

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА / TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

УДК 631.243.3:664.72

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202002.232-253



Технология мониторинга и управления воздушными потоками внутри металлического силоса при хранении зерна

А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченко*
*ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский
институт зерна и продуктов его переработки»
(г. Москва, Россия)*
**gavrud@bk.ru*

Введение. Сохранение урожая зерновых в металлических силосах с плоским дном не представляется возможным без мониторинга и управления воздушными потоками во внутреннем объеме. В силосах с неуправляемыми потоками воздуха происходит перераспределение влаги и дополнительное увлажнение поверхностного слоя, что приводит к потерям около 2 % зерна. Целью работы является разработка технологии, исключающей увлажнение поверхностного слоя зерна при хранении в металлических силосах.

Материалы и методы. В лабораторных условиях были определены аэродинамические параметры зерна пшеницы и сои в диапазоне скоростей фильтрации менее 0,15 м/с. В металлических силосах вместимостью 2 000, 3 000 и 10 000 т одновременно измерены температура и относительная влажность воздуха внутри, в верхней части силоса и снаружи. Период измерения температуры и относительной влажности составлял 30 мин в течение двух и пяти месяцев. Для измерения использовались автономные регистраторы.

Результаты исследования. Предложен новый объективный норматив вентилирования зерна – минимальная (критическая) скорость фильтрации, обеспечивающая вынос влаги за пределы силоса. Аналитическими исследованиями получено уравнение для вычисления средневзвешенной скорости фильтрации воздуха, выходящего из зерновой массы. Общий расход воздуха, соответствующий средневзвешенной скорости фильтрации, обеспечит по всей поверхности скорость фильтрации не менее критической и исключит оседание влаги. Экспериментально выявлены периоды насыщения влагой воздуха до 100 % в надзерновом пространстве под крышей силоса. Уточнен механизм выброса тепла под крышу силоса из глубины зерновой массы при хранении.

Обсуждение и заключение. Предложен алгоритм безопасного активного вентилирования зерна и подкрышного пространства в металлическом силосе. Рекомендованы предельные значения относительной влажности атмосферного воздуха, использование которого исключит увлажнение зерновой массы при активном вентилировании в диапазоне перепада температур зерна и атмосферы до 30 °С и более. Полученные

© Разворотнев А. С., Гавриченко Ю. Д., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

данные могут быть использованы машиностроителями при изготовлении металлических силосов, а также при эксплуатации производителями зерна и его переработке.

Ключевые слова: металлический силос, вентилирование, хранение зерна, самосогревание, увлажнение, относительная влажность, температура

Для цитирования: Разворотнев, А. С. Технология мониторинга и управления воздушными потоками внутри металлического силоса при хранении зерна / А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченко. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.232-253 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 232–253.

Technology for Monitoring and Control of Air Flows Inside Metal Silos during Grain Storage

A. S. Razvorotnev, Yu. D. Gavrichenkov*

All-Russian Research Institute of Grain and Its Processing Products (Moscow, Russia)

*gavrud@bk.ru

Introduction. Preservation of grain crops in flat-bottomed metal silos is not possible without monitoring and control of air flows in the internal volume. In the silos with uncontrolled air flows, there is a redistribution of moisture and additional moistening of the grain surface layer that leads to losses of about 2% of grain. The aim of this work is to develop a technology for preventing the grain surface layer from humidifying during storage in metal silos.

Materials and Methods. Under laboratory conditions, aerodynamic parameters of wheat and soybean grains were determined in the range of filtration rates less than 0.15 m/s. In metal silos, with a capacity of 2,000, 3,000 and 10,000 t, the temperature and relative humidity of the air inside at the top of the silos and outside were measured simultaneously. The temperature and relative humidity measurement period was 30 min for two and five months. Autonomous recorders were used for measurement.

Results. A new objective standard of grain ventilation is proposed – minimum (critical) filtration rate, which ensures moisture removal outside the silo. The analytical studies produced an equation for calculating the weighted average filtration rate of air leaving the grain mass. The total air flow rate corresponding to the weighted average filtration rate will provide a filtration rate of at least critical over the entire surface and will exclude moisture settling. The periods of air saturation with moisture up to 100% in the supervisory space under the roof of the silo have been determined experimentally. The mechanism of heat emission up to the silo roof space from the depth of grain mass during storage has been clarified.

Discussion and Conclusion. The algorithm for safe active ventilation of grain and roof space in metal silos is proposed. Limit values of relative humidity of atmospheric air are recommended, the use of which will exclude humidification of grain mass when ventilating actively in the range of temperature difference between grain and atmosphere up to 30 °C and more. The obtained data can be used by mechanical engineers in the manufacture of metal silos and by grain producers in the operation of the said silos.

Keywords: metal silo, ventilation, grain storage, self heating, humidification, relative humidity, temperature

For citation: Razvorotnev A.S., Gavrichenkov Yu.D. Technology for Monitoring and Control of Air Flows Inside Metal Silos during Grain Storage. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2):232-253. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.232-253>

Введение

Для сохранения урожая зерновых в России к 2035 г., по экспертной оценке, потребуется дополнительно построить зернохранилища вместимостью свыше 84 млн т [1]. Имеющийся дефицит емкостей для хранения, очевидно, будет устранен введением в эксплуатацию металлических силосов, которые используются во всем мире. В России за последние 16 лет ежегодно вводились в эксплуатацию металлические емкости вместимостью около 1 млн т. В отличие от традиционно строившихся элеваторов из железобетонных конструкций металлические силосы более экономичны. Они имеют меньший срок строительства в 1,5–2 раза, на 15–20 % меньшие капитальные затраты и не менее 20 % – снижение текущих затрат на содержание зданий. По сравнению с напольными складами в металлических силосах механизированы погрузочно-разгрузочные работы с зерном. Недостатком этих силосов является невозможность гарантированно сохранить в условиях умеренного климата верхний слой зерна массой около 2 % от общего объема [2]. В странах с жарким климатом такой недостаток силосов отсутствует. Сохранение верхнего слоя зерна в металлических силосах в климатических условиях нашей страны – актуальная задача.

На сохранность зерна существенное влияние оказывают температура и влажность воздуха, окружающего зерновую массу и находящегося внутри ее [3; 4]. Повышенные температура и влажность являются благоприятной средой для развития бактерий, грибов, плесеней, насекомых и других негативных процессов, снижающих стойкость зерна к хранению и приводящих к потерям массы и качества. В металлическом силосе вследствие высокой

проводимости тепла и температуры ограждающих стен воздух под крышей в надзерновом пространстве изменяет свои параметры в зависимости от погодных условий и физиологических процессов, протекающих в зерновой массе. Параметры воздуха внутри зерновой массы изменяются значительно медленнее и практически не зависят от погодных условий. Зерновая масса обладает низкой температуропроводностью и теплопроводностью. На изменение параметров воздуха в межзерновом пространстве влияют физиологические процессы, протекающие в зерновой массе при хранении. В процессе дыхания компонент зерновой массы выделяется тепло, приводящее к повышению температуры и нередко к случаям самосогревания зерна. Предотвратить этот процесс позволяет вентилирование зерновой массы¹.

В металлических силосах с плоским дном, предназначенных для хранения, предусмотрены две вентиляционные установки и устройство для мониторинга температуры во внутреннем объеме. Одна установка предназначена для вентилирования надзернового пространства под крышей. В верхней части силоса или на крыше устанавливаются осевые (крышные), вытяжные вентиляторы, которые осуществляют замену воздуха в надзерновом пространстве. Приток наружного воздуха обеспечивается через кольцевой зазор между вертикальной стенкой силоса и крышей. Другая установка предназначена для активного вентилирования зерновой массы, замены воздуха во внутреннем объеме силоса, в том числе и в межзерновом пространстве. Наружный более холодный воздух нагнетается в зерновую массу снизу через перфорацию в плоском дне. Выводится воздух из силоса в верхней части через

¹ Burrill P. Super Cool Aeration Results // Source Link Grains Research and Development Corporation (GRDC). 21.06.2016. URL: <https://storedgrain.com.au/super-cool-aeration-results/> (дата обращения: 20.04.2020).

кольцевой зазор между стенкой и крышей в дефлекторы. Устройство для мониторинга температуры представляет собой вертикально натянутый внутри силоса трос с датчиками температуры. Расстояние между датчиками не более 1,5 м. Показания датчиков выводят на пульт управления.

В конструкции металлических силосов не предусмотрен мониторинг количества воздуха, обращающегося внутри силоса. Силосы не оборудованы измерительной аппаратурой контроля расхода воздуха, подаваемого в зерновую массу. Известно, что при активном вентилировании происходит перераспределение влаги в массе зерна. При малых скоростях фильтрации десорбируемая из зерна влага оседает на поверхности зерновой массы, приводит к дополнительному увлажнению и развитию негативных процессов [5]. В процессе хранения в надзерновом пространстве под крышей силоса (особенно в осенне-зимний период при охлаждении атмосферы ниже 0°C) образуется конденсат, который выпадает на поверхность зерновой массы и также увлажняет зерно.

Настоящая статья посвящена разработке технологии, исключающей увлажнение поверхностного слоя зерна при хранении в металлических силосах, выведению алгоритма безопасного активного вентилирования зерна и алгоритма вентилирования надзернового пространства под крышей силоса.

Обзор литературы

В нормативно-технической документации, а также в инструкциях по эксплуатации металлических силосов отечественных и зарубежных компаний-изготовителей не изложены методы управления воздушными потоками. В силосах, укомплектованных одинаковым вентиляционным оборудованием, хранятся различные зерновые культуры. Аэродинамические характеристики зерновых культур отличаются друг от друга. Например, потери давления воз-

духа на одном метре высоты зерна при фильтрации со скоростью $0,037\text{ м/с}$ по данным составят: пшеницы – около 110 Па, кукурузы – около 30 Па, проса – около 280 Па, ржи – около 120 Па. При активном вентилировании требуется регулировка установки для каждой культуры. Для металлических силосов установлен единый норматив объема воздуха, нагнетаемого в зерновую массу.

В инструкциях активное вентилирование в металлических силосах рекомендовано осуществлять при удельном расходе воздуха не менее $10\text{ м}^3/\text{ч}$ на одну тонну. Однако этот норматив недостаточно объективен. В работах ряда ученых установлено, что воздушный поток внутри силоса неравномерно распределяется в зерновой массе [6]. Около стен силоса воздух имеет большую скорость по сравнению с центральной частью. 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. Размеры конусной части насыпи зависят от диаметра силоса. Высота конусной части выше в силосах, имеющих больший диаметр. Чем больше диаметр силоса, тем меньший объем воздуха проходит через центральную часть насыпи при средней удельной подаче. Действующий норматив установлен около 30 лет назад на основе исследований в силосе диаметром 15,2 м. В настоящее время строят силосы диаметром от 8 до 40 м. Объединенным нормативом подачи воздуха для всех зерновых культур и типоразмеров силосов могла бы быть критическая скорость фильтрации, при которой обеспечивается вынос влаги за пределы силоса. В зерновую массу необходимо нагнетать воздух в объеме с учетом неравномерности распределения в насыпи, при котором устанавливается критическая

(нормативная) скорость фильтрации в центральной части. При таком режиме активного вентилирования будет обеспечен вынос влаги за пределы силоса и исключено выпадение ее на поверхностный слой [7].

Для описания аэродинамических параметров зерновых культур в плотном слое в литературе используют следующую формулу Рамзина:

$$P = 9,81 \cdot A \cdot h \cdot v^n, \quad (1)$$

где P – потери давления в зерновом слое, Па; A и n – эмпирические коэффициенты, приведены в таблице 1 для различных культур; h – высота слоя, мм; v – скорость фильтрации – расход воздуха, отнесенный к площади зерновой массы, м/с.

Коэффициенты в таблице 1 получены В. Ф. Самочетовым экспериментально при скоростях фильтрации свыше 0,1 м/с. Фактические скорости фильтрации в металлических силосах, по данным О. М. Бинело, не превышают 0,05 м/с [8]. Требуется экспериментально подтвердить правомерность использования значений эмпирических коэффициентов для этих режимов вентилирования. В ряде работ формула (1) применена для мониторинга количества воздуха, нагнетаемого в зерновую массу [8; 9]. Предлагается измерять перепад давления в слое фиксированной толщиной внутри зерновой насыпи. По формуле (1) вычисляют среднюю скорость фильтрации, затем средний расход воздуха через массу зерна и удель-

ную подачу. Технологическая схема хранения зерна в металлическом силосе с мониторингом расхода воздуха представлена на рисунке 1.

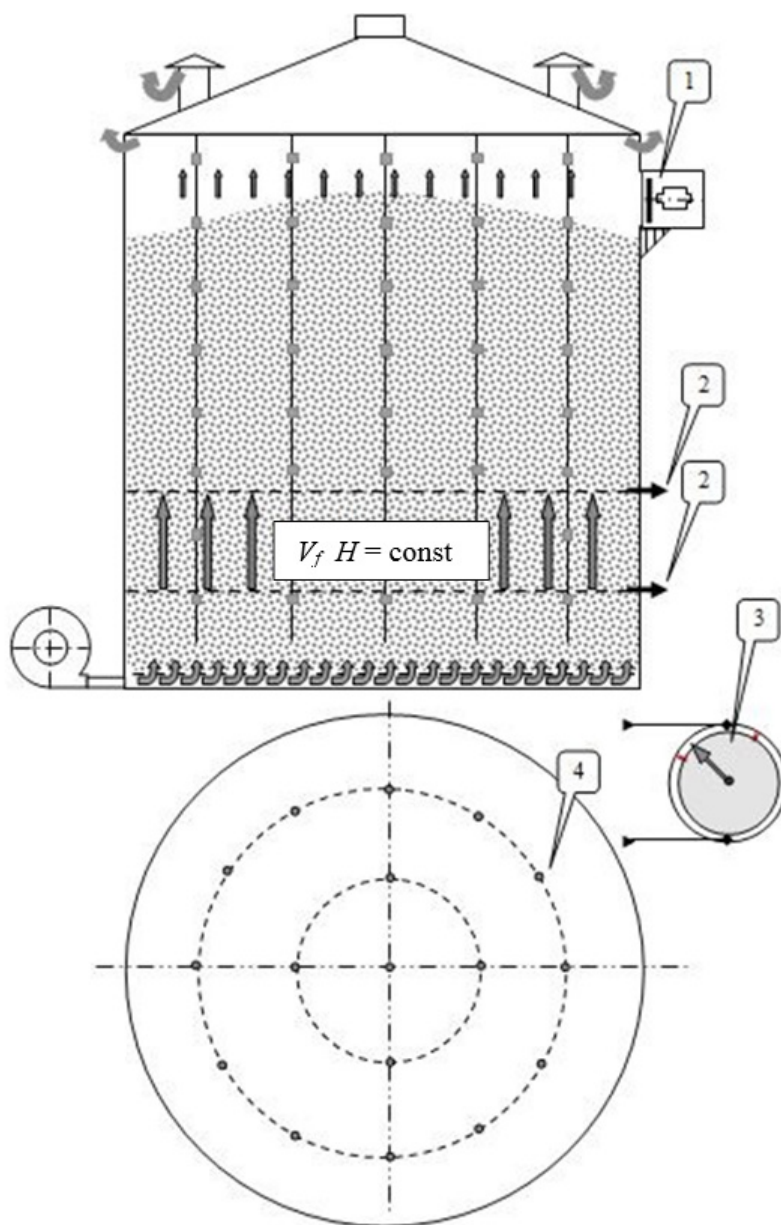
В металлических силосах в соответствии с нормативной документацией разрешается хранение зерна влажностью не более 14 %. Вентилирование допускается воздухом, имеющим параметры, исключающие дополнительное увлажнение зерна. Температура наружного воздуха должна быть ниже температуры зерна не менее чем на 5 °С. В инструкциях не определены предельные параметры атмосферного воздуха, при которых не происходит увлажнение зерна при вентилировании. В некоторых зарубежных инструкциях, например испанской фирмы Kordoba, дана таблица предельной относительной влажности наружного воздуха. В таблице разность температур зерна и атмосферы не превышает 8 °С. Зерно влажностью 14 % допускается вентилировать воздухом, имеющим 100 % влажность. Требуется разработать таблицу в более широком диапазоне разности температур: с учетом условий хранения в умеренном климате РФ. Разность температур может достигать более 30 °С. Вентилирование воздухом с влажностью, близкой к 100 %, недопустимо.

Для контроля и управления установкой вентилирования надзернового пространства силоса в инструкциях рекомендовано измерять относительную влажность воздуха под крышей и снаружи при помощи психрометра Ассма-

Т а б л и ц а 1
Table 1

Значения коэффициентов A и n для различных культур
Values of factors A and n for different cultures

Культура / Culture	A	n	Культура / Culture	A	n
Пшеница / Wheat	1,41	1,43	Кукуруза / Corn	0,67	1,55
Рожь / Rye	1,76	1,41	Горох / Peas	0,82	1,51
Овес / Oats	1,64	1,42	Гречиха / Buckwheat	1,76	1,41
Ячмень / Barley	1,44	1,43	Просо / Millet	2,34	1,38



Р и с. 1. Технологическая схема хранения зерна в металлическом силосе с мониторингом расхода воздуха: 1 – осевой вентилятор; 2 – присоединение к дифманометру; 3 – дифманометр для измерения давления воздуха; 4 – схема расположения термоподвесок в поперечном сечении силоса; $\Delta P = f(V_f)$ – изменение давления как функция скорости фильтрации

F i g. 1. Process diagram of grain storage in metal silo with air flow monitoring: 1 – axial fan; 2 – accession to a manometer; 3 – manometer for measurement air pressure; 4 – diagram of positioning for thermal supports in cross section of silo; $\Delta P = f(V_f)$ – pressure change as a function of filtration rate

на. Включать установку требуется при превышении влажности воздуха над зерном по сравнению с влажностью воздуха снаружи.

В инструкции не указаны периодичность контроля, а также значение превышения влажности воздуха внутри относительно влажности снаружи. Выполнить на практике предложенные в инструкции условия контроля влажности не представляется возможным: высота силосов около 20 м. Также нецелесообразно вентилировать подкрышное пространство при состоянии превышения влажности воздуха внутри относительно наружной, но не менее точки росы. В этом случае нет опасности выпадения конденсата.

Разработать алгоритм управления установкой вентилирования подкрышного пространства силоса возможно на основе анализа данных изменений температуры и относительной влажности воздуха внутри в верхней части силоса и снаружи. Наблюдения за изменениями параметров воздуха целесообразно провести в период от закладки зерна с температурой не менее 20 °С до устойчивого охлаждения атмосферы ниже 0 °С. Такое соотношение температур характерно для умеренного климата. Похожие исследования для условий жаркого климата выполнены в зарубежных работах² [10].

В наших работах опубликованы графики изменений температуры и влажности воздуха в силосе и снаружи [11–13]. Полученные данные подтверждают неустойчивое состояние верхнего слоя зерна при хранении в металлическом силосе. Внутри в верхнем слое на глубине около 70 мм и на поверхности зерновой насыпи может образоваться конденсат. В этих местах относительная влажность воздуха достигает 100 %

в отдельные периоды хранения. Часто предельное насыщение влагой воздуха наблюдается в надзерновом пространстве под крышей. Начинаются эти процессы при устойчивом понижении наружной температуры ниже нуля, составляющей не менее половины времени в течение месяца. Высказано предположение о том, что внутри силоса происходит насыщение воздуха влагой, близкой 100 %, при двух вариантах: 100 % относительной влажности воздуха снаружи (дождливая погода) и выбросе тепла под крышу из глубинных слоев зерновой массы.

Для подтверждения изложенных выше вариантов насыщения влагой воздуха требуется более детально изучить соотношение параметров воздуха внутри силоса и снаружи в следующие периоды хранения. Периоды повышения температуры над зерном относительно наружной температуры и периоды 100 % влажности наружного воздуха.

Материалы и методы

Потери давления и расход воздуха при вентилировании зерна измерялись в производственных и лабораторных условиях. В производственных силосах измерения выполнялись при вентилировании пшеницы, овса и сои, в лаборатории – при вентилировании пшеницы и сои.

Перед выполнением замеров в силосах выравнивался поверхностный слой посредством выгрузки части зерна в течение 15 мин. В силосах измерялись: перепад давления в слоях фиксированной толщины, давление воздуха в нижнем слое над перфорированной решеткой и расход воздуха, нагнетаемый в силос. Перепад давления измерялся в следующих силосах и культурах. В пшенице – толщина слоя 2,95 м

² Кечкин И. А., Разворотнев А. С., Гавриченко Ю. Д. Обеспечение сохранности зерна в металлическом силосе // Инновационное развитие пищевой, легкой промышленности и индустрии гостеприимства: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Алматинского технологического университета. Алматы, 2017. С.194–196.

в силосе фирмы RIELA вместимостью 2 000 т, заполненном свыше 50 %. В зерне сои – толщина слоя 2,0 и 3,0 м в силосе фирмы GSCOR вместимостью 10 000 т, загруженном полностью. Давление в нижнем слое измерялось при вентилировании овса толщиной 0,5 м в силосе RIELA вместимостью 3 000 т и при вентилировании пшеницы слоем более 10 м в силосе той же фирмы вместимостью 2 000 т.

Перепад и давление измерялись U-образным манометром, заполненным водой. При охлаждении атмосферы до 0 °C и ниже использовался дифманометр-напорометр ДНМП. Расход воздуха, нагнетаемый в силос, измерялся в воздухопроводе между вентилятором и силосом по общепринятой методике с применением пневмометрической трубки Пито.

В лабораторных условиях вентилировалась пшеница с высотой слоя 1 м, а соя с высотой 0,22 м. Измерялись давление воздуха в нижнем слое и расход воздуха. Для измерения давления использовался спиртовой микроманометр. Расход воздуха измерялся при помощи сужающих устройств: трубы Бенури и диафрагмы.

Температура и относительная влажность воздуха измерялись в верхней части внутри силосов вместимостью 2 000 и 10 000 т. Силосы были заполнены соответственно на 90 % и 100 % сухим зерном пшеницы влажностью менее 14 % урожая текущего года. В силосе на 2 000 т наблюдения осуществлялись в течение двух месяцев (сентябрь–октябрь 2016 г.), в силосе на 10 000 тонн наблюдали в течение пяти месяцев (октябрь 2017 г.–февраль 2018 г.). Внутри силоса и снаружи параметры воздуха измерялись одновременно через каждые 30 мин, в сутки – 24 измерения.

Для измерения температуры и относительной влажности воздуха использовались автономные регистраторы Логгер 100-ТВ. В силосах регистраторы помещались: в верхнем слое зерна на глубине

около 70 мм; в надзерновом пространстве – посередине между крышей и зерном на расстоянии около 200–300 мм от крыши и на поверхности зерна. Снаружи регистраторы устанавливались около силоса с северной стороны на высоте 1,5–2,0 м от земли. Погрешность измерения температуры, в диапазоне от –40 °C до +70 °C, составляла не более 2 °C; погрешность измерения относительной влажности, в диапазоне от 10 % до 95 %, составляла не более 5 %.

При анализе данных температуры и относительной влажности, измеренных регистраторами, дополнительно рассчитывалось влагосодержание. По этому показателю можно оценить количество конденсата, выпадающего при охлаждении воздуха.

Помимо данных регистраторов использовались показания системы штатного мониторинга температуры, установленной внутри зерновой массы в силосе. Наблюдения осуществлялись в тех же силосах, в которых были установлены регистраторы, и дополнительно еще в пяти вместимостью по 10 000 т, заполненных пшеницей. В одном из дополнительно наблюдаемых силосов зафиксирован процесс самосогревания, представленный ниже в разделе «Результаты исследования». Показаны температуры, зафиксированные датчиками, установленными на термоподвеске в центре силоса на высоте от 1,0 до 13,0 м от днища. Расстояние между датчиками – 1,5 м.

Таблицу предельных значений относительной влажности воздуха для вентилирования разрабатывали для пшеницы и ячменя. При этом использовались данные равновесной влажности, опубликованные в одной из наших работ, а также общеизвестные таблицы изменения относительной влажности воздуха от температуры [13–15]. Данные для ячменя можно использовать для ржи, равновесные значения влажности этих культур практически одинаковые.

Результаты исследования

В таблице 2 представлены результаты аэродинамических испытаний. Из данных таблицы 2, фактических потерь давления, определены эмпирические коэффициенты для зерна сои ($A = 0,22$; $n = 1,10$).

Расхождения между расчетными и фактическими значениями потерь давления не превышают 15 %. Это допустимо для инженерных расчетов вентилирования зерна по формуле (1).

Используя эту формулу, можно описать эпюру скоростей воздуха на границе выхода из зерновой массы от центра силоса до стены следующим уравнением:

$$v_x = \exp r^{-1} (\ln P - \ln A - \ln (h + (R - x) \operatorname{tg} \alpha)), \quad (2)$$

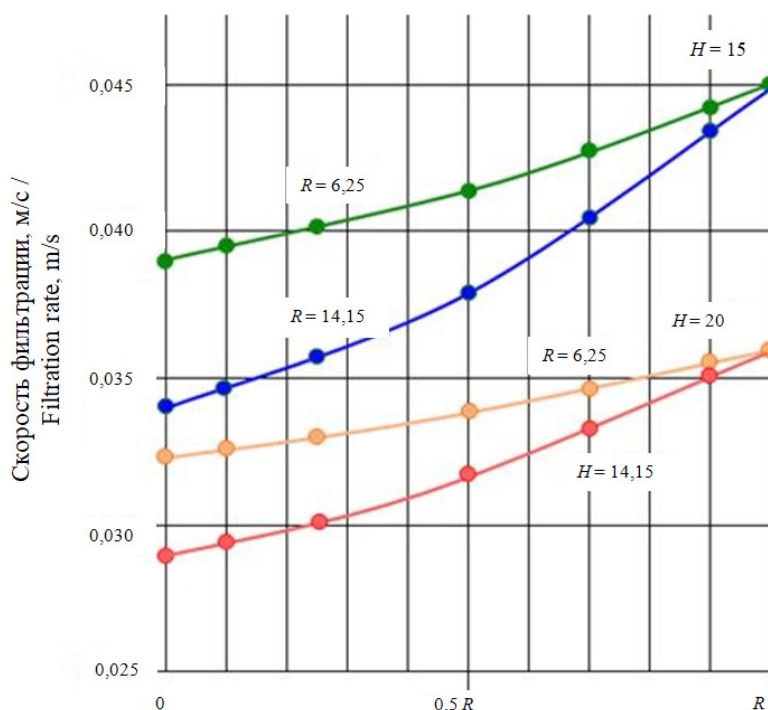
где v_x – скорость фильтрации воздуха на выходе из зерновой массы на расстоянии x от центра силоса, м/с; P – давление воздуха в нижней части насыпи, Па; h – высота слоя зерна около вертикальной стенки силоса, мм; R – радиус силоса, мм; x – переменная величина расстояния от центра силоса до его стенки, мм; α – угол естественного откоса зерна, град.

На рисунке 2 приведены графики изменения скоростей фильтрации воздуха от центра до стенки в двух силосах. При большей высоте слоя скорость фильтрации меньше и меньше расход воздуха. Около стенки силоса скорость воздуха одинакова для силосов различного диаметра, если в них одинаковые высоты зерновой массы и давление под

Т а б л и ц а 2
Table 2

Сравнение расчетных и экспериментальных значений потерь давления воздуха в различных зерновых культурах при вентилировании со скоростью менее 0,15 м/с
Comparison of calculated and experimental values of air pressure losses in different grain crops during ventilation with speed less than 0.15 m/s

V , м/с	Потеря давления ΔP , Па / Pressure loss ΔP , Pa		Зерновая культура / Grain crop		Толщина слоя, мм / Thickness of a layer, mm	Место измерения давления / Place of measurement of pressure
	Фактическое / Actual	Расчетное / Settlement	Наименование / Name	Влажность / Humidity		
0,033	320	310	пшеница / wheat	13,5	2 950	Перепад давления в металлическом силосе / Pressure drop in metal silo
0,027	220	233	пшеница / wheat	13,5	2 950	
0,021	160	160	пшеница / wheat	13,5	2 950	
0,038	170	174	соя / soy	7,0	3 000	
0,028	120	129	соя / soy	7,0	3 000	
0,016	70	71	соя / soy	7,0	3 000	
0,038	130	117	соя / soy	7,0	2 000	
0,028	90	86	соя / soy	7,0	2 000	
0,016	50	47	соя / soy	7,0	2 000	В нижнем слое зерна в силосе / In the lower layer of grain in silo
0,026	50	45	овес / oats	13,8	500	
0,033	1 080	1 078	пшеница / wheat	13,5	10 250	
0,027	870	808	пшеница / wheat	13,5	10 250	В нижнем слое зерна в лабораторных условиях / In the lower layer of grain in laboratory conditions
0,021	630	567	пшеница / wheat	13,5	10 250	
0,030	12	10	соя / soy	6,0	220	
0,090	39	34	соя / soy	6,0	220	
0,150	68	59	соя / soy	6,0	220	
0,030	90	91	пшеница / wheat	11,3	1 000	
0,050	193	191	пшеница / wheat	11,3	1 000	
0,060	241	248	пшеница / wheat	11,3	1 000	



Р и с. 2. Изменение скоростей воздуха на поверхности зерновой массы в силосах диаметром 12,5 м и 28,3 м при высоте зерна около стен 15 м и 20 м и давлении воздуха в нижней части насыпи 2 500 Па

Fig. 2. Air velocities on the surface of the grain mass in silo with diameter of 12.5 m and 28.3 m at grain heights near the walls of 15 m and 20 m and air pressure in the lower part of the fill of 2,500 Pa

решеткой. В силосах с большим диаметром имеется больший разброс значений скоростей фильтрации по поверхности зерновой массы.

Для установления критической скорости фильтрации в центральной части силоса требуется дополнительный объем воздуха с учетом неравномерности распределения в зерновой массе. Расход воздуха должен соответствовать средневзвешенной скорости фильтрации в силосе. Давление в нижнем слое должно соответствовать критической скорости в центральной части силоса.

Максимальное давление воздуха в нижнем слое зерна можно вычислить по формуле:

$$P = 9,81 \cdot A(H + R \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot v^n, \quad (3)$$

где H – высота вертикальной стенки силоса, мм; v – критическая скорость фильтрации, м/с.

Подставив выражение (3) в уравнение (2), получим следующую зависимость для вычисления средневзвешенной скорости фильтрации:

$$\bar{v} = \exp n^{-1} (n \cdot \ln v + \ln (H + R \cdot \operatorname{tg} \alpha) - \ln (h + R - X) \cdot \operatorname{tg} \alpha), \quad (4)$$

где X – координата средневзвешенной скорости фильтрации, мм.

$$\bar{v} = R^{-1} \int_0^R v(x) dx. \quad (5)$$

Координату средневзвешенной скорости фильтрации вычисляли, используя формулу (4) и формулу (5) для силосов диаметром от 8 до 40 м при равенстве высот зернового слоя и стенки силоса в диапазоне от 15 до 20 м. Координата практически не зависит от высоты стенки, изменяется в силосах различного диаметра. Значения координаты, полученной расчетом для силосов с различными диаметрами, представлены в таблице 3.

На рисунке 3 представлен случай возникновения самосогревания зерна в центре нижней части металлического силоса, заполненного зерном пшеницы массой около 9 000 т.

С 22 по 26 января в слое высотой до 7,0 м (пять датчиков слева направо) от днища в центре силоса (рис. 3) произошло повышение температуры. В слоях, лежащих выше, повышение температуры не наблюдалось. В слое высотой до 2,5 м от днища температура повысилась более чем на 20 °С. В слое высотой от 2,5 до 7,0 м температура повысилась более чем на 7 °С. Через трое суток 29 января произошло самосогревание в слое высотой от 7,0 до 8,5 м, температура повысилась на 40 °С. Затем в течение 1–2 суток самосогревание развилось в нижних слоях. Этот процесс в реальных условиях может развиваться скоротечно, в течение одной недели. В нагретом состоянии зерно находилось до 21 февраля, до его

выгрузки из силоса. В данном силосе осуществлялся визуальный контроль температуры по показаниям датчиков, однако исследователи поздно среагировали на повышение температуры и включили активное вентилирование. Силос был оборудован четырьмя вентиляторами с общей производительностью свыше 80 000 м³/ч. В данном случае имел место человеческий фактор.

На рисунках ниже представлены изменения относительной влажности (рис. 4), влагосодержания (рис. 5) и температуры (рис. 6) воздуха снаружи и под крышей силоса вместимостью 10 000 т за период наблюдений с 11:00 12 января до 18:00 16 января 2018 г.

Этот период характерен тем, что имеются импульсы повышения температуры, влагосодержания и относительной влажности в воздухе над зерном, а также период 100 % влажности воздуха снаружи. Из представленных данных следует, что наиболее опасными являются импульсы выброса тепла в надзерновое пространство под крышу. В кратковременные периоды повышения температуры в надзерновом пространстве (рис. 6) происходит увлажнение воздуха, достигающее 100 % (рис. 4). После прекращения выброса тепла происходит охлаждение воздуха, из которого выпадает максимальное количество конденсата. Например, с 21:00 12 января до 7:00 13 января влагосодержание в одном кубическом

Т а б л и ц а 3

Table 3

Значения координаты средневзвешенной скорости фильтрации воздуха в силосах различного диаметра

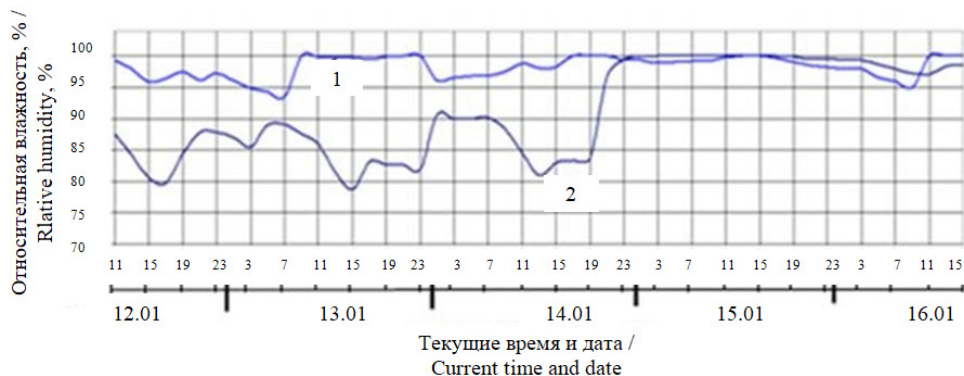
Values of coordinate of weighted average air filtration speed in silos of different diameter

Координата средневзвешенной скорости фильтрации / Weighted average filter rate coordinate	Диаметр силоса, м / Silo diameter, m			
	<10	10–20	20–30	>30
X^w	0,50R	0,55R	0,60R	0,65R

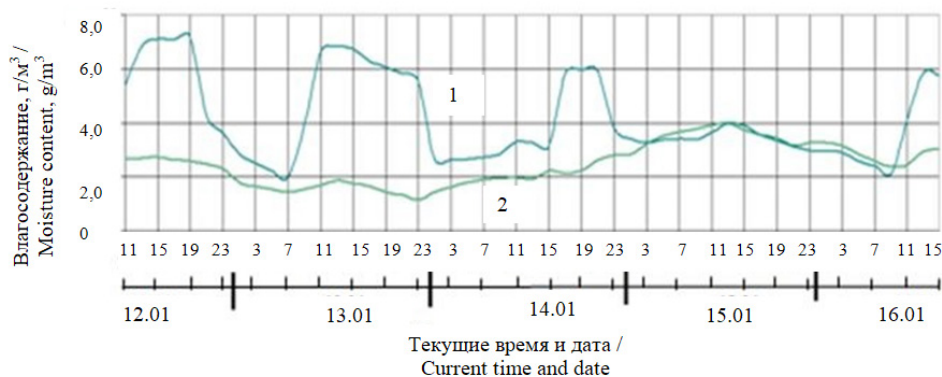
19.01.2018	-7	-2	0	2	3	7	12	14	-8
22.01.2018	-6	-4	0	1	3	6	11	13	0
26.01.2018	18	16	7	19	11	4	6	-9	
29.01.2018	-1	11	15	26	41	44	30	-5	
30.01.2018	15	19	29	41	46	30	11	-3	
31.01.2018	50	58	49	49	29	7	3	1	
01.02.2018	56	60	47	50	22	5	4	-4	
02.02.2018	59	60	58	52	39	7	1	-8	
02.02.2018	61	61	58	53	42	7	2	-3	
03.02.2018	63	64	59	54	45	8	3	-2	
05.02.2018	66	64	61	54	35	19	-5		
06.02.2018	55	56	56	37	30	8	-9		
07.02.2018	51	57	57	43	39	8	-4		
08.02.2018	44	59	59	50	43	9	-4		
09.02.2018	39	58	60	54	50	10	-6		
10.02.2018	44	51	58	52	10	-1	1		
12.02.2018	42	49	61	56	12	-9			
13.02.2018	41	51	62	57	9	-11			
14.02.2018	24	40	57	59	-11				
15.02.2018	22	40	57	59	-6				
16.02.2018	21	40	58	-4					
19.02.2018	17	40	7	-3					
20.02.2018	17	43	-4	-6					
21.02.2018	17	47	-11	-12					
22.02.2018	12	26	-13						

Р и с. 3. Самосогревание зерна пшеницы в металлическом силосе. Красным выделены температуры выше 40 °C

F i g. 3. Self-heating wheat grain in metal silo. Temperatures above 40 °C are highlighted in red



Р и с. 4. Изменение относительной влажности воздуха: 1 – над зерном; 2 – снаружи
F i g. 4. Change of relative air humidity: 1 – above grain; 2 – outside



Р и с. 5. Изменение влагосодержания воздуха: 1 – над зерном; 2 – снаружи
F i g. 5. Change of air moisture content: 1 – above grain; 2 – outside



Р и с. 6. Изменение температуры воздуха: 1 – над зерном; 2 – снаружи; 3 – в поверхностном слое на глубине около 70 мм
F i g. 6. Air temperature change: 1 – above grain; 2 – outside; 3 – in the surface layer at a depth of about 70 mm

метре воздуха над зерном уменьшилось с 7 г до 2 г (рис. 5). Можно предположить, что из одного кубического метра воздуха надзернового пространства выпало около 5 г конденсата. При 100 % влажности снаружи воздух внутри верхней части силоса имеет такие же показатели влажности, температуры и влагосодержания, как в атмосфере снаружи. В этот период воздух под крышей насыщается влагой (рис. 4), но не происходит его охлаждения (рис. 6). Поэтому образование конденсата маловероятно.

Некоторые исследователи обосновывают увлажнение поверхностного слоя наличием конвекции внутри металлических силосов. Авторы отмечают, что в результате перепадов температур между зерновой массой и атмосферой происходит процесс влагопереноса и, возможно, отпотевание и увлажнение верхнего слоя. В работе уточняется, что конвективные потоки воздуха имеют место в неветилируемых металлических силосах. Силосы для хранения зерна в верхней части и внизу соединены с атмосферой (рис. 1). В верхней части внутренний объем силоса соединен с атмосферой через кольцевой зазор между вертикальной стенкой и крышей, внизу – через вентиляционную установку. При такой конструкции силосов, имеющих высоту более 20 м, в них возможно естественное вентилирование зерна. Наличием этого процесса можно объяснить кратковременные (несколько часов) импульсы повышения температуры под крышей. По данным, представленным на рисунке 6, не наблюдается зависимости температуры над зерном от температуры снаружи. Повышение температуры над зерном до 5–8 °С (кривая 1) происходило независимо от колебаний температуры снаружи от –5 до –17 °С (кривая 2). Если бы в силосе имели место только конвективные токи, то максимальное повышение температуры над зерном можно было бы ожидать при максимальном пониже-

нии температуры снаружи. В этом случае максимальная разность температур между теплым воздухом внутри зерна и холодным воздухом снаружи. В реальном силосе такого изменения не наблюдается.

В силосе происходит эпизодическое движение воздуха снизу вверх. Вышележащие слои зерна подогреваются теплом нижних. Для понимания этого процесса интерес представляют наблюдения за температурой верхнего слоя зерна на глубине 70 мм от поверхности (рис. 6, кривая 3). В диапазоне периодов движения воздуха с 11:00 12 января до 20:00 14 января температура верхнего слоя практически не изменялась и составляла около 7 °С при наружной отрицательной – до –17 °С (рис. 6, кривая 2). В период равновесия, при равенстве температур снаружи и под крышей (отрицательных от –1 до –9 °С), наблюдается охлаждение верхнего слоя. При последующем движении воздуха вновь повышается температура верхнего слоя зерна.

В соответствии с известными физическими свойствами воздух движется через зерновую массу вследствие разности давлений в верхней и нижней частях силоса и разности температур между зерном и воздухом снаружи. Наиболее интенсивное движение воздуха вверх происходит при совпадении направлений аэродинамических сил и конвекции по аналогии с вентилированием погребов, топки печей и т. д.

Конвекция в силосе подтверждается тем обстоятельством, что воздух под крышей охлаждается не до температуры атмосферы, а на 4–5 °С выше (рис. 6, кривые 1 и 2). Такова составляющая конвекции в повышении температуры над зерном. Металлические силосы более габаритные, поэтому в них отсутствует устойчивое движение воздуха. Разность давлений внизу и вверху силоса возникает вследствие совпадения в определенном сочетании многих факторов в атмосфере. Например, дав-

ление воздуха внизу увеличивается при повышении его плотности, зависящей от абсолютного давления, влагосодержания и других факторов. Давление воздуха вверх снижается при уменьшении его плотности вследствие нагрева, а также зависит от воздействия завихрений, возникающих при обдуве ветром крыши. Завихрения могут одновременно или порознь с разных сторон силоса создавать избыточное давление или разрежение. Избыточное давление препятствует выходу воздуха из силоса, а разрежение способствует вытяжке. Характер завихрений зависит от скорости и направления ветра, аэротеней, от других зданий, расположенных на территории, и других факторов. При благоприятном совпадении вышеперечисленного происходят движение воздуха внутри силоса и изменения в надзерновом пространстве под крышей. Однако совпадения случайны, поэтому случайны и выбросы тепла из зерновой массы. Аналогичный процесс движения воздуха наблюдался в силосе вместимостью 2 000 т [12; 13]. Предусмотреть влияние всех факторов на изменения температурно-влажностных параметров воздуха внутри силоса при хранении зерна не представляется возможным.

В силосе не происходит движения воздуха при 100 % влажности снаружи. В этом случае воздух в надзерновом пространстве имеет такую же влажность и такую же максимальную плотность, как снаружи. Не имеется разности давлений воздуха между верхней и нижней частями силоса, но имеется разность температур между зерном и атмосферой. Температура внутри зерновой массы на высоте от 7 до 13 м составляла от 14 до 22 °С, а снаружи температура была отрицательная, от –1 до –9 °С. Данные графиков изменения тем-

пературы внутри зерновой массы в этом силосе опубликованы ранее³. Плотный воздух над зерном препятствует движению более теплого и легкого воздуха из глубины зерновой массы.

В таблице 4 представлены предельные значения относительной влажности воздуха, использование которого не приведет к повышению влажности зерна при вентилировании. При прохождении через зерновую массу происходит нагрев атмосферного воздуха, в котором, следовательно, уменьшается относительная влажность. Нагревается воздух до температуры зерна в конце вентилирования, значение которой вычислялось по следующей формуле [13]:

$$T_{\kappa} = 0,3 \cdot T_3 + 0,7 \cdot t,$$

где T_{κ} – конечная температура зерна после охлаждения, °С; T_3 – начальная температура зерна, °С; t – температура наружного воздуха, °С.

Равновесная влажность зерна, которая устанавливается по окончании вентилирования, не должна превышать исходную влажность. Для зерна с заданными параметрами в конце вентилирования в таблице 4 определялась максимально допустимая относительная влажность воздуха в силосе по таблице равновесной влажности. Предельная влажность наружного воздуха вычислялась по общеизвестным формулам пересчетом влажности воздуха внутри силоса для более низких температур снаружи.

Например, при вентилировании зерна пшеницы, имеющей температуру 15 °С и влажность 12 %, воздухом с температурой 0 °С и относительной влажностью 60 % произойдет снижение температуры зерна и повышение температуры воздуха до 5 °С. Такое повышение температуры в силосе снизит

³ Разворотнев А. С., Гавриченко Ю. Д. Изменение температуры внутри зерновой массы пшеницы при хранении в металлическом силосе большой вместимости // Сборник трудов к 90-летию ВНИИЗ. М., 2019. С. 166–170.

Предельные значения относительной влажности атмосферного воздуха для охлаждения зерна различной влажностью в металлическом силосе

Limit values of relative humidity of atmospheric air for grain cooling with different humidity in metal silo

Температура атмосферного воздуха, °C / Atmospheric air temperature, °C	Температура зерна, °C / Temperature of grain, °C		Влажность зерна / Humidity of grain					
			< 12 %		12–13 %		13–14 %	
	Начальная / Initial	Конечная / Final	Пшеница / Wheat	Ячмень / Barley	Пшеница / Wheat	Ячмень / Barley	Пшеница / Wheat	Ячмень / Barley
–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

влажность атмосферного воздуха до 45 %, при которой равновесная влажность зерна не превысит исходную.

Обсуждение и заключение

Выполнить безопасное активное вентилирование зерна возможно при различных вариантах технологии.

В первом варианте для каждой зерновой культуры и габаритных размеров силоса необходим вентилятор, аэродинамическая характеристика которого соответствует аэродинамике зерновой культуры, заложенной на хранение. Такая технологическая схе-

ма создает ряд неудобств в эксплуатации и повышает капитальные и текущие затраты. Неудобства заключаются в том, что в процессе подготовки зернохранилищ к приемке нового урожая не представляется возможным прогнозировать номенклатуру и количество по каждой зерновой культуре. Капитальные затраты на приобретение дополнительного вентиляционного оборудования и текущие на приобретение запасных частей более широкой номенклатуры увеличатся.

Во втором варианте на каждый силос устанавливаются одинаковые вентиляторы, обеспечивающие безопасное вентилирование зерновой культуры, имеющей аэродинамическую характеристику с максимальными параметрами. Для вентилирования зерна с меньшими аэродинамическими параметрами дросселируют воздуховоды от вентилятора. Этот вариант имеет повышенные затраты электроэнергии, которые возрастут в несколько раз. Использовать такую технологию в практике нецелесообразно.

В третьем варианте предлагается технология подготовки воздуха (охлаждение, подсушивание), нагнетаемого в зерновую массу, до кондиций, исключающей образование конденсата [16–18]. Эта технология энергоемка и ее целесообразно использовать во влажном и жарком климате.

Авторы предлагают вариант – регулировать количество нагнетаемого воздуха изменением массы вентилируемого зерна. Этот способ не требует затрат, но требует знаний по управлению воздушным потоком. Чем меньше масса зерна, тем больше расход воздуха. Устанавливается объем воздуха, при котором в наиболее нагруженной центральной части силоса обеспечивается критическая скорость фильтрации.

Предлагаемая технология активного вентилирования зерна в метал-

лических силосах заключается в следующем:

1. Металлические силосы оборудуют контрольно-измерительным прибором давления воздуха. Снаружи, как показано на рисунке 1, устанавливают дифманометр, например ДНМП, для измерения перепада давления воздуха в слое зерна толщиной 3 м. Нижняя точка отбора давления расположена на расстоянии не менее 1 м от днища силоса.

2. По таблице 4 определяются предельные параметры наружного воздуха для вентилирования зерна. При достижении этих параметров в окружающем воздухе вентилируется зерновая масса. Если требуется вентилирование воздухом, имеющим относительную влажность больше предельно допустимого значения в таблице 4, то возможно оценить повышение влажности зерна по следующей формуле:

$$\Delta W = 5 \cdot 10^{-4} \cdot (\varphi_{\phi} - \varphi_{\text{д}}) \cdot \Delta T \cdot e^{0,07t},$$

где ΔW – приращение влажности зерна, %; φ_{ϕ} – фактическая относительная влажность атмосферного воздуха, %; $\varphi_{\text{д}}$ – допустимая относительная влажность (из таблицы 4), %; ΔT – разность температур зерна и атмосферного воздуха, °C; t – температура атмосферного воздуха, °C.

Допускается повышение влажности в пределах погрешности измерения, не более 0,5 %.

3. Вычисляется по формуле (4) значение средневзвешенной скорости фильтрации воздуха. Затем – перепад давления в слое толщиной 3 м по следующей формуле:

$$\Delta P = 29\,430 \cdot A \cdot \bar{v}^n, \quad (7)$$

где ΔP – перепад давления воздуха в слое толщиной 3 м, Па.

4. Вентилятор включается вручную. Если перепад давления на дифмано-

метре покажет значение меньше вычисленного по формуле (7), то уменьшается масса зерна в силосе. Зерно выгружается в оперативную емкость (предусмотренную в технологической схеме) или в свободный силос до тех пор, пока показание на дифманометре не совпадет с вычисленным значением. В этом случае в зерновую массу будет подаваться объем воздуха, обеспечивающий критическую скорость фильтрации в центральной части силоса и гарантированный вынос влаги за его пределы.

5. При опасности возникновения самосогревания зерновой массы ее вентилирование осуществляется при любых погодных условиях. Учитывая ранее рассмотренный случай самосогревания, и с целью исключения человеческого фактора целесообразно систему мониторинга температуры внутри зерновой массы оборудовать сигнализацией или устройством автоматического включения вентиляторов. Эти устройства должны включаться при повышении температуры на 7°C и более в течение 2–3 суток на двух и более датчиках.

Технология вентилирования надзернового пространства заключается в определении времени включения осевых (под крышей) вентиляторов и продолжительности их работы. Вентилирование в надзерновом пространстве необходимо осуществлять в периоды насыщения влагой воздуха. Включение вентиляторов позволит не только исключить конденсат, но интенсифицировать процесс охлаждения и снизить затраты. Мощность осевого вентилятора не более 1,5 кВт, мощность венти-

лятора для активного вентилирования не менее 18 кВт. Количество осевых вентиляторов, как правило, равно количеству нагнетающих.

Согласно результатам исследований, приведенным выше, максимальное насыщение воздуха влагой происходит в периоды повышения температуры над зерном. Вентиляторы должны включаться и выключаться автоматически при достижении следующих соотношений температур внутри силоса и снаружи.

1. Включаются вентиляторы при превышении температуры внутри силоса относительно температуры снаружи не менее чем на 7°C .

2. Выключаются вентиляторы при установлении разности температур не более 4°C .

Для внедрения технологий управления воздушными потоками внутри металлических силосов требуется выполнить дополнительно следующие исследования и разработки.

1. Исследовать процесс сорбции и десорбции зерном влаги в динамическом режиме вентилирования при скоростях фильтрации воздуха не более 0,05 м/с. Имеются данные единичных опытов в этом диапазоне скоростей воздуха⁴ [19].

2. Экспериментально определить минимальную скорость фильтрации, обеспечивающую гарантированный унос влаги из надзернового пространства (критическую скорость).

3. Разработать и испытать в производственных условиях блок управления осевыми (крышными) вентиляторами.

⁴ Сорочинский В. Ф. Кинетика охлаждения зерна после сушки на установках активного вентилирования // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей первых Международных Лыковских научных чтений (22–23 сентября 2015 г.). Курск: Университетская книга, 2015. С. 230–235.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Фейденгольд, В. Б.** Потребность России в зернохранилищах. Экспертная оценка / В. Б. Фейденгольд. – DOI 10.25741/2413-287X-2019-06-2-071 // Комбикорма. – 2019. – № 6. – С. 82–86. – URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/06_19/06_2019_30-34.pdf (дата обращения: 20.04.2020). – Рез. англ.
2. **Kumar, D.** Reducing Postharvest Losses during Storage of Grain Crops to Strengthen Food Security in Developing Countries / D. Kumar, P. Kalita. – DOI 10.3390/foods6010008 // Foods. – 2017. – Vol. 6, Issue 8. – Pp. 1–22. – URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/6/1/8> (дата обращения: 20.04.2020).
3. **Carrera-Rodríguez, M.** Transient Numerical Study of the Effect of Ambient Temperature on 2-D Cereal Grain Storage in Cylindrical Silos / M. Carrera-Rodríguez, G. M. Martínez-González, J. L. Navarrete-Bolaños. – DOI 10.1016/j.jspr.2011.01.006 // Journal of Stored Products Research. – 2011. – Vol. 47, Issue 2. – Pp. 106–122. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X11000166?via%3Dihub> (дата обращения: 20.04.2020).
4. **Hammami, F.** Modelling and Simulation of Heat Exchange and Moisture Content in a Cereal Storage Silo / F. Hammami, S. B. Mabrouk, A. Mami. – DOI 10.1080/13873954.2016.1157823 // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. – 2016. – Vol. 22, Issue 3. – Pp. 207–220. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13873954.2016.1157823> (дата обращения: 20.04.2020).
5. **Patent No. 8720079 USA, B2.** Modular Aeration Assembly for Grain Bins : No. 20120047762 : appl. 26.08.2010 : publ. 13.05.2014 / Neufeld J., Thiessen B. ; assignee Woodhaven Capital Corp. – URL: <https://patents.justia.com/patent/8720079> (дата обращения: 20.04.2020).
6. **Chen, S.** The Experimental Research on Grain Storage Heat and Moisture Transfer / S. Chen, W. Wu, Y. Xu [et al.] // International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2015). – 2015. – Pp. 28–33. – URL: https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=The+Experimental+Research+on+Grain+Storage+Heat+and+Moisture+Transfer+&btnG= (дата обращения: 20.04.2020).
7. **Olatunde, G.** CFD Modeling of Air Flow Distribution in Rice Bin Storage System with Different Grain Mass Configurations / G. Olatunde, G. G. Atungulu, S. Sadaka. – DOI 10.1016/j.biosystemseng.2016.09.007 // Biosystems Engineering. – 2016. – Vol. 151. – Pp. 286–297. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511016301507?via%3Dihub> (дата обращения: 20.04.2020).
8. **Binelo, M. O.** Airflow Simulation and Inlet Pressure Profile Optimization of a Grain Storage Bin Aeration System / M. O. Binelo, V. Faoro, O. A. Kathatourian [et al.]. – DOI 10.1016/j.compag.2019.104923 // Computers and Electronics in Agriculture. – 2019. – Vol. 164. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919307483?via%3Dihub> (дата обращения: 20.04.2020).
9. **Разворотнев, А. С.** Оценка эффективности металлических силосов по удельным расходам электроэнергии на вентилирование зерна различных культур / А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченко. – DOI 10.32462/0235-2508-2018-0-10-53-55 // Хлебопродукты. – 2018. – № 10. – С. 53–55. – URL: <https://www.khlebpod.ru/293-zhurnaly-2018/10-18/3492-otsenka-effektivnosti-metallicheskich-silosov-po-udelnyim-raskhodam-elektroenergii-na-ventilirovanie-zerna-razlichnykh-kultur> (дата обращения: 20.04.2020).
10. **Lopes, D. C.** Comparison of Equilibrium Models for Grain Aeration / D. C. Lopes, A. J. S. Neto, R. V. Júnior. – DOI 10.1016/j.jspr.2014.11.001 // Journal of Stored Products Research. – 2015. – Vol. 60. – Pp. 11–18. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X14001143> (дата обращения: 20.04.2020).
11. **Panigrahi, S. S.** Effect of Mediterranean Climatic Condition during Aeration and Silo Wall Coating in On-Farm Grain Storage in South Australia / S. S. Panigrahi, Ch. B. Singh, J. M. Fielke. – DOI 10.13031/aim.201900976 // American Society of Agricultural and Biological Engineers. – 2019. – URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=50535> (дата обращения: 20.04.2020).
12. **Разворотнев, А. С.** Управление воздушными потоками внутри металлического силоса при хранении зерна / А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченко. – DOI 10.32462/0235-2508-2019-28-11-60-63 // Хлебопродукты. – 2019. – № 11. – С. 60–63. – URL: <https://khlebpod.ru/329-zhurnaly-2019->



года/11-19/3995-upravlenie-vozdushnymi-potokami-vnutri-metallicheskogo-silosa-pri-khranении-zerna (дата обращения: 20.04.2020). – Рез. англ.

13. **Разворотнев, А. С.** Режимы хранения и вентилирования зерна пшеницы в металлических силосах большой вместимости / А. С. Разворотнев, Ю. Д. Гавриченко, И. А. Кечкин // Хлебопродукты. – 2017. – № 11. – С. 57–59. – URL: <https://khlebprod.ru/260-zhurnaly-2017/11-17/3032-rezhimy-khraneniya-i-ventilirovaniya-zerna-pshenitsy-v-metallicheskih-silosakh-bolshoj-vmestimosti> (дата обращения: 20.04.2020). – Рез. англ.

14. **Gavrichenkov, Yu. D.** Change of the Acid Number of Wheat Grain Fat While Stored in Laboratory Conditions / Yu. D. Gavrichenkov, A. S. Razvorotnev, I. A. Kechkin [et al.]. – DOI 10.21323/2618-9771-2019-2-2-27-30 // Food Systems. – 2019. – Vol. 2, Issue 2. – Pp. 27–30. – URL: <https://www.fs-jour.com/jour/article/view/38> (дата обращения: 20.04.2020).

15. **Navarro, Sh.** The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management / Sh. Navarro, R. T. Noyes. – Boca Raton : CRC Press, 2001. – 672 p.

16. **Francisco, N.-M.** Simulation of the Temperature of Barley during Its Storage in Cylindrical Silos / N.-M. Francisco. – DOI 10.1016/j.matcom.2018.09.004 // Mathematics and Computers in Simulation. – 2019. – Vol. 157. – Pp. 1–14. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378475418302143> (дата обращения: 20.04.2020).

17. **Patent No. 9885520 USA, B1.** Grain Conditioning System and Methodology : appl. 03.08.2016 : publ. 06.02.2018 / Abbasi Sh. ; assignee Agplexus LLC. – URL: <https://patents.google.com/patent/US9885520B1/en> (дата обращения: 20.04.2020).

18. **Bradna, J.** The Impact of Weather Conditions on Microclimate in Storage Facilities / J. Bradna, J. Šimon, D. Hájek [et al.]. – DOI 10.15159/AR.18.178 // Agronomy Research. – 2018. – Vol. 16, Issue 4. – Pp. 1580–1589. – URL: <https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/4418> (дата обращения: 20.04.2020).

19. **Сорочинский, В. Ф.** Изменение температуры пристенного слоя зерна в металлических элеваторах / В. Ф. Сорочинский // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2016. – № 4. – С. 13–16. – URL: <https://vniiz.org/science/publication/article-151> (дата обращения: 20.04.2020).

Поступила 09.10.2019; принята к публикации 06.12.2019; опубликована онлайн 30.06.2020

Об авторах:

Разворотнев Александр Сергеевич, старший научный сотрудник ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки» (127434, Россия, г. Москва, Дмитровское ш., д. 11), кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: AAN-1423-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3957-041X>, razvorotnev.ac@gmail.com

Гавриченко Юрий Дмитриевич, старший научный сотрудник ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки» (127434, Россия, г. Москва, Дмитровское ш., д. 11), кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: AAG-8142-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5590-8997>, gavrud@bk.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. С. Разворотнев – анализ литературных данных, редактирование текста; Ю. Д. Гавриченко – анализ литературных данных, постановка задачи исследования, обработка данных, написание текста статьи.

Благодарности: Авторы выражают благодарность доктору технических наук В. Ф. Сорочинскому за оказанную помощь в выборе направления исследований и главному технологу ЗАО «БиоТехнологии» Г. Д. Диковой за помощь в проведении исследований в производственных условиях.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Feydengold V.B. Russia's Need for Grain Storage Facilities. Expert Assessment. *Kombikorma* = Compound Feeds. 2019; (6):82-86. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25741/2413-287X-2019-06-2-071>
2. Kumar D., Kalita P. Reducing Postharvest Losses during Storage of Grain Crops to Strengthen Food Security in Developing Countries. *Foods*. 2017; 6(8):1-22. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/foods6010008>
3. Carrera-Rodríguez M., Martínez-González G.M., Navarrete-Bolaños J.L. Transient Numerical Study of the Effect of Ambient Temperature on 2-D Cereal Grain Storage in Cylindrical Silos. *Journal of Stored Products Research*. 2011; 47(2):106-122. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2011.01.006>
4. Hammami F., Mabrouk S.B., Mami A. Modelling and Simulation of Heat Exchange and Moisture Content in a Cereal Storage Silo. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2016; 22(3):207-220. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/13873954.2016.1157823>
5. Modular Aeration Assembly for Grain Bins: Patent 8720079 USA. No. 20120047762; appl. 26.08.2010; publ. 13.05.2014. Available at: <https://patents.justia.com/patent/8720079> (accessed 20.04.2020). (In Eng.)
6. Chen S., Wu W., Xu Y., et al. The Experimental Research on Grain Storage Heat and Moisture Transfer. In: International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2015). 2015. Pp. 28-33. Available at: https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=The+Experimental+Research+on+Grain+Storage+Heat+and+Moisture+Transfer+&btnG= (accessed 20.04.2020). (In Eng.)
7. Olatunde G., Atungulu G.G., Sadaka S. CFD Modeling of Air Flow Distribution in Rice Bin Storage System with Different Grain Mass Configurations. *Biosystems Engineering*. 2016; 151:286-297. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.09.007>
8. Binelo M.O., Faoro V., Kathatourian O.A., et al. Airflow Simulation and Inlet Pressure Profile Optimization of a Grain Storage Bin Aeration System. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019; 164. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104923>
9. Razvorotnev A.S., Gavrichenkov Yu.D. Evaluation of Metal Silos Efficiency in Terms of Specific Power Consumption for Grain Ventilation of Different Crops. *Khleboпродукты* = Bakery Products; 2018; (10):53-55. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2018-0-10-53-55>
10. Lopes D.C., Neto A.J.S., Júnior R.V. Comparison of Equilibrium Models for Grain Aeration. *Journal of Stored Products Research*. 2015; 60:11-18. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2014.11.001>
11. Panigrahi S.S., Singh Ch.B., Fielke J.M. Effect of Mediterranean Climatic Condition during Aeration and Silo Wall Coating in On-Farm Grain Storage in South Australia. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2019. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13031/aim.201900976>
12. Razvorotnev A.S., Gavrichenkov Yu.D. Air Flow Control inside the Metal Silo during Grain Storage. *Khleboпродукты* = Bakery Products. 2019; (11):60-63. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2019-28-11-60-63>
13. Razvorotnev A.S., Gavrichenkov Yu.D., Kechkin I.A. Modes of Storage and Ventilation of Wheat Grain in Metal Silos of Large Capacity. *Khleboпродукты* = Bakery Products. 2017; (11):57-59. Available at: <https://khlebpod.ru/260-zhurnaly-2017/11-17/3032-rezhimy-khraneniya-i-ventilirovaniya-zerna-pshenitsy-v-metallicheskih-silosakh-bolshoj-vmestimosti> (accessed 20.04.2020). (In Russ.)
14. Gavrichenkov Yu.D., Razvorotnev A.S., Kechkin I.A., et al. Change of the Acid Number of Wheat Grain Fat While Stored in Laboratory Conditions. *Food Systems*. 2019; 2(2):27-30. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-2-27-30>
15. Navarro Sh., Noyes R.T. The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management. Boca Raton: CRC Press; 2001. 672 p. (In Eng.)
16. Francisco N.-M. Simulation of the Temperature of Barley during Its Storage in Cylindrical Silos. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2019; 157:1-14. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.09.004>



17. Grain Conditioning System and Methodology: Patent 9885520 USA. Appl. 03.08.2016; publ. 06.02.2018. Available at: <https://patents.google.com/patent/US9885520B1/en> (accessed 20.04.2020). (In Eng.)

18. Bradna J., Šimon J., Hájek D., et al. The Impact of Weather Conditions on Microclimate in Storage Facilities. *Agronomy Research*. 2018; 16(4):1580-1589. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.18.178>

19. Sorochinskiy V.F. Change of Temperature of the Wall Layer of Grain in Metal Elevators. *Khranenie i pererabotka sel'hozsyrya* = Storage and Processing of Farm Products. 2016; (4):13-16. Available at: <https://vniiz.org/science/publication/article-151> (accessed 20.04.2020). (In Russ.)

Received 09.10.2019; revised 06.12.2019; published online 30.06.2020

About the authors:

Alexandr S. Razvorotnev, Senior Researcher of All-Russian Research Institute of Grain and Its Processing Products (11 Dmitrovskoye Shosse, Moscow 127434, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: AAH-1423-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3957-041X>, razvorotnev.ac@gmail.com

Yuri D. Gavrichenkov, Senior Researcher of All-Russian Research Institute of Grain and Its Processing Products (11 Dmitrovskoye Shosse, Moscow 127434, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: AAG-8142-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5590-8997>, gavrud@bk.ru

Contribution of the authors:

A. S. Razvorotnev – literature analysis, text editing; Yu. D. Gavrichenkov – literary data analysis, scientific guidance, data processing, article writing.

Acknowledgements: The authors would like to thank V. F. Sorochinskiy, D.Sc. in Engineering, for his assistance in choosing the research direction and the Chief Technologist of the BioTechnologies company G. D. Dikova for her help in conducting research in industrial conditions.

All authors have read and approved the final manuscript.