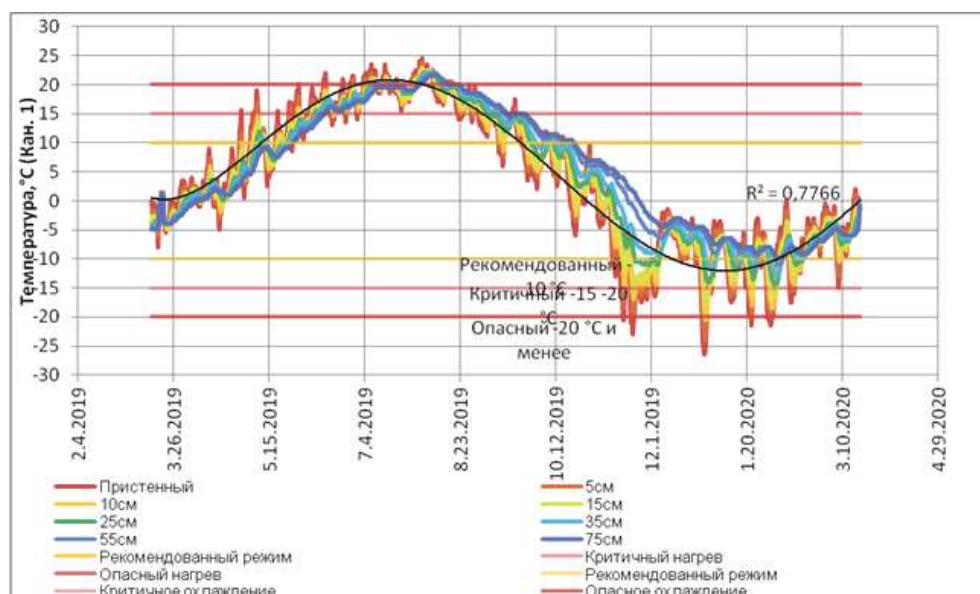


Рисунок 12. Северный верхний уровень. Графики значений наружной температуры и температуры зерновой массы на разных расстояниях от наружной стены внешнего силоса

нижнего и верхнего уровней для разных расстояний от наружной стены.

В условиях Российской Федерации оптимальный температурный диапазон длительного хранения товарного зерна пшеницы составляет от -10°C до $+10^{\circ}\text{C}$, а допустимым можно считать диапазон от -15°C до $+15^{\circ}\text{C}$. На графиках, для сравнения указаны эти диапазоны оптимальных температур.

Графики построены с допущением, что воздействие наружного воздуха на зерновую массу равномерное, хотя в реальных условиях эксплуатации железобетонных силосов, внешняя температура значительно изменяется в зависимости от времени суток. Графики на Рисунках 9-12 показывают, что в зависимости от температуры наружного воздуха изменяются температуры зерна в силосах элеватора. Наглядно видно, что для всех слоев зер-

на характерно цикличное изменение температуры на верхнем уровне с задержкой 2-3 месяца, на нижнем - с задержкой 4-5 месяцев.

Из Рисунков 9-10 (нижний уровень зерна в силосе) видно, что максимальная температура зерна: 18-25 °С достигалась в пристенном слое в период с апреля по сентябрь. В слоях зерна, отстоящих от стен силоса на 10-75 см, максимум температур (13-18 °С) приходился на май-октябрь.

Из Рисунков 11-12 (верхний уровень зерна в силосе) видно, что максимум температур зерна был более коротким, чем на нижнем уровне, и максимальная температура зерна в пристенном слое была в мае-августе в диапазоне 20-27 °С, в слоях зерна, отстоящих от стен силоса на 10-75 см, отмечена также в мае-августе и составляла 18- 23 °С.

Статистически обработанные данные температуры зерна, расположенные на разных высотах внутри силоса представлены на Рисунке 13, где показано наличие различий температуры на разных высотах. Из Рисунка 13 видно, что температура зерновой массы на расстоянии 75 см от стен силоса имеет расхождения по его высоте. Слои зерна верхнего уровня прогревались и охлаждались несколько сильнее (до +20° летом и до -10° зимой), чем среднего и нижнего. Зерно верхнего уровня больше подвержено внешнему воздействию особенно в весенне-летний период

годового цикла, при повышении температуры и нагреве зерновой массы. А нижний слой характеризуется меньшим расхождением температурного диапазона. Это объясняется конструктивной особенностью силосов элеватора, поскольку силосы располагаются под надсилосной плитой, которая не имеет теплоизоляции, к тому же происходит естественное перераспределение температуры по высоте, более холодным остаётся нижний уровень и нагревается верхний. Значения температуры зерна верхнего слоя даже выходят за пределы критического интервала, попадая в зону опасную для качественных характеристик, что не рекомендуется при длительном хранении.

Таким образом, зерно верхнего уровня силоса по температуре находится с мая по сентябрь в более критичном положении, чем зерно нижнего уровня силоса, при этом температура зерна верхнего уровня в эти периоды года превышает оптимальную температуру 15 °С во всех слоях по горизонтали. Температура зерна в нижнем уровне превышает оптимальную температуру только в слоях, отстоящих от стен силоса на 10-35 см. А слои 55-75 см нижнего уровня имеют оптимальную температуру зерна ниже 15 °С.

В отдельных научных исследованиях получены данные, что при хранении зерна повышенные температуры наибольшее воздействие оказывают в южной зоне России (Ветелкин и др., 2003) и в

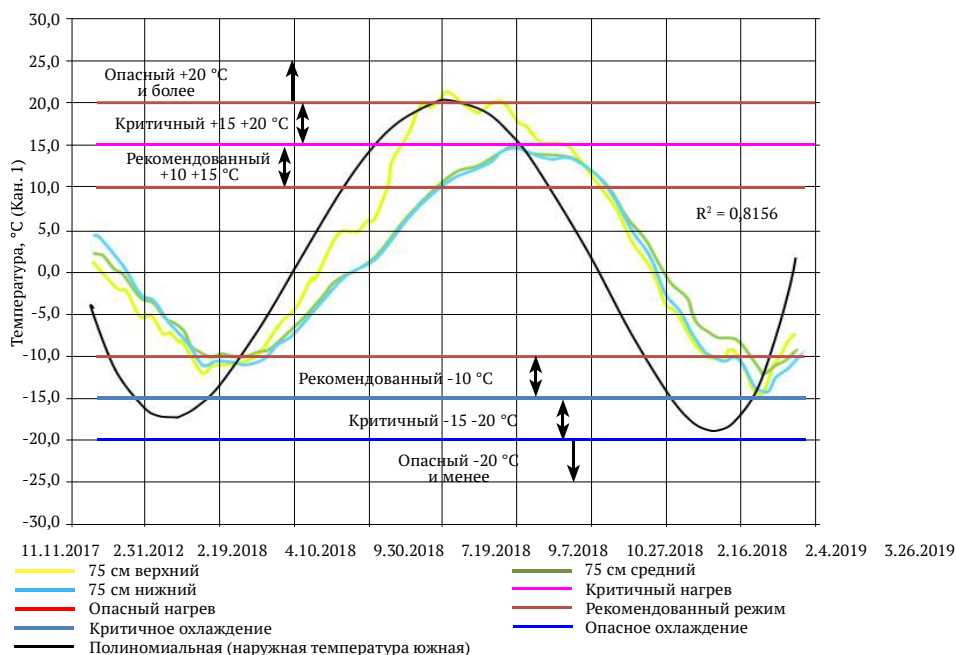


Рисунок 13. Графики значений наружной температуры и температуры зерновой массы нижнего, среднего и верхнего уровня на расстоянии 75 см от наружной стены внешнего силоса

Казахстане (Шаймерденова, 2017). Хранение зерна мягкой пшеницы в условиях температуры 30 °С и относительной влажности 70% вызывало снижение клейковины, а пониженные температуры на уровне 10 °С обеспечивали наименьшие изменения технологических достоинств зерна мягкой пшеницы, и сохраняли исходное качество на уровне исходного.

В дополнение к имеющимся в литературе данным наши результаты позволили выявить наличие зависимости температуры хранимого зерна от расположения в силосе по высоте. Наиболее критичным с более высокой температурой является верхний уровень, где необходимо более тщательно контролировать качество зерна. Средний и нижний уровни находятся в более благоприятных температурных условиях сохранности.

Анализ данных температуры зерна по слоям горизонтали силоса Представленные графики на Ри-

сунках 9-13 наглядно показывают, что влияние температуры атмосферного воздуха на величину температуры зерна уменьшается с увеличением расстояния вглубь от наружной стены внешнего силоса (увеличением толщины зернового слоя) и остается существенным только для зернового слоя толщиной 50 см. Измеренные данные температур показали, что температура пристенного слоя зерна толщиной до 5 см охлаждается в течение трёх суток на 10 °С, а слой зерна толщиной 5-10 см также охлаждается на 9 °С.

Зафиксированные температурные режимы (Рисунки 9-13) свидетельствуют, что самыми неустойчивыми с большими колебаниями температуры зерна являются пристенный слой и слои, отстоящие от стенок силоса на 5-25см. В слоях от стен силоса на 55-75 см температура зерновой массы более стабильная. Эту тенденцию можно отметить и для верхнего, и для нижнего уровней по вертикали силосов, а также в силосах, расположенных с северной и южной сторон.

Таблица 2

Статистическая обработка данных температуры верхнего уровня южного силоса (2019-2018гг)

Показатели температуры	Наружная температура	Пристенный слой	Температура зерна в слоях на расстоянии от наружной стены внешнего силоса элеватора						
			5см	10см	15см	25см	35см	55см	75см
Среднее	2.5	3.5	3.3	3.1	3.5	3.7	4.1	4.4	4.6
Интервал	66.5	54.0	50.5	48.0	45.5	42.0	40.5	37.5	35.5
Минимум	-35.5	-27.5	-26.0	-24.5	-22.5	-20.0	-18.5	-16.0	-14.5
Максимум	31.0	26.5	24.5	23.5	23.0	22.0	22.0	21.5	21.0

Результаты статистической обработки данных температуры верхнего уровня силосов, расположенных на северной и южной сторонах, представлены в Таблицах 2 и 3. Как видно из Таблиц 2 и 3 наибольший интервал значений температур годового

периода наблюдений между отрицательными и положительными значениями температуры зерна составлял на верхнем уровне в пристенном слое (51-54 °С). В слоях 5-10 см от стены – от 43 до 50 °С, в слоях 15-35 см от стены – от 35,0 до

Таблица 3

Статистическая обработка данных температуры верхнего уровня северного силоса (2019-2020гг)

Показатели температуры	Наружная температура	Пристенный слой	Температура зерна в слоях на расстоянии от наружной стены внешнего силоса элеватора						
			5см	10см	15см	25см	35см	55см	75см
Среднее	4.3	3.6	3.6	3.5	4.0	4.3	4.8	5.2	5.5
Интервал	61.5	51.0	48.0	43.5	40.5	36.5	35.0	33.0	31.5
Минимум	-31.0	-26.5	-24.0	-20.5	-18.0	-14.5	-13.0	-11.0	-10.0
Максимум	30.5	24.5	24.0	23.0	22.5	22.0	22.0	22.0	21.5

45,5 °С. В более дальних слоях 55-75 см от стены интервал температур был меньше и составил от 31,5 до 37,5 °С.

Получены различия и по средней температуре зерна: если в слое 5 см от стены средняя температура составляла 3,5-3,6 °С, то в глубине силоса на расстоянии 55-75 см средняя температура выше – 4,6-5,5 °С. На основании этого, можно говорить о тенденции – чем ближе к центру силоса, тем средняя температура зерна выше. Это наглядно видно на Рисунке 14.

Значительные различия в температуре обнаружены в слоях зерна, удаленных на различное расстояние от стен наружных силосов. Прогревается и охлаждается зерно в зависимости от удаленности от наружной стены внешнего силоса с разной интенсивностью. С увеличением расстояния от наружной стены внешнего силоса температура зерна понижается, а разница между наружной температурой и температурой зерна увеличивается. Так для южного силоса пристенный слой при охлаж-

дении зимой имеет минимальную температуру ниже наружной на 8 °С, при прогревании летом максимальную – ниже наружной на 5 °С, прилегающие слои (5-15 см от наружной стены) соответственно ниже при охлаждении на 10-13 °С, при прогревании ниже на 6-8 °С, а более удаленные слои (55-75 см от наружной стены силоса) – соответственно при охлаждении ниже наружной на 19,5 - 21 °С и при прогревании ниже наружной на 9,5-10 °С.

В весенне-летний период колебания температуры зерна в различных точках силоса достигают 10-12 °С. Такой значительный перепад может неблагоприятно отразиться на сохранности зерна, вызвав явление конденсации влаги в более холодной части силоса. Отсюда вытекает необходимость тщательного контроля состояния зерна, хранящегося в силосах элеваторов в весенне-летний период.

Рассматривая изменение температуры зерна в слоях на разном расстоянии от стенок силоса

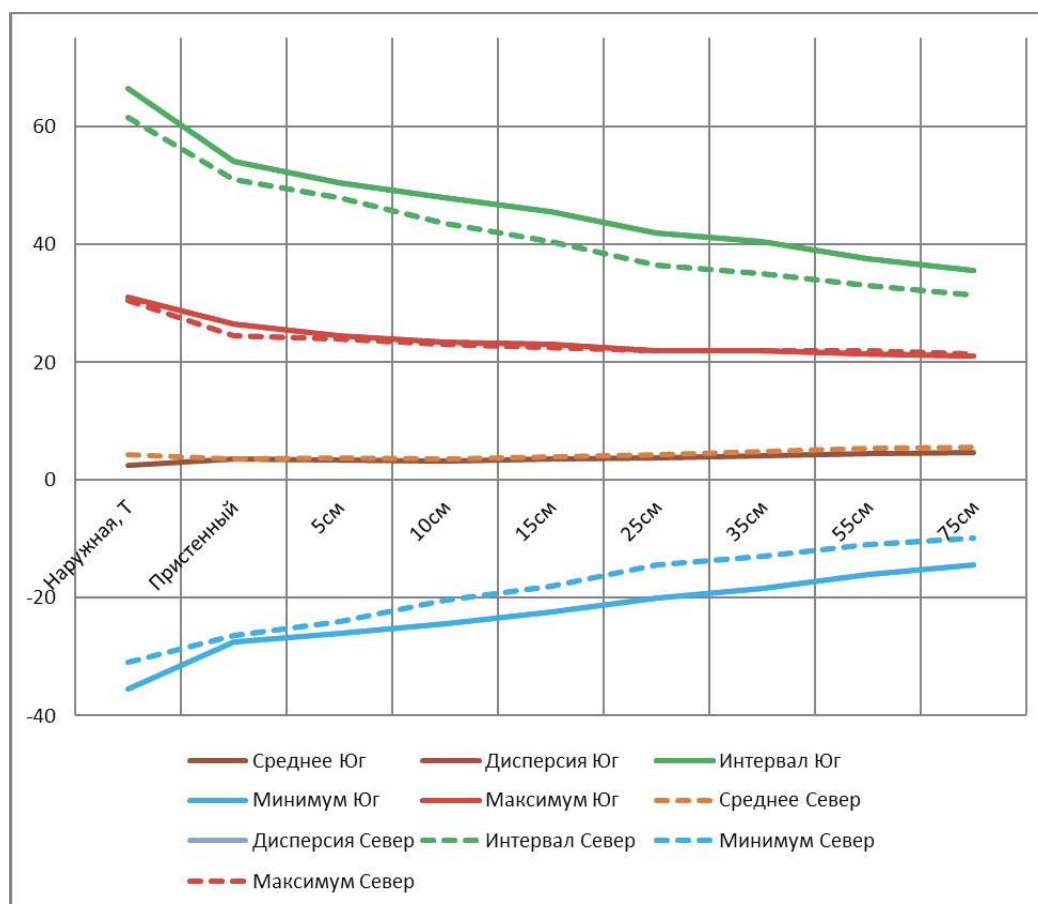


Рисунок 14. Графики сравнения статистических данных температуры зерна южного и северного силоса (верхний уровень)

и сравнивая температуру на уровнях по вертикали силоса (Рисунки 7-10), можно определить критичные слои зерна на нижнем и верхнем уровнях, т.е. имеющие в летний период температуру выше 15 °С. Так на нижнем уровне к слоям зерна, имеющим в летний период температуру выше 15 °С, можно отнести слои от пристенного до отстоящего от стен силоса на 35 см. На верхнем уровне к слоям зерна, имеющим в летний период температуру выше 15 °С, можно отнести все слои от пристенного до отстоящего от стен силоса на 75 см. На основании полученных данных можно сделать вывод: пристенный слой зерновой массы, наиболее критичный, подверженный прогреванию/охлаждению слой, по исследуемым уровням с южной стороны силосного корпуса достаточно большой.

Ранее считалось, что влияние нагрева зерновой массы ограничивалось для железо-бетонных силосов слоем 10-20 см от наружной стены внешнего силоса, (Сологубик и др., 1981), для металлических – слоем 50 см (Сорочинский, 2016). В работе (Шендеров & Сорока, 1994) показано, что суточные колебания температуры наружного воздуха оказывают влияние лишь на пристенные слои толщиной 25-30 см, и эти слои названы температурно-активными. Согласно литературным источникам распространение температуры в наружных железобетонных силосах происходит с низкой скоростью, примерно 10 см в месяц, скорость распространения быстрее в металлических силосах: около 10 см в день, при этом размер пристенного слоя зерна реагирующего на изменения температуры внешней стены металлического силоса достигает 15-20 см. Это происходит из-за более сильного влияния атмосферного воздуха на наружные силосы элеваторов. Имеются наблюдения, определяющие размер пристенного слоя зерна в 10-20 см расположенного в силосе элеватора из сборного железобетона, способного изменить свою температуру на 10 °С не менее, чем за 6 месяцев, при наружной отрицательной температуре минус 30 °С. Для сравнения, в металлическом силосе, пристенный слой зерна, при тех же условия будет нагреваться всего за 2-3 недели. Именно по этой причине в металлических силосах допускается только временное хранение (Махихина и др., 2012).

Полученные нами результаты можно считать оригинальными, так как они уточняют насколько параметры наружного воздуха влияют на температуру зерна в силосе из сборного железобетона.

Сравнение по расположению силоса с южной или северной стороны

Анализ данных, представленных на Рисунках 9-13 показал, что прослеживается схожая тенденция развития временного температурного ряда для силосов, расположенных с северной и южной стороны во всех слоях от наружной стены силоса. Однако для северной стороны характерны меньшие значения интервала колебания температур и большие значения минимальных температур для всех расстояний от наружной стены (Таблицы 2-3).

Ранней весной в силосах, обращенных на юг за 2 недели, температура зерна повышается на 7 °С, тогда как в силосах, выходящих на север - только на 4,5-4,0 °С; осенью же первые охлаждаются медленнее. В силосе, обращенном на юг, зерно в пристенном слое (15-25 см) достигает температуры 15 °С к середине мая, в глубоких слоях (55-75 см) к середине июня. В силосе, обращенном на север, зерно достигает температуры 15 °С в пристенном слое (15-25 см) к середине июня, в глубоких слоях (55-75 см) к концу июня. В целом, в силосах на обоих направлениях (юг или север) температура зерна выше 15 °С держится в течение 4-х месяцев с июня по сентябрь. Более высокую температуру имеют слои, отстоящие от стенки силоса на 5-25 см на верхнем уровне.

По результатам статистической обработки измеренных значений температур, расчёта коэффициентов корреляции, между температурой наружного воздуха и температурой горизонтальных слоёв зерновой массы внутри силоса на верхнем уровне установлена в основном положительная линейная корреляция. Наибольшее значение зависимости в пристенном слое внешнего силоса южной стороны элеватора $r =$ от +0,60 до +0,92. Качественная оценка такой связи определена как высокая. В силу меньших перепадов наружной температуры для северного силоса, зависимость температуры зерна от изменений наружного воздуха для северного силоса выражена слабее. Зависимость от внешних температурных условий ослабляется с увеличением толщины слоя зерна вглубь силоса от наружной стены внешнего силоса.

Таким образом, выполненный статистический анализ распределения полученных значений температур и анализ распределения температуры зерновой массы на верхнем уровне по толщине слоя у наружной стены внешнего южного и внешнего северного наружных силосов позволил выявить наличие зависимости температуры хранимого зерна от стороны расположения силоса в элеваторе.

Оценка зависимости охлаждения пристенных слоев от разных факторов

Для построения графика зависимости температуры охлаждения пристенного слоя зерна от толщины слоя и продолжительности воздействия наружного холодного воздуха за исследуемый период 2017 - 2019 гг., был выделен интервал времени с 20 по 25 января 2017 года, с температурой наружного воздуха близкой к минимальной и с незначительными перепадами по абсолютному значению. Средняя температура наружного воздуха составляла величину - 29,4 °С, со стандартным отклонением 3,6 °С. Начальная температура зерна варьировалась в зависимости от расстояния до наружной стены от - 6,7 °С для 75 см до - 19 °С для пристенного слоя.

На Рисунке 15 показано одновременное влияние толщины слоя и продолжительности охлаждения на изменение температуры зерна. Из графика (Рисунок 15) видно, что после охлаждения зерна в течение 5 дней наружным воздухом с температурой минус 29,4 °С:

- слой зерна на расстоянии от 5 см до 25 см от стенки силоса имели температуру в интервале от минус 20 до минус 25 °С;
- слой зерна 35 см - от минус 10 до минус 15 °С;

- слой зерна 55 см - от минус 5 до минус 10 °С;
- слой зерна 75 см - от 0 до минус 5 °С.

По результатам произошло охлаждение пристенных слоев на расстоянии до 25 см, глубокие слои практически не меняли температуру в условиях передачи холода. Анализ экспериментальных данных с применением современного оборудования термогигрометров (логгеров), заложенных в зерновую массу, показал:

- получены новые оригинальные экспериментальные данные, определяющие критичные слои зерновой массы по вертикальным уровням силоса и по горизонтальным слоям на каждом уровне;
- наиболее критичным с более высокой температурой является верхний уровень. Зерно верхнего уровня силоса находится с мая по сентябрь в более неблагоприятном состоянии по температуре, чем зерно нижнего уровня силоса, при этом температура зерна верхнего уровня в эти периоды года превышает оптимальную 15 °С во всех слоях по горизонтали. Температура зерна в нижнем уровне превышает оптимальную только в слоях, отстоящих от стен силоса на 10-35 см, слои 55-75 см нижнего уровня имеют оптимальную температуру зерна ниже 15 °С;

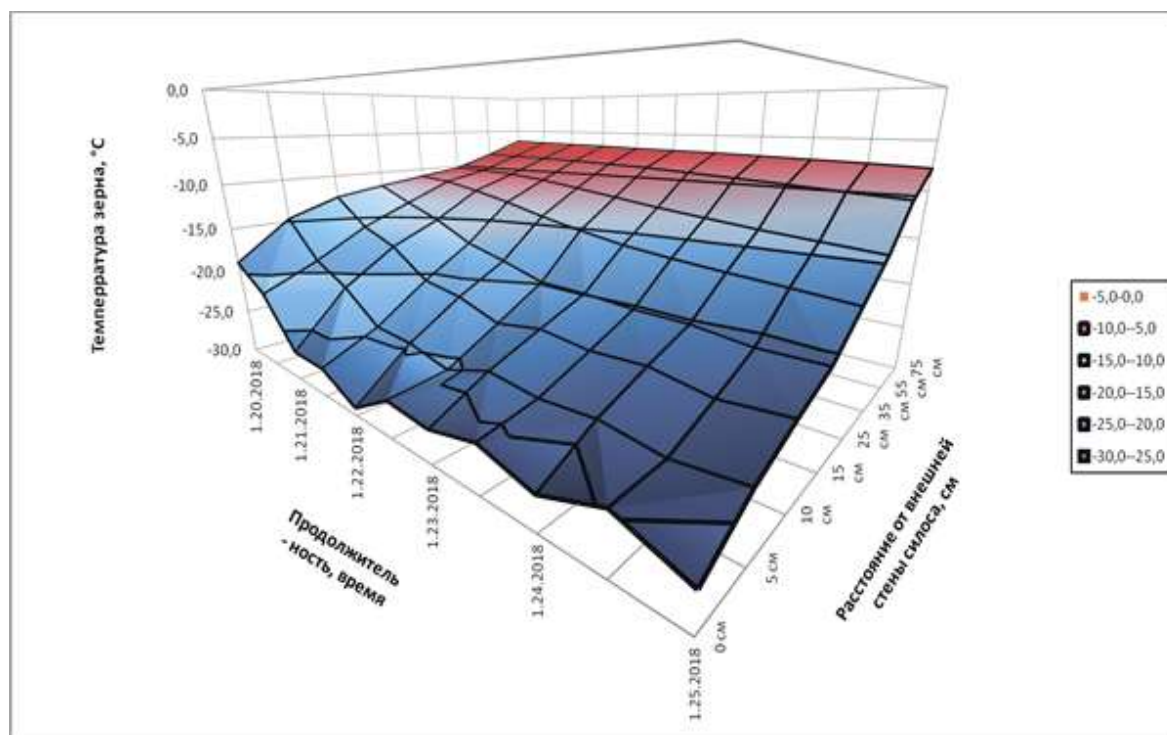


Рисунок 15. Нижний уровень. Зависимость температуры охлаждения пристенного слоя зерна от толщины слоя и продолжительности воздействия температуры наружного воздуха. Средняя температура наружного воздуха - 29,4 °С

- к наиболее критичным горизонтальным слоям зерна (т.е. имеющим в летний период температуру выше 15 °С) на нижнем уровне можно отнести слои от пристенного до отстоящего от стен силоса на 35 см, а на верхнем уровне все слои от пристенного до отстоящего от стен силоса на 75 см;
- для силосов, расположенных с северной и южной стороны элеватора, во всех слоях от наружной стены силоса прослеживается схожая тенденция развития временного температурного ряда. Однако для северной стороны характерны меньшие значения интервала колебания температур и большие значения минимальных температур для всех расстояний от наружной стены. В целом, в силосах на обоих направлениях (юг или север) температура зерна выше 15 °С держится в течение 4-х месяцев с июня по сентябрь. Более высокую температуру имеют слои, отстоящие от стенки силоса на 5-25 см на верхнем уровне;
- между температурой наружного воздуха и температурой горизонтальных слоёв зерновой массы внутри силоса на верхнем уровне установлена в основном положительная линейная корреляция. Наибольшее значение зависимости в пристенном слое внешнего силоса южной стороны элеватора $r =$ от +0,60 до +0,92. Качественная оценка такой связи определена как высокая. В силу меньших перепадов наружной температуры для северного силоса, зависимость температуры зерна от изменений наружного воздуха для северного силоса выражена слабее. Зависимость от внешних температурных условий ослабляется с увеличением толщины слоя зерна вглубь силоса от наружной стены внешнего силоса.

Выводы

Анализ данных температуры, полученных за период 2013-2019 гг в наружных силосах элеватора из сборного железобетона, расположенного в сибирском регионе России, показал подверженность изменения температуры зерна к следованию за изменениями температуры наружного воздуха, также подтверждена инерционность зерновой массы за счёт низкой термовлагопроводности зерна. За счёт дополнительного охлаждения зерна в процессе длительного хранения удаётся сохранять низкие температуры в средних и нижних слоях в течение длительного периода. Это позволяет осуществлять надёжное хранения зерна с температурой ниже 10 °С. Состояние зерна в верхних слоях силоса менее устойчиво при

длительном хранении зерна, температура может достигать 15-20 °С, а в особенно жаркие периоды года условия хранения могут быть неблагоприятны, поскольку температура в зерне может достигать 25 °С и выше.

Толщину слоя зерновой массы расположенного возле наружной стены внешнего силоса элеватора из сборного железобетона, с критическими для сохранности значениями температуры, удалось определить путём анализа годового цикла измерений температуры межзернового пространства внутри силоса элеваторного комплекса.

Литература

- Анастасиади, И. П., Фомин, Н. И., Костенко, Ю. В., & Трубицын, В. А. (1981). Исследование условий хранения зерна в наружных силосах элеваторов из сборных железобетонных конструкций. *Труды ВНИИЗ*, 96, 38-42.
- Белецкий, С. Л., & Лоозе, В. В. (2019). Динамика изменения влажности пристенного слоя зерна наружных силосов элеватора из сборного железобетона. *Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд*, 12, 27-41.
- Беляева, М. А., & Кечкин, И. А. (2020а). Тепломассообменные процессы при длительном хранении зерна пшеницы в металлических силосах. *Пищевая промышленность*, 6, 57-60. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10067>
- Беляева, М. А., & Кечкин, И. А. (2020б). Технологическая схема хранения зерна в металлических силосах большой емкости. *Пищевая промышленность*, 1, 46-49. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10012>
- Бибик, Г. А. (2014). Устройство контроля влажности и температуры сыпучих материалов. *Вестник АПК Верхневолжья*, 3, 63-66.
- Ветелкин, Г. В., Марков, Ю. Ф., & Саулькин, В. И. (2003). Контроль качества зерна при хранении в условиях юга России. В *Хранение зерна: Материалы Второй международной конференции* (с. 88-89). М.: Пищепромиздат.
- Гурьева, К. Б., & Иванова, Е. В. (2016). Исследование биологических потерь сухих веществ пшеницы за счет дыхания. В *Вопросы продовольственного обеспечения в XXI веке: Сборник материалов научно-практической конференции* (с. 307-309). М.: МГУПП.
- Гурьева, К. Б., Иванова, Е. В., & Белецкий, С. Л. (2013). Проблемы длительного хранения зерна злаковых культур. *Сборник научных трудов МПА*, 11, 175-190.

- Кечкин, И. А. (2019). Влияние режима вентилирования на хранимое зерно в металлических силосах большой емкости. *Научные труды Кавказского Федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия*, 26, 44-50.
- Малеева, О. Л., Брикота, Т. Б., & Ксенз, М. В. (2012). Изменение качества зерновой массы при хранении. *Журнал КФРГТУ*, 7, 29-40.
- Масло, А. Д., Кропачев, Д. Ю., & Неделько, Д. Ю. (2014). Система мониторинга температуры зерна в элеваторах и зернохранилищах. *Автоматизация технологических и бизнес процессов*, 2, 61-64.
- Мачихина, Л. И. (2006). *Хранение зерна и продуктов его переработки*. М.: Росинформагротех.
- Мачихина, Л. И., Ушаков, Т. И., Львова, Л. С., & Денисова, Е. В. (2012). Научный анализ хранения зерна в металлических силосах. *Хлебопродукты*, 9, 54-59.
- Мерзляков, А. А., Сизов, О. А., & Пугачев, П. М. (2010). Особенности топологии температурного контроля при силосном хранении зернопродуктов. В *Автоматизация и информационное обеспечение производственных процессов в сельском хозяйстве* (ч. 2, с. 562-572). М.: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства. Москва.
- Орловцева, О. А., Игнатенко, Н. А., & Клейменова, Н. Л. (2016). Изучение влияния внешних условий на процесс хранения зерна. *Вестник ВГУИТ*, 4, 36-39.
- Разворотнев, А. С., & Гавриченко, Ю. Д. (2020). Технология мониторинга и управления воздушными потоками внутри металлического силоса при хранении зерна. *Инженерные технологии и системы*, 30(2), 232-251. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.232-253>
- Скрябин, В. А. (2006). Изучение изменения технологических свойств зерна пшеницы в процессе хранения на мукомольных предприятиях Сибири в естественно-климатических условиях. *Хлебопродукты*, 4, 38-40.
- Скрябин, В. А. (2008). Влияние резко-континентального климата Сибири на технологические свойства зерна пшеницы при хранении. В *Научные основы хранения и переработки зерна в современных условиях: Монография к 80-летию ГНУ ВНИИЗ Россельхозакадемии* (с. 545-559). М.: ВНИИЗ Россельхозакадемии.
- Сологубик, А. А., Камаева, Ж. А., & Фомин, Н. И. (1981). Изменение температуры зерна, хранящегося в силосах из сборных железобетонных конструкция и монолитного железобетона. *Труды ВНИИЗ*, 95, 31-39.
- Тохтиева, Л. Х. (2016). Влияние условий хранения на хлебопекарные качества зерна озимой пшеницы. В *Перспективы развития АПК в современных условиях* (с. 153-155). Владикавказ: Горский государственный аграрный университет.
- Трисвятский, Л. А. (1991). *Хранение зерна*. М.: Агропромиздат.
- Усатилов, С. В., & Малеева, О. Л. (2007). Влияние температурно-влажностных условий и способа обработки при хранении риса-зерна на его потребительские свойства. *Известия вузов. Пищевая технология*, 4, 95-99.
- Черкасов, О. В. (2013). Влияние режимов охлаждения зерна пшеницы в процессе хранения на изменение мукомольных и хлебопекарных свойств. *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева*, 3, 53-55.
- Шаймерденова, Д. А. (2017). Влияние условий хранения на технологический потенциал зерна мягкой пшеницы Казахстана. *Новые технологии*, 2, 37-42.
- Шендеров, А. Р., & Сорока, В. И. (1994). Влияние наружных температурных колебаний на распределение температур в зерновых силосах. *Известия вузов. Пищевая технология*, 5-6, 66-67.
- Abbouda, S. K. (2001). Application of heat transfer model for prediction of temperature distribution in stored wheat. *Ama, Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America*, 32(3), 46-50.
- Chamurliyski, P., & Stoyanova, S. (2012). Ex situ storage of germplasm from common wheat (*Triticum aestivum* L.) for a ten-year period in a breeding collection. *Аграрни науки*, 4(11), 157-163.
- Montross, M. D., Maier, D. E., & Haghighi, K. (2002). Validation of a finite-element stored grain ecosystem model. *Transactions of the ASABE*, 45(5), 1465-1474.
- Waszkiewicz, C., & Sypula, M. (2008). Effect of storage conditions on biological value of wheat and barley grain. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*, 52, 39-44.
- Wilkes, M., & Copeland, L. (2008). Storage of wheat grains at elevated temperatures increases solubilization of glutenin subunits. *Cereal Chemistry*, 85(3), 335-338. <http://dx.doi.org/10.1094/CCHEM-85-3-0335>
- Yahya, S. A. (2001). Deterioration rates of wheat as measured by CO₂ production. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 32(2), 41-47.
- Yisa, M. G., Fadeyibi, A., Adisa, O. I. O., & Alabi, K. P. (2018). Finite element simulation of temperature variation in grain metal silo. *Research in Agricultural Engineering*, 64(3), 107-114. <https://doi.org/10.17221/101/2016-RAE>

Features of Temperature Changes in The Wall Layers of Wheat Grain During Storage in Silos of Elevators

Valerij V. Loose

*Research Institute for Storage Problems of the Federal State Reserve Agency
40/1, Volochaevskaya str., Moscow, 11033, Russian Federation
E-mail: vaalfa@yandex.ru*

Ksenia B. Gurieva

*Research Institute for Storage Problems of the Federal State Reserve Agency
40/1, Volochaevskaya str., Moscow, 11033, Russian Federation
E-mail: guriewa.ksen@yandex.ru*

Sergey L. Beletsky

*VNIKP - branch of the Federal Scientific Center for Food Systems
named after V. M. Gorbатов
20/3 Elektrozavodskaya str., Moscow, 107023, Russian Federation
E-mail: grain-miller@yandex.ru*

Tatyana G. Kostromina

*Research Institute for Storage Problems of the Federal State Reserve
40/1, Volochaevskaya str., Moscow, 11033, Russian Federation
E-mail: kazbanova.t@yandex.ru*

The dynamics of changes in internal temperatures in reinforced concrete silos is insufficiently covered in domestic and foreign studies. The purpose of this article is to study the dynamics of grain temperature change in the center of the silo in the traditional way using thermal hangers, as well as along horizontal layers, to determine the thickness of the near-wall grain layer subject to the greatest heating / cooling, as well as to highlight the critical layer in it. An analysis of the results of monitoring the temperature regime of wheat storage using a measuring system of thermohygrometers (loggers) of the DS1923-F5 type is presented. The study was carried out during the annual cycle in the outer silos of an elevator located in the temperate climate of the West Siberian climatic region. The distribution of temperatures along the vertical of silos at three levels (upper, middle and lower), the distribution of temperatures along the horizontal of silos (at different distances from the wall of the silo from 5 to 75 cm) was studied. A comparative analysis of the data on the temperature regime in silos located on the southern and northern sides of the elevator was made. New original data from thermohygrometers were obtained, which were statistically processed. The thickness of the near-wall layer of the grain mass, which is most susceptible to undesirable temperature effects for the outer silos of the southern and northern sides of the elevator, has been determined. near-wall layers of grain and spaced from the outer wall up to one meter. It is shown that the most critical with a higher temperature is the upper level, where it is necessary to more carefully control the quality of the grain. The middle and lower levels are in more favorable temperature conditions of preservation. The most critical horizontal layers of grain (i.e. those having a temperature above 15 °C in summer) at the lower level include layers from near-wall to silo separated from the walls by 35 cm, and at the upper level all layers from near-wall to silo separated from walls at 75 cm.

Keywords: temperature, control, thermal suspension, thermohygrometer, south side, north side, climate, grain, wheat, quality, storage, outdoor silo, elevator, reinforced concrete, thermal conductivity

References

Anastasiadi, I. P., Fomin, N. I., Kostenko, Yu. V.,
& Trubitsyn, V. A. (1981). Issledovanie uslovii

khraneniya zerna v naruzhnykh silosakh eleva-
torov iz sbornykh zhelezobetonnykh konstrukt-
sii [Investigation of grain storage conditions in
the external silos of elevators made of prefabri-
cated reinforced concrete structures]. *Trudy VNIIZ*

- [*Proceedings of the All-Russian Research Institute of Grain and its Processing Products*], 96, 38-42.
- Beletskii, S. L., & Looze, V. V. (2019). Dinamika izmeneniya vlazhnosti pristennogo sloya zerna nuzhnykh silosov elevatora iz sbornogo zhelezobetona [Dynamics of changes in the moisture content of the near-wall layer of grain in the outer silos of the precast concrete elevator]. *Innovatsionnye tekhnologii proizvodstva i khraneniya material'nykh tsennostei dlya gosudarstvennykh nuzhd* [Innovative technologies for the production and storage of material assets for state needs], 12, 27-41.
- Belyaeva, M. A., & Kechkin, I. A. (2020a). Teplomas-soobmennyye protsessy pri dlitel'nom khraneni zerna pshenitsy v metallicheskiy silosakh [Heat and mass transfer processes during long-term storage of wheat grain in metal silos]. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry], 6, 57-60. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10067>
- Belyaeva, M. A., & Kechkin, I. A. (2020b). Tekhnologicheskaya skhema khraneniya zerna v metallicheskiy silosakh bol'shoi emkosti [Technological scheme of grain storage in large-capacity metal silos]. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry], 1, 46-49. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10012>
- Bibik, G. A. (2014). Ustroistvo kontrolya vlazhnosti i temperatury sypuchikh materialov [Bulk material moisture and temperature control device]. *Vestnik APK Verkhnevolzh'ya* [Bulletin of the APK Upper Volga], 3, 63-66.
- Vetelkin, G. V., Markov, Yu. F., & Saul'kin, V. I. (2003). Kontrol' kachestva zerna pri khraneni v usloviyakh yuga Rossii [Quality control of grain during storage in the conditions of the south of Russia]. In *Khraneniye zerna: Materialy Vtoroi mezhdunarodnoi konferentsii* [Grain storage: Proceedings of the second international conference] (pp. 88-89). Moscow: Pishchepromizdat.
- Gur'eva, K. B., & Ivanova, E. V. (2016). Issledovanie biologicheskikh poter' sukhikh veshchestv pshenitsy za schet dykhaniya [Investigation of biological losses of wheat dry matter due to respiration]. In *Voprosy prodovol'stvennogo obespecheniya v KhKhI veke: Sbornik materialov nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Questions of food security in the XXI century: Collection of materials of the scientific and practical conference] (pp. 307-309). Moscow: MGUPP.
- Gur'eva, K. B., Ivanova, E. V., & Beletskii, S. L. (2013). Problemy dlitel'nogo khraneniya zerna zlakovykh kul'tur [Problems of long-term storage of grain cereals]. *Sbornik nauchnykh trudov MPA* [Collection of scientific works of the IPA], 11, 175-190.
- Kechkin, I. A. (2019). Vliyaniye rezhima ventilirovaniya na khranimoye zerno v metallicheskiy silosakh bol'shoi emkosti [Influence of the ventilation mode on the stored grain in large-capacity metal silos]. *Nauchnye trudy Kavkazskogo Federal'nogo nauchnogo tsentra sadovodstva, vinogradarstva, vinodeliya* [Scientific works of the caucasian federal scientific center for horticulture, viticulture, wine-making], 26, 44-50.
- Maleeva, O. L., Brikota, T. B., & Ksenz, M. V. (2012). Izmeneniye kachestva zernovoi massy pri khraneni [Change in the quality of the grain mass during storage]. *Zhurnal KFRGTU* [Journal Russian University of Economics. G. V. Plekhanova], 7, 29-40.
- Maslo, A. D., Kropachev, D. Yu., & Nedel'ko, D. Yu. (2014). Sistema monitoringa temperatury zerna v elevatorakh i zernokhranilishchakh [Grain temperature monitoring system in elevators and granaries]. *Avtomatizatsiya tekhnologichnykh i biznes protsessov* [Automation of technological and business processes], 2, 61-64.
- Machikhina, L. I. (2006). *Khraneniye zerna i produktov ego pererabotki* [Storage of grain and products of its processing]. Moscow: Rosinformagrotekh.
- Machikhina, L. I., Ushakov, T. I., L'vova, L. S., & Denisova, E. V. (2012). Nauchnyi analiz khraneniya zerna v metallicheskiy silosakh [Scientific analysis of grain storage in metal silos]. *Khleboprodukty* [Bakery Products], 9, 54-59.
- Merzlyakov, A. A., Sizov, O. A., & Pugachev, P. M. (2010). Osobennosti topologii temperaturnogo kontrolya pri silosnom khraneni zernoproduktov [Features of the topology of temperature control during silo storage of grain products]. In *Avtomatizatsiya i informatsionnoe obespecheniye proizvodstvennykh protsessov v sel'skom khozyaistve* [Automation and information support of production processes in agriculture] (vol. 2, pp. 562-572). Moscow: Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut mekhanizatsii sel'skogo khozyaistva. Moskva.
- Orlovtsseva, O. A., Ignatenko, N. A., & Kleimenova, N. L. (2016). Izuchenie vliyaniya vneshnikh uslovii na protsess khraneniya zerna [Study of the influence of external conditions on the grain storage process]. *Vestnik VGUIT* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 4, 36-39.
- Razvorotnev, A. S., & Gavrichenkov, Yu. D. (2020). Tekhnologiya monitoringa i upravleniya vozdushnymi potokami vnutyri metallicheskogo silosa pri khraneni zerna [Technology for monitoring and controlling air flows inside a metal silo during grain storage]. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy* [Engineering Technologies and Systems], 30(2), 232-251. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.232-253>

- Skryabin, V. A. (2006). Izuchenie izmeneniya tekhnologicheskikh svoystv zerna pshenitsy v protsesse khraneniya na mukomol'nykh predpriyatiyakh Sibiri v estestvenno-klimaticheskikh usloviyakh [The study of changes in the technological properties of wheat grain during storage at the flour mills of Siberia in natural and climatic conditions]. *Khleboпродукты [Bakery Products]*, 4, 38-40.
- Skryabin, V. A. (2008). Vliyanie rezko-kontinental'nogo klimata Sibiri na tekhnologicheskie svoystva zerna pshenitsy pri khraneni [The influence of the sharply continental climate of Siberia on the technological properties of wheat grain during storage]. In *Nauchnye osnovy khraneniya i pererabotki zerna v sovremennykh usloviyakh: Monografiya k 80-letiyu VNIIZ Rossel'khozakademii [Scientific foundations of storage and processing of grain in modern conditions: Monograph for the 80th anniversary All-Russian research institute of grain and its processing products of the russian agricultural academy]* (pp. 545-559). Moscow: VNIIZ Rossel'khozakademii.
- Sologubik, A. A., Kamaeva, Zh. A., & Fomin, N. I. (1981). Izmenenie temperatury zerna, khranyashchegosya v silosakh iz sbornyykh zhelezobetonnykh konstruktsiya i monolitnogo zhelezobetona [Change in the temperature of grain stored in silos made of precast concrete structures and monolithic reinforced concrete]. *Trudy VNIIZ [Proceedings of the All-Russian Research Institute of Grain and its Processing Products]*, 95, 31-39.
- Sorochinskii, V. F. (2016). Izmenenie temperatury pristennogo sloya zerna v metallicheskh elevatorakh [Change in the temperature of the near-wall layer of grain in metal elevators]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya [Storage and processing of agricultural raw materials]*, 4, 13-16.
- Tokhtieva, L. Kh. (2016). Vliyanie uslovii khraneniya na khlebopekarnye kachestva zerna ozimoi pshenitsy [The influence of storage conditions on the baking quality of winter wheat grain]. In *Perspektivy razvitiya APK v sovremennykh usloviyakh [Prospects for the development of the agro-industrial complex in modern conditions]* (pp. 153-155). Vladikavkaz: Gorskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet.
- Trisvyatskii, L. A. (1991). *Khranenie zerna [Grain storage]*. M.: Agropromizdat.
- Shaimerdenova, D. A. (2017). Vliyanie uslovii khraneniya na tekhnologicheskii potentsial zerna myagkoi pshenitsy Kazakhstana [Influence of storage conditions on the technological potential of grain of soft wheat of Kazakhstan]. *Novye tekhnologii [New Technologies]*, 2, 37-42.
- Shenderov, A. R., & Soroka, V. I. (1994). Vliyanie naruzhnykh temperaturnykh kolebonii na raspredelenie temperatur v zernovykh silosakh [Influence of outdoor temperature fluctuations on temperature distribution in grain silos]. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya [News Universities. Food Technology]*, 5-6, 66-67.
- Cherkasov, O. V. (2013). Vliyanie rezhimov okhlazhdeniya zerna pshenitsy v protsesse khraneniya na izmenenie mukomol'nykh i khlebopekarnykh svoystv [Influence of wheat grain cooling regimes during storage on the change in flour-grinding and baking properties]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P. A. Kostycheva [Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University. P. A. Kostycheva]*, 3, 53-55.
- Usatkov, S. V., & Maleeva, O. L. (2007). Vliyanie temperaturno-vlazhnostnykh uslovii i sposoba obrabotki pri khraneni risa-zerna na ego potrebitel'skie svoystva [The influence of temperature and humidity conditions and the method of processing during storage of rice-grain on its consumer properties]. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya [News Universities. Food Technology]*, 4, 95-99.
- Abbouda, S. K. (2001). Applicatin of heat transfer model for prediction of temperature distribution in stored wheat. *Ama, Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America*, 32(3), 46-50.
- Chamurliyski, P., & Stoyanova, S. (2012). Ex situ storage of germplasm from common wheat (*Triticum aestivum* L.) for a ten-year period in a breeding collection. *Agrarni nauki [Agrarian Science]*, 4(11), 157-163.
- Yahya, S. A. (2001). Deterioration rates of wheat as measured by CO₂ production. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 32(2), 41-47.
- Montross, M. D., Maier, D. E., & Haghighi, K. (2002). Validation of a finite-element stored grain ecosystem model. *Transactions of the ASABE*, 45(5), 1465-1474.
- Yisa, M. G., Fadeyibi, A., Adisa, O. I. O., & Alabi, K. P. (2018). Finite element simulation of temperature variation in grain metal silo. *Research in Agricultural Engineering*, 64(3), 107-114. <https://doi.org/10.17221/101/2016-RAE>
- Wilkes, M., & Copeland, L. (2008). Storage of wheat grains at elevated temperatures increases solubilization of glutenin subunits. *Cereal Chemistry*, 85(3), 335-338. <http://dx.doi.org/10.1094/CCEM-85-3-0335>
- Waszkiewicz, C., & Sypula, M. (2008). Effect of storage conditions on biological value of wheat and barley grain. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*, 52, 39-44.