

Теплотехническая эффективность рециркуляции агента сушки при подмешивании свежего воздуха

М. С. Волхонов¹, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технические системы в АПК», ректор

Р. М. Коваленко¹, аспирант кафедры «Технические системы в АПК», делопроизводитель управления воспитательной и социальной работы

И. Б. Зимин², кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили, трактора и сельскохозяйственных машины»

¹ФГБОУ ВО Костромская ГСХА

156530, Костромская область, Костромской район, пос. Караваяево, Учебный городок, д. 34

✉ kovalenko.rodion@mail.ru

²ФГБОУ ВО Великолукская ГСХА

182112, Псковская область, г. Великие Луки, пр. Ленина, д. 2

Резюме. Работа посвящена изучению влияния циклов повторного использования теплоты отработавшего агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха на интегральный расход энергии на испарение влаги из зерна. Исследована работа тепловентиляционной системы конвективной зерновой сушилки при рециркуляции теплоты отработавшего агента сушки без подмешивания и с частичным подмешиванием свежего воздуха. Для определения контрольных параметров на выходе из сушильной камеры, необходимых для удержания тепловентиляционной системы в рациональном режиме, на H-d диаграмме была смоделирована работа тепловентиляционной системы с подмешиванием 10 % и 20 % свежего воздуха, а также выполнен теоретический расчет энергоэффективности сушки зерна. Результаты теоретического анализа указывают на повышение энтальпии и эффективности повторного использования теплоты отработавшего агента сушки при подмешивании 10...20 % свежего воздуха. Интегральный расход энергии на испарение влаги из зерна снижается при увеличении количества циклов повторного использования теплоты отработавшего агента сушки от двух до пяти. Наилучшее использование теплоты агента сушки для испарения влаги из зерна со снижением интегрального расхода энергии до 14,1 % наблюдается при температуре агента сушки 70 °С и двух-, трехкратном его использовании. При температуре агента сушки 100 °С четырех-, пятикратное использование теплоты отработавшего агента сушки снижает интегральный расход энергии на 17,9 %. Определены контрольные параметры агента сушки на выходе из сушильной камеры, необходимые для удержания тепловентиляционной системы в рациональном режиме: при нагреве агента сушки в теплогенераторе до 70 °С с подмешиванием 10 % свежего воздуха - относительная влажность 70 %, температура – 39...43°С; при нагреве агента сушки в теплогенераторе до 100 °С – относительная влажность 70 %, температура – 55...58 °С. В процессе повторного использования агента сушки с температурой 40...100 °С с частичным подмешиванием свежего воздуха происходит его дополнительное увлажнение без опасности конденсации влаги в камере сушки, так как температура точки росы ниже температуры отработавшего агента сушки на 5,7...7,1 °С.

Ключевые слова: рециркуляция агента сушки, повторное использование агента сушки, сушка зерна, сушка.

Для цитирования: Волхонов М. С., Коваленко Р. М., Зимин И. Б. Теплотехническая эффективность рециркуляции агента сушки при подмешивании свежего воздуха // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. №1 (69). С. 171-178. doi:10.18286/1816-4501-2025-1-171-178

Thermal efficiency of drying agent recirculation in case of fresh air mixing

M. S. Volkhonov¹, R. M. Kovalenko¹, I. B. Zimin²

¹ FSBEI HE Kostroma State Agricultural Academy

156530, Kostroma region, Kostroma district, Karavaevo settlement, Uchebnyi Gorodok, 34

✉ kovalenko.rodion@mail.ru

² FSBEI HE Velikiye Luki State Agricultural Academy

182112, Pskov region, Velikiye Luki, Lenin Ave., 2

Abstract. The work is devoted to studying the influence of cycles of repeated use of the heat of the spent drying agent with partial mixing of fresh air on integral energy consumption for moisture evaporation from grain. The work of the heat and ventilation system of a convective grain dryer with recirculation of the heat of the spent drying agent without mixing and with partial mixing of fresh air was conducted. To determine the control parameters at the outlet of the

drying chamber, necessary for maintaining the heat and ventilation system in a rational mode, the work of the heat and ventilation system with mixing of 10, 20% of fresh air was simulated on the H-d diagram, and a theoretical calculation of the energy efficiency of grain drying was carried out. The results of the theoretical analysis indicate an increase in the enthalpy and efficiency of reusing the heat of the spent drying agent with mixing of 10 ... 20% of fresh air. The integral energy consumption for evaporation of moisture from grain decreases with an increase in the number of cycles of reusing the heat of the spent drying agent from two to five. The best usage of the drying agent heat for evaporation of moisture from grain with a decrease in the integral energy consumption to 14.1% is observed at a drying agent temperature of 70 °C and its two-threefold use. At a drying agent temperature of 100 °C, four- or five-fold use of the spent drying agent heat reduces the integral energy consumption by 17.9%. The control parameters at the outlet of the drying chamber necessary for maintaining the heat and ventilation system in a rational mode were determined: when heating the drying agent in the heat generator to 70 °C with admixture of 10% of fresh air, the relative humidity is 70%, the temperature is 39 ... 43 °C; when heating the drying agent in the heat generator to 100 °C - relative humidity is 70%, temperature is 55 ... 58 °C. In the process of reusing the drying agent at a temperature of 40...100 °C with partial mixing of fresh air, its additional humidification occurs without the risk of moisture condensation in the drying chamber, since the dew point temperature is lower than the temperature of the spent drying agent by 5.7...7.1 °C.

Keywords: drying agent recirculation, drying agent reuse, grain drying, drying.

For citation: Volkhonov M. S., Kovalenko R. M., Zimin I. B. Thermal efficiency of drying agent recirculation in case of fresh air mixing // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2025;1(69): 171-178 doi:10.18286/1816-4501-2025-1-171-178

Введение

Зерно является одним из основных сельскохозяйственных продуктов, и увеличение его производства было и остается ключевой проблемой развития сельского хозяйства [1, 2, 3]

Сушка – основная и наиболее сложная технологическая операция послеуборочной обработки зерна [4, 5]. Во всей технологической цепочке послеуборочная обработка зерна занимает лидирующие позиции по ресурсоемкости процесса. Затраты топлива на нее могут достигать 50 %, электроэнергии - до 98 % и 15...20 % - эксплуатационных затрат от всего количества [6, 7].

Частичная рециркуляция отработавшего агента сушки и охлаждающего воздуха обеспечивает экономию топлива в размере 5...10 % [8]. Сравнительные исследования путей экономии теплоты при различных способах сушки [9] показывают, что утилизация теплоты отработавшего теплоносителя позволяет экономить 10 % энергии; 2...3 % экономии теплоты можно достичь от теплоизоляции, герметизации; 20 % – при отказе от теплообменников. Автоматизация процесса сушки обеспечивает дополнительное снижение энергоемкости процесса на 3...5 %.

Известно, что использование остаточного тепла отработанного воздуха способствует повышению эффективности процесса сушки [10], так как тепловой потенциал отработавшего агента сушки, выбрасываясь в атмосферу, не используется в полной мере. На сегодняшний день в российском и зарубежном зерносушении известен опыт повторного использования теплоты отработавшего агента сушки [11, 12]. Исследователи [13, 14, 15] отмечают, что до 60 % всех непроизводительных затрат теплоты в зерносушилках могут быть компенсированы за счет утилизации теплоты отработавшего теплоносителя и охлаждающего воздуха.

Несмотря на большое количество научно-исследовательских работ [17, 18, 19, 20], в которых рассматриваются вопросы снижения энергоемкости процесса сушки зерна путем рециркуляции теплоты отработавшего агента сушки, полученные в них

данные не отражают пределы возможного использования теплоты отработавшего агента сушки с различным влагосодержанием и недостаточно изучено подмешивание к нему свежего воздуха.

Цель исследования – определение наиболее эффективных режимов повторного использования теплоты агента сушки с подмешиванием свежего воздуха для снижения энергозатрат на сушку зерна.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- на диаграмме тепловлажностного состояния воздуха смоделировать режимы работы тепловентиляционной системы с повторным использованием теплоты отработавшего агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха и без подмешивания;

- определить режимы и параметры контроля работы тепловентиляционной системы с наименьшим интегральным расходом энергии на конвективную сушку зерна, исключающие конденсацию влаги в сушильной камере.

Материалы и методы

Для обоснованного выбора рациональных режимов работы тепловентиляционной системы при конвективной сушке зерна нами разработаны модели ее работы при повторном использовании теплоты отработавшего агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха.

Схемы режимов работы тепловентиляционной системы приведены на рисунках 1 – 3.

Для рисунков 1...3 приняты следующие условные обозначения:

t_0, t_1, t_2 – соответственно температура наружного воздуха, агента сушки после нагрева в теплогенераторе, агента сушки после пропуска через зерно, °C;

$\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$ – соответственно относительная влажность наружного воздуха, агента сушки после подогрева в теплогенераторе, агента сушки после пропуска через зерно в режиме полной смены агента сушки, агента сушки при рециркуляции без подмешивания наружного воздуха после

пропуска через теплогенератор, агента сушки после второго пропуска через зерно, агента сушки при подмешивании наружного воздуха и нагреве в теплогенераторе, агента сушки после третьего пропуска через зерно, %;

d_0, d_1, d_2, d_3 – соответственно влагосодержание наружного воздуха, наружного воздуха после подогрева в теплогенераторе, агента сушки после первого пропуска через зерно в режиме полной смены агента, агента сушки при рециркуляции без подмешивания наружного воздуха после пропуска через теплогенератор, г/кг с.в.;

$H_0, H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$ – соответственно энтальпия наружного воздуха, агента сушки после подогрева в теплогенераторе, агента сушки после первого пропуска через зерно в режиме полной смены агента, агента сушки при рециркуляции без подмешивания наружного воздуха после пропуска через теплогенератор, агента сушки после второго пропуска через зерно, агента сушки при подмешивании наружного воздуха и нагреве в теплогенераторе, агента сушки после третьего пропуска через зерно, кДж/кг;

ω_k, τ_k – соответственно влажность, %, и температура зерна, °С.

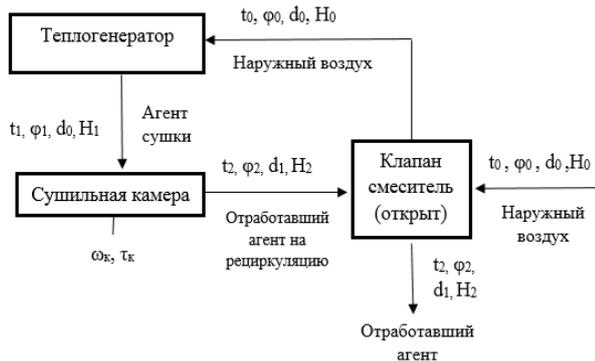


Рис. 1. Схема работы тепловентиляционной системы при полной смене агента сушки

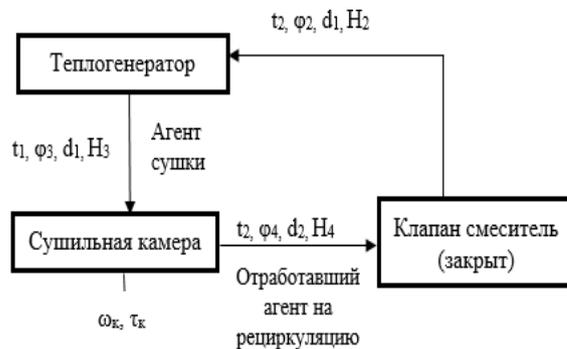


Рис. 2. Схема работы тепловентиляционной системы при рециркуляции агента сушки

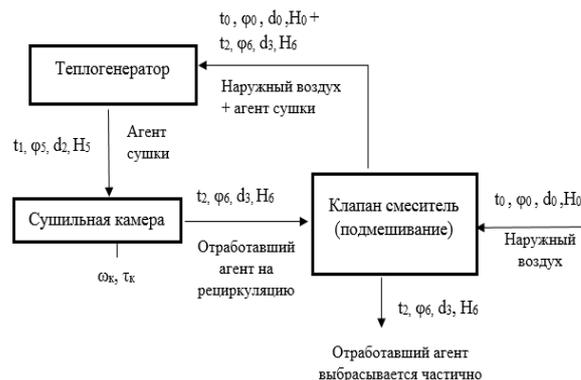


Рис. 3. Схема работы тепловентиляционной системы при рециркуляции агента сушки с подмешиванием наружного воздуха

На H-d диаграмме смоделировали по пять циклов повторного использования теплоты отработавшего агента сушки: 1 цикл – исходные значения без подмешивания свежего воздуха, остальные 4 – при рециркуляции агента сушки, нагретого до 70 °С с подмешиванием 10 % свежего воздуха (рис. 4). Были сделаны следующие допущения: агент сушки увлажняется до 70 %; потери в окружающую среду отсутствуют – теоретический процесс. Исходные данные для расчета указаны в таблице.

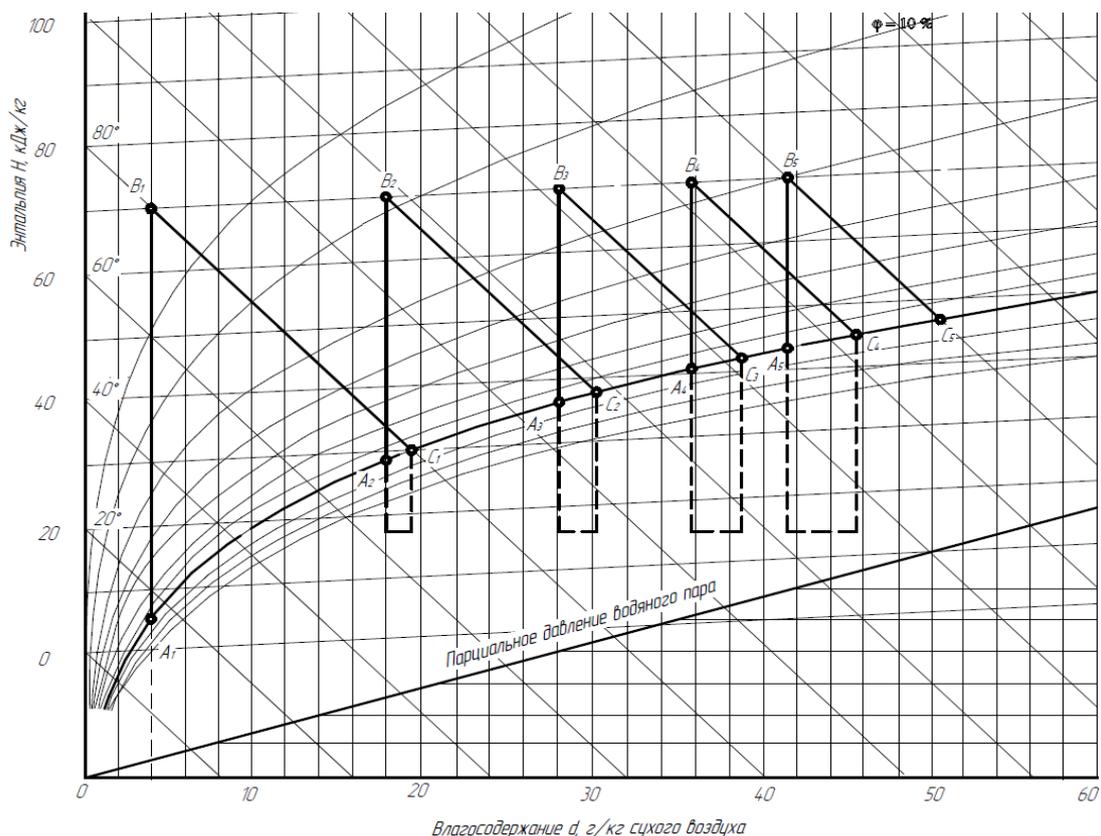
Таблица. Исходные данные для расчета аэрожелобной сушилки для продовольственного зерна

Наименование	Величина	Источник информации
Производительность по сырому зерну, G1, кг/ч	1000	Принято условно
Время сушки, τ, ч.	1	Рекомендации
Влажность сырого зерна, w_1 , %	20	Статистика
Влажность зерна на выходе из сушильной камеры, w_2 , %	14	Рекомендации
Температура окружающего воздуха, t_0 , °С	5	ГОСТ Р 55262-2012
Температура агента сушки, t_1 , °С	40, 70, 100	Принято условно
Относительная влажность наружного воздуха, φ_0 , %	70	Метеоданные
Относительная влажность отработавшего агента сушки, φ_2 , %	70	Рекомендации

По H-d диаграмме определяли входные и выходные параметры в каждом i-ом цикле.

Первый цикл повторного использования теплоты отработавшего агента сушки – без подмешивания. Входные параметры, точка A1: $d_0 = 4$ г/кг с.в.; $H_0 = 15,91$ кДж/кг с.в.; далее следует нагрев

наружного воздуха до $t_1 = 70$ °С, при $d = const$, точка B1: $d_1 = 4$ г/кг с.в.; $H_1 = 81,22$ кДж/кг с.в. Сушка – испарение в теоретическом процессе происходит до $\varphi_2 = 70$ %, при $H = const$. Выходные параметры, точка C1: $d_2 = 19,64$ г/кг с.в.; $H_2 = 81,22$ кДж/кг с.в.



Точки $A_2 - A_5$ - начальные параметры цикла при постоянном подмешивании 10 % свежего воздуха

Рис. 4. Модель работы тепловентиляционной системы в режиме рециркуляции агента сушки при подмешивании 10 % свежего воздуха

Второй цикл повторного использования теплоты отработавшего агента – подмешивание свежего воздуха. Значения точки A_2 : начальные d_3 и H_3 смеси определяли по известным зависимостям:

$$d_3 = \frac{G_{c1} \cdot d_1 + G_{c2} \cdot d_2}{G_{c1} + G_{c2}} \quad 1$$

$$H_3 = \frac{G_{c1} \cdot H_1 + G_{c2} \cdot H_2}{G_{c1} + G_{c2}} \quad 2$$

где G_c – количество сухого воздуха, кг.

Исходя из известных значений влагосодержания и энтальпии, вместо количества сухого воздуха использовали его процентное соотношение. Входные параметры, точка A_2 : $d_0 = 18,08$ г/кг с.в.; энтальпия $H_0 = 75,76$ кДж/кг с.в.; далее следует нагрев смеси отработавшего агента сушки с наружным воздухом до температуры $t_1 = 70$ °C при $d = const$; точка B_2 : $d_1 = 18,08$ г/кг с.в.; $H_1 = 118,27$ кДж/кг с.в. Сушка - испарение в теоретическом процессе при $H = const$ до относительной влажности $\varphi_2 = 70$ % . Выходные параметры, точка C_2 : $d_2 = 30,87$ г/ кг с.в;

$$H_0 = 118,27 \text{ кДж/кг с.в.}$$

По аналогии рассчитали остальные три цикла для нагрева агента сушки до 70 °C.

Также по аналогии смоделировали по пять циклов нагрева агента сушки до 70 °C с подмешиванием 20...40 % свежего воздуха и нагрева агента сушки до температуры 40 °C и 100 °C с подмешиванием 10...40 % свежего воздуха.

Исходя из условий сушки плановой тонны зерна пшеницы при нормальных условиях в соответствии с ГОСТом Р 55262-2012 [16] определяли зависимости влияния циклов повторного использования теплоты отработавшего агента сушки, нагретого до 40, 70, 100 °C с подмешиванием 10...40 % свежего воздуха, на интегральный расход энергии на испарение влаги из зерна.

Для определения интегрального расхода энергии на испарение влаги из зерна также были рассчитаны удельные энергозатраты на испарение, удельные энергозатраты на привод вентилятора, мощность на привод вентилятора, общий массовый расход сухого воздуха и количество испаряемой влаги из сушильной камеры.

Результаты

Графическая зависимость влияния циклов повторного использования теплоты отработавшего агента сушки, нагретого до 70 °C, на интегральный расход энергии на испарение влаги, построенная по результатам теоретического исследования, приведена на рис. 5.

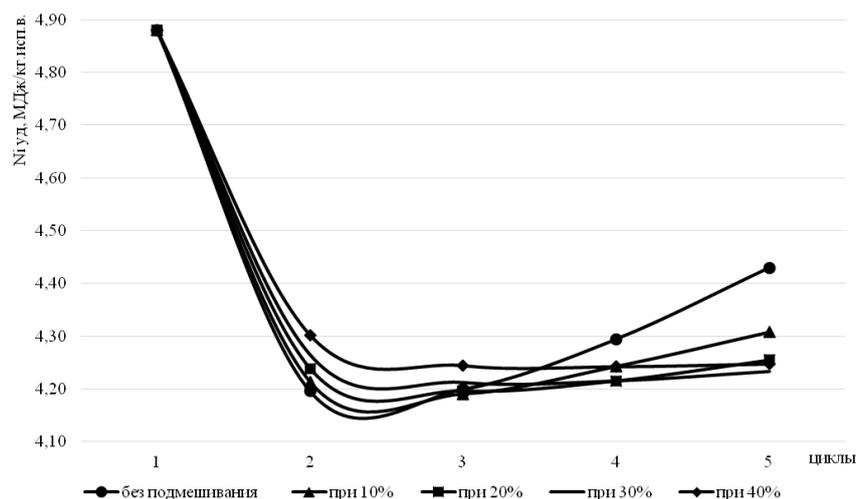


Рис. 5. Интегральный расход энергии при рециркуляции агента сушки, нагретого до 70 °С, с подмешиванием свежего воздуха

Контрольные параметры энергоэффективности рециркуляции теплоты отработавшего агента сушки, нагретого до 70 °С, с подмешиванием свежего воздуха на входе и выходе из сушильной

камеры, необходимые для удержания тепловентиляционной системы в рациональном режиме, приведены на рис. 6.

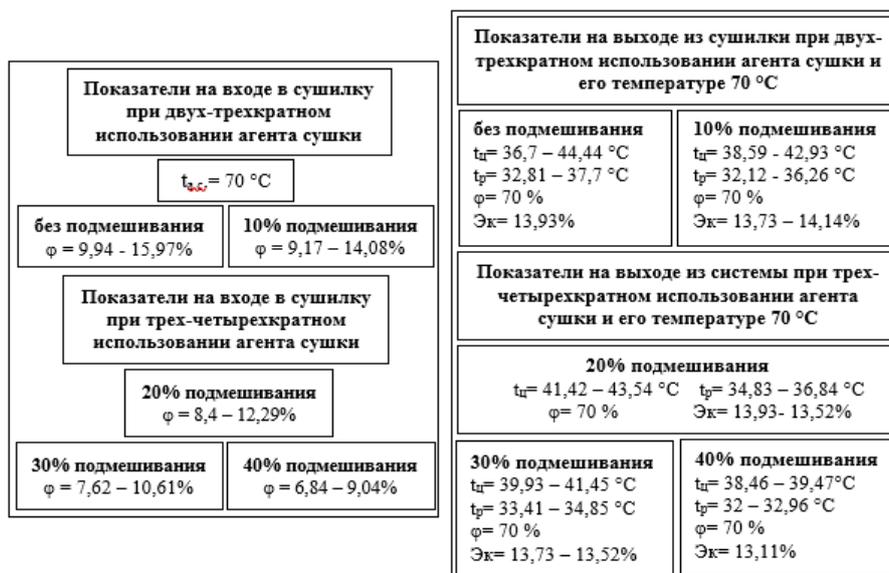


Рис. 6. Рациональные контрольные параметры энергоэффективности рециркуляции теплоты отработавшего агента сушки, нагретого до 70 °С с подмешиванием свежего воздуха

По аналогии определили контрольные рациональные параметры при рециркуляции агента сушки, нагретого до 40 °С и 100 °С с подмешиванием свежего воздуха.

На рис.6 приведены расчётные параметры отработавшего агента сушки, нагретого до 70 °С при его насыщении влагой в процессе многократного повторного использования с целью определения опасности конденсации влаги в сушильной камере. Результаты исследования показывают, что при нагреве агента сушки от 40 °С до 100 °С, температура точки росы ниже температуры отработавшего агента сушки на 5,7...7,1 °С.

Обсуждение

Самым перспективным и малоизученным способом снижения интегрального расхода энергии при конвективной сушке зерна является рециркуляция теплоты отработавшего агента сушки. Проведенные ранее исследования по данной тематике показали, что теплотехническая эффективность использования агента сушки в замкнутой системе максимальна при двух - четырехкратном повторном использовании агента сушки. При этом экономия электрической энергии и топлива может достигать 10 %.

Проведенное нами исследование показало, что двух-, пятикратное повторное использование

теплоты отработавшего агента сушки с подмешиванием 10...20 % свежего воздуха приводит к снижению интегрального расхода энергии на сушку до 14,1...17,9 %. Установлено, что удержание тепловентиляционной системы в рациональном режиме возможно при контроле и управлении параметрами агента сушки на выходе из сушильной камеры.

Применение полученных результатов при конструировании новых зерновых сушилок, разработке систем управления основными технологическими параметрами, настройке сушилок на заданные режимы работы позволит в масштабах страны экономить значительное количество энергии.

Заключение

Для обоснованного выбора рациональных режимов работы тепловентиляционной системы при конвективной сушке зерна разработана модель ее работы при повторном использовании теплоты отработавшего агента сушки с частичным подмешиванием свежего воздуха. Наилучшее использование

Литература

1. Модель функционирования технологического процесса послеуборочной обработки зерна в отделении приема и предварительной очистки зернового вороха / Н. Н. Кузнецов, Н. Н. Пушкаренко, В. И. Медведев и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2018. Т. 13. № 4(51). С. 114-118.
2. Зерно и продукты его переработки. [Электронный ресурс] URL: <https://www.agroprodmarshexpo.ru/ru/articles/zerno-i-produkty-ego-pererabotki/> (дата обращения 01.02.2025).
3. Щербаков Н. В., Максимова Е. С., Нко'о Ж. Д. Современное состояние производства зерна в России // Траектории социально-экономического развития региона в условиях внешнеполитического санкционного давления: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Мичуринск-наукоград РФ, 25 апреля 2023 года. Под редакцией Н.В. Карамновой. Мичуринск: Мичуринский государственный аграрный университет, 2023. С. 305-308.
4. Журавлёв А. П. Зерносушение и зерносушилки. Кинель: РИЦ СГСХА, 2014. 293 с.
5. Drincha V. M., Tsench Yu. S. Fundamentals and Prospects for the Technologies Development for Post-Harvest Grain Processing and Seed Preparation // Agricultural Machinery and Technologies. 2020. Vol. 14. No. 4. P. 17-25. doi:10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25
6. Энергосбережение в технологиях послеуборочной обработки зерна и семян URL: <https://belagromech.by/news/energoberezhenie-v-tehnologiyah-posleuborochnoj-obrabotki-zerna-i-semyan/> (дата обращения 01.02.2025).
7. Иванов Н. М., Чепурин Г. Е. Энергозатраты при послеуборочной обработке зерна // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31. № 4. С. 87-90.
8. Способ сушки с частичной рециркуляцией отработанного воздуха позволяет. URL: <https://mksegment.ru/a/sposob-sushki-s-chastichnoj-recirkulyaciej-otrabotannogo-vozduha-pozvolyaet> (дата обращения 01.02.2024).
9. Голубкович А. В., Чижиков А. Г. Сушка высоковлажных семян и зерна. М.: Росагропромиздат, 1991. 174 с.
10. Анализ производительности хмелесушилки с частичной рекуперацией тепловой энергии / А. О. Васильев, К. В. Егоров, Р. В. Андреев и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19. № 3(75). С. 59-66. doi 10.12737/2073-0462-2024-59-66.
11. Ибрагимов У. Х., Аванесов Т. Р. Утилизация теплоты отработанного газа и воздуха в конвективных сушильных установках с помощью теплового насоса. Молодой Ученый. Международный научный журнал. 2021. № 21 (363). С. 31-37.
12. Снижение удельного расхода энергии при сушке зерна / С. А. Сутягин, В. И. Курдюмов, А. А. Павлушин и др. // Известия Самарской ГСХА. Том 2. № 2. 2017 С. 39-45.
13. Сушилка для сельскохозяйственных продуктов. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2042095C1> (дата обращения 01.02.2025).
14. Пути снижения энергозатрат при сушке зерна / С. К. Манасян, М. С. Манасян, Г. С. Манасян и др. // Материалы международной научной конференции. Проблемы современной аграрной науки. Красноярск, Красноярский ГАУ. 2013. URL: <http://www.kgau.ru/new/all/konferenc/06/> (дата обращения 01.02.2025).

теплоты агента сушки для испарения влаги из зерна при температуре агента сушки 70 °С достигается при двух - трехкратном его использовании. При этом интегральный расход энергии снижается на 14,1 %. При температуре агента сушки 100 °С четырех - пятикратное повторное использование его теплоты снижает интегральный расход энергии на 17,9 %.

Контрольные параметры на выходе из сушильной камеры, необходимые для удержания тепловентиляционной системы в рациональном режиме следующие: при нагреве агента сушки в теплогенераторе до 70 °С с подмешиванием 10 % свежего воздуха – относительная влажность 70 %, температура – 39...43 °С; при нагреве агента сушки в теплогенераторе до 100 °С – относительная влажность 70 %, температура – 55...58 °С. На всех исследуемых режимах конденсация влаги в сушильной камере отсутствует, так как температура точки росы ниже температуры отработавшего агента сушки на 5,7...7,1 °С.

15. Тарабаев Б. К., Журавлев А. П., Сарлыбаева Л. М. Пути совершенствования процесса сушки зерна // Вестник Алматинского технологического университета. 2015. № 4. С. 52-57. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_25903596_61445901.pdf (дата обращения 01.02.2025).

16. ГОСТ Р 55262-2012. Сушильные машины и установки сельскохозяйственного назначения. Методы испытаний. Москва, Стандартинформ. 2015. 128 с.

17. Оценка использования процесса рециркуляции сушильного агента в барабанной сушилке / С. В. Панченко, И. Э. Липкович, А. Н. Токарева и др. // Сельский механизатор. 2023. № 9. С. 18-19. doi 10.47336/0131-7393-2023-9-18-19-25

18. Иванов Б. Л., Зиганшин Б. Г., Сафиуллин И. Н. Пути снижения энергетических затрат при сушке зерна. Развитие АПК и сельских территорий в условиях модернизации экономики: Материалы III Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.э.н., профессора Н.С. Каткова, Казань, 19 февраля 2021 г. Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2021. С. 83-89.

19. Повышение эффективности работы сушильных устройств путем использования теплоты отработанного агента сушки / Н. Н. Кузнецов, В. Н. Вершинин, В. Е. Никифоров и др. // Наука в центральной России Science in the central Russia. 2023. Т. 61. № 1. С. 34-42. doi:10.35887/2305-2538-2023-1-34-42.

20. Хахимов Ш. Ш., Мирошников Е. А., Бородин П. Н. Сушильно-очистительный агрегат с системой рециркуляции сушильного агента // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2018. № 1 (46). С. 4-6. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/5463> (дата обращения: 01.02.2025).

References

1. Model of the functioning of the technological process of post-harvest grain processing in the compartment for receiving and preliminary cleaning of the grain heap / N. N. Kuznetsov, N. N. Pushkarenko, V. I. Medvedev et al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2018. Vol. 13. No. 4 (51). P. 114-118.

2. Grain and its processed products. [Electronic resource] URL: <https://www.agroprodmashe-expo.ru/ru/articles/zerno-i-produkty-ego-pererabotki/> (access date: 01.02.2025).

3. Shcherbakov N. V., Maksimova E. S., Nko'o J. D. Current state of grain production in Russia // Trajectories of socio-economic development of the region in the context of foreign policy sanctions pressure: Materials of the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference, Michurinsk - Science City of the Russian Federation, April 25, 2023. Edited by N. V. Karamnova. Michurinsk: Michurinsk State Agrarian University, 2023. P. 305-308.

4. Zhuravlev A. P. Grain drying and grain dryers. Kinel: Publishing house of SSAA, 2014. 293 p.

5. Drincha V. M., Tsench Yu. S. Fundamentals and Prospects for the Technologies Development for Post-Harvest Grain Processing and Seed Preparation // Agricultural Machinery and Technologies. 2020. Vol. 14. No. 4. P. 17-25. doi:10.22314/2073-7599-2020-14-4-17-25

6. Energy saving in technologies of post-harvest processing of grain and seeds URL: <https://belagromech.by/news/energoberezhenie-v-tehnologiyah-posleuborochnoj-obrabotki-zerna-i-semyan/> (access date: 01.02.2025).

7. Ivanov N. M., Chepurin G. E. Energy costs in post-harvest grain processing // Achievements of science and technology of the agro-industrial complex. 2017. Vol. 31. No. 4. P. 87-90.

8. The method of drying with partial recirculation of exhaust air allows. URL: <https://mksegment.ru/a/sposob-sushki-s-chastichnoj-recirkulyaciej-otrabotannogo-vozduha-pozvolyaet> (access date: 01.02.2024).

9. Golubkovich A. V., Chizhikov A. G. Drying of high-moisture seeds and grain. Moscow: Rosagropromizdat, 1991. 174 p.

10. Analysis of the performance of a hop dryer with partial recovery of thermal energy / A. O. Vasiliev, K. V. Egorov, R. V. Andreev, et al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2024. Vol. 19. No. 3 (75). P. 59-66. doi 10.12737/2073-0462-2024-59-66.

11. Ibragimov U. Kh., Avanesov T. R. Utilization of heat from exhaust gas and air in convective drying units using a heat pump. Young Scientist. International scientific journal. 2021. No. 21 (363). P. 31-37.

12. Reducing the specific energy consumption during grain drying / S. A. Sutyagin, V. I. Kurdyumov, A. A. Pavlushin, et al. // Bulletin Samara State Agricultural Academy. Vol. 2. No. 2. 2017 P. 39-45.

13. Dryer for agricultural products. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2042095C1> (access date: 01.02.2025).

14. Ways to reduce energy costs during grain drying / S. K. Manasyan, M. S. Manasyan, G. S. Manasyan, et al. // Proceedings of the international scientific conference. Problems of modern agricultural science. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University. 2013. URL: <http://www.kgau.ru/new/all/konferenc/06/> (access date: 01.02.2025).

15. Tarabaev B.K., Zhuravlev A.P., Sarlybaeva L.M. Ways to improve the grain drying process // Vestnik of the Almaty Technological University. 2015. No. 4. P. 52-57. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_25903596_61445901.pdf (access date: 01.02.2025).

16. State Standard GOST R 55262-2012. Drying machines and installations for agricultural purposes. Test methods. Moscow, Standartinform. 2015. 128 p.

17. Evaluation of the use of the drying agent recirculation process in a drum dryer / S. V. Panchenko, I. E. Lipkovich, A. N. Tokareva, et al. // Rural mechanic. 2023. No. 9. P. 18-19. doi 10.47336/0131-7393-2023-9-18-19-25

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

18. Ivanov B. L., Ziganshin B. G., Safiullin I. N. Ways to reduce energy costs when drying grain. Development of the agro-industrial complex and rural areas in the context of economic modernization: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Doctor of Economics, Professor N.S. Katkov, Kazan, February 19, 2021 Kazan: Kazan State Agrarian University, 2021. P. 83-89.

19. Increasing the efficiency of drying devices by using the heat of spent drying agent / N. N. Kuznetsov, V. N. Vershinin, V. E. Nikiforov et al. // Science in the Central Russia. 2023. Vol. 61. No. 1. P. 34-42. doi: 10.35887/2305-2538-2023-1-34-42.

20. Khakimov Sh. Sh., Miroshnikov E. A., Borodin P. N. Drying and cleaning unit with a drying agent recirculation system // Universum: technical sciences: electronic scientific journal. 2018. No. 1 (46). P. 4-6. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/5463> (access date: 01.02.2025).