

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



КУПРЕЕНКО ОЛЕГ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЬНОЙ СУШИЛКИ
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА ДЛЯ ЗЕРНА**

Специальность:

4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Ожерельев Виктор Николаевич

Брянск, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Источники нагрева в сушильных установках.....	10
1.2 Анализ конструкций сушилок как основы для разработки дополнительного модуля модульной сушилки аэродинамического нагрева.....	24
1.3 Теоретические основы технологии аэродинамического нагрева.....	29
Выводы	35
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЬНОЙ СУШИЛКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА.....	37
2.1 Обоснование конструктивно-технологической схемы модульной сушилки аэродинамического нагрева.....	37
2.2 Обоснование параметров сушильной шахты.....	43
2.3 Математическая модель параметров рециркулирующего сушильного агента	49
2.4 Баланс воздушных потоков.....	63
Выводы по главе 2.....	69
ГЛАВА 3 ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	70
3.1 Программа исследований.....	70
3.2 Методика исследований.....	70
3.2.1 Методика исследований физико-механических свойств зерна.....	70
3.2.2 Описание экспериментальной установки и средств измерения параметров.....	72
3.3 Методика планирования двухфакторного эксперимента.....	86
Выводы по главе 3.....	89
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ	

ИССЛЕДОВАНИЙ	МОДУЛЬНОЙ	СУШИЛКИ
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА		90
4.1 Физико-механические свойства зерна.....		92
4.2 Параметры сушильного агента при его однократной циркуляции в сушилке		93
4.3 Параметры сушильного агента при его одноконтурной рециркуляции.....		99
4.4 Изменение параметров сушильного агента при его двухконтурной рециркуляции.....		100
4.5 Влияние температуры сушильного агента и влажности зерна на продолжительность процесса сушки.....		108
4.6 Результаты исследования модульной сушилки в производственных условиях.....		111
Выводы по главе 4.....		122
ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОДУЛЬНОЙ		
СУШИЛКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА.....		123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		132
Список литературы.....		134
Приложения.....		150

Введение

Актуальность темы исследования.

Агропромышленный комплекс России в последние годы среди других отраслей народного хозяйства выходит на передовые позиции по темпам роста производства [77]. Большое значение при этом приобретает не только рост объемов производства, но и обеспечение сохранности произведенной продукции.

Одной из возрождаемых отраслей Брянской области является садоводство [7, 95]. Для переработки части плодовой продукции в сухофрукты используются различного типа сушильные установки [38], в том числе в Брянском ГАУ сушилка аэродинамического нагрева ПАПРКТО [52]. В результате улучшены технико-экономические показатели сушилки аэродинамического нагрева на сушке яблок за счет использования комбинированного теплообменника в системе выброса отработанного сушильного агента [53, 54].

Такая сушилка периодического действия имеет простую конструкцию сушильной камеры и ротор-нагреватель в качестве преобразователя потребляемой электроэнергии на его привод в тепловую энергию сушильного агента. В «основе аэродинамического нагрева - трансформация в теплоту аэродинамических потерь, возникающих при работе ротора центробежного вентилятора в замкнутом циркуляционном контуре сушильной камеры. Ротор обеспечивает как нагнетание воздуха, так и его нагрев. При этом достигается высокая равномерность нагрева по всему объёму высушиваемого материала, тепловая экономичность и безопасности в пожарном отношении» [78]. Коэффициент полезного действия трансформации электрической энергии в тепловую составляет 0,88...0,95 [92].

Характерной «особенностью сушилки аэродинамического нагрева является циркуляция сушильного агента по замкнутому контуру внутри сушильной камеры с частичным сбросом увлажненного сушильного агента и подсосом такого же количества атмосферного воздуха» [93].

Сушилки аэродинамического нагрева широко используются в различных отраслях машиностроения [94], в технологиях сушки пиломатериалов [98]. В

последнее время ведутся исследования по применению сушилок данного типа для сушки сельскохозяйственного сырья [44, 45, 48, 51], в том числе для зерна [49, 59, 60, 61, 62, 78, 87]. Однако в этом случае для повышения производительности необходима работа сушилки в режиме непрерывного действия. Камерная компоновка существующей сушилки в данном случае не позволяет организовать такой режим работы.

Одной из тенденций в современном сельскохозяйственном производстве является разработка многофункциональных, модульных машин, обеспечивающих выполнение ряда технологических операций за один проход агрегата, либо имеющих возможность обработки различных видов сырья.

Для расширения функциональных возможностей сушилки аэродинамического нагрева ПАПРКТО, «увеличения ее годовой загрузки была предложена концепция модульной сушилки аэродинамического нагрева, обеспечивающей как режим камерной сушки, так и непрерывный режим сушки за счет использования дополнительного модуля в виде сушильной шахты для зерна» [18, 66, 72, 78, 79, 86, 91].

Зерно является важнейшим сельскохозяйственным продуктом и уровень самообеспеченности страны по зерну должен составлять 95 % [77]. Поэтому вопрос сохранности выращенного урожая зерна является чрезвычайно актуальным.

Для сушки зерна наиболее распространены шахтные сушилки с высотой рабочей части шахты от 4 до 15 м. Время одного пропуска зерна через шахту составляет от 40 мин. и зависит от влажности зерна и настройки выпускного устройства.

Учитывая высоту сушилки ПАПРКТО в пределах 2 м, желательную ее мобильность в плане перемещения к местам производства и переработки производимой продукции разработка дополнительного модуля высотой 4...5 м и более не целесообразна.

Поэтому задачей является обоснование вместимости дополнительного модуля в виде сушильной шахты, позволяющей обеспечить требуемые режимы сушки зерна при приемлемых технико-экономических показателях процесса.

Степень разработанности темы.

Вопросами сушки растительного сырья занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Агеев П.С., Акулич П.В., Антошин И.М., Атаназевич В.И., Будников Д.А., Гинзбург А.С., Голубкович А.В., Горячкин В.П., Загоруйко М.Г., Лебедев П.Д., Летошнев М.Н., Лыков А.В., Малин Н.И., Мальтри В.М., Масалимов И.Х., Рогов И.А., Павлушин А.А., Рудобашта С.П., Кей Р.Б., Кришер О., Курдюмов В.И., Манасян С.К., Саенко Ю.В., Сажин Б.С., Смелик В.В., Тихомиров Д.А., Цугленок Н.В., Allen T.R., Hukill W.V., Krokida M.K., Meisamiasl E., Nwakuba N.R. и другие.

Большой вклад в развитие теории установок аэродинамического нагрева внесли В.Н. Косточкин, Е.Г. Шадек, П.И. Тевис и др.

Промышленностью производятся для лесного и сельского хозяйства сушильные установки аэродинамического нагрева для сушки пиломатериалов, орехов [100], в химической, пищевой промышленности [1, 69], для термообработки [94], используются для сушки автомобилей, после нанесения на них лакокрасочных покрытий [2], разогрева при перевозке железнодорожным и автомобильным транспортом затвердевающих и вязких материалов (нефтепродуктов) [3, 4].

Разработчиками данного типа сушильных установок в области машиностроения помимо данного направления указывалось на перспективность их применения для сушки, в первую очередь, зерна [92].

Анализ литературных источников показал, что сушка зерна в аэродинамических сушилках практически не исследована. При этом включение «дополнительного модуля в виде сушильной шахты для зерна» [18] в конструктивно-технологическую схему сушилки не должно влиять на режим работы ее основного модуля – сушильной камеры для плодово-ягодного сырья.

Цель исследования - разработка технологического процесса сушки зерна в модульной сушилке аэродинамического нагрева с обоснованием параметров её дополнительного модуля.

Задачи исследования.

1. На основе анализа конструкций зерносушилок обосновать конструктивно-технологическую схему дополнительного модуля сушилки аэродинамического нагрева.

2. Разработать математическую модель зависимости температуры сушильного агента от параметров модульной сушилки аэродинамического нагрева.

3. Исследовать влияние параметров модульной сушилки на температуру сушильного агента в режиме сушки зерна.

4. Произвести проверку в производственных условиях и технико-экономическую оценку предлагаемых решений.

Объект исследования. Технологический процесс модульной сушилки аэродинамического нагрева в режиме сушки зерна.

Предмет исследования. Влияние параметров модульной сушилки аэродинамического нагрева в режиме сушки зерна на параметры сушильного агента.

Научная новизна – обоснована необходимость двухконтурной циркуляции сушильного агента в модульной сушилке аэродинамического нагрева.

Теоретическая значимость заключается в получении зависимостей, позволяющих обосновать параметры дополнительного модуля сушилки аэродинамического нагрева для режима сушки семенного зерна.

Практическая значимость заключается в получении обоснованных параметров дополнительного модуля сушилки аэродинамического нагрева, обеспечивающих режим сушки зерна.

Методология и методы исследования. Исследования проведены с применением методов гидравлики, теплотехники, теории сушки, планирования эксперимента. Обработка результатов экспериментальных исследований методом

корреляционно-регрессионного анализа проведена с использованием программ MS Excel, Statistica 13.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель зависимости температуры сушильного агента от параметров модульной сушилки при его двухконтурной циркуляции;
- влияние параметров модульной сушилки на температуру сушильного агента;
- результаты исследования в производственных условиях модульной сушилки в режиме сушки зерна.

Реализация результатов исследования. Модульная сушилка аэродинамического нагрева успешно прошла проверку в производственных условиях учхоза Брянского ГАУ. Материалы исследования, рабочие чертежи дополнительного модуля переданы в ООО «ОКБ по теплогенераторам» г. Брянск.

Степень достоверности результатов исследований. Различие результатов теоретических и экспериментальных исследований 1...4 %.

Апробация работы. Материалы доложены на национальных и международных научно – практических конференциях: «Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения» 2023, 2024, 2025 гг. (Брянский ГАУ), «Инновации и технологический прорыв в АПК» 2023, 2024, 2025 гг. (Брянский ГАУ), «Интеллектуальные системы в аграрном и строительном комплексе» 2023, 2024 гг. (Орловский ГАУ).

Личный вклад соискателя заключался в определении цели и задач диссертационной работы; выполнении теоретических и экспериментальных исследований модульной сушилки, анализе и интерпретации полученных данных; обосновании параметров модульной сушилки; определении технико-экономического эффекта; формулировке выводов; подготовке статей.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 11 печатных работах, из которых 4 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и два патента на полезные модели РФ № 216716 «Сушилка» и № 233989 «Сушилка». Лично автору принадлежат 1,70 п.л. из общего объема публикаций 6,71 п.л.

Структура и объем диссертационной работы. Объем диссертационной работы 156 страниц машинописного текста, включая введение, пять глав, заключение, список литературы из 117 наименований, в том числе 6 на иностранных языках. Содержит 102 рисунка, 3 таблицы и 5 приложений.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Источники нагрева в сушильных установках

Сушилки аэродинамического нагрева относятся к сушилкам конвективного типа. Соответственно в своем составе сушилка должна иметь источник нагрева сушильного агента.

Удобством и простотой генерирования теплоты отличаются сушилки, использующие электроэнергию. Это установки контактного типа [37, 39, 41, 55, 63, 64, 65, 67, 88, 89, 90], с инфракрасным нагревом [15, 16, 17, 29, 40, 43, 47, 80, 81, 82, 83, 84], с СВЧ-нагревом [9, 10, 11, 12, 50], с применением термоэлектрического теплового насоса [96]. Большое внимание уделяется вопросам интенсификации тепломассопереноса в процессе сушки использованием различных режимов сушки [24, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 56, 57, 58, 74, 112, 113, 114, 115], обоснованию типоразмерного ряда [14], использованию альтернативных источников энергии [116, 117].

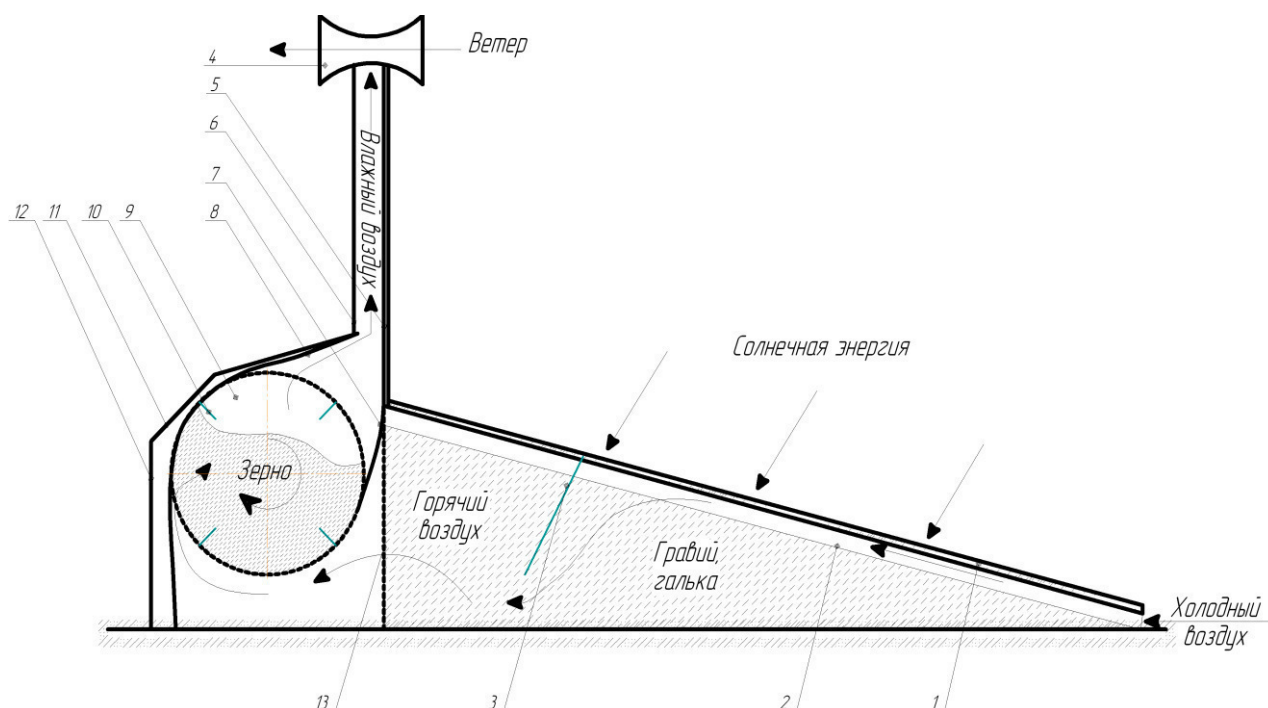
Из имеющих реальное практическое значение источников теплоты для конвективных сушилок такими могут быть: воздушный солнечный коллектор с аккумуляторами теплоты, теплогенератор, работающий за счет сжигания органического топлива, электронагреватели, ротор-нагреватель, трансформирующие аэродинамические потери в тепловую энергию.

Солнечная энергия используется в гелиосушильных установках, в том числе для сушки зерна. На рис. 1.1 представлена барабанная гелиосушилка зерна [9].

Нагрев сушильного агента (атмосферного воздуха) происходит в солнечном коллекторе I за счет солнечной энергии.

По данным Е.М. Байдакова «В процессе испытаний максимальная температура нагрева зерна, составила $39,8^{\circ}\text{C}$, при максимальной температуре окружающей среды $31,1^{\circ}\text{C}$, температуре сушильного агента 52°C » [8].

Недостатком данной гелиосушки является ее невысокая удельная производительность - $49,2 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$, вследствие малой плотности потока солнечной энергии, поступающей на солнечный коллектор.

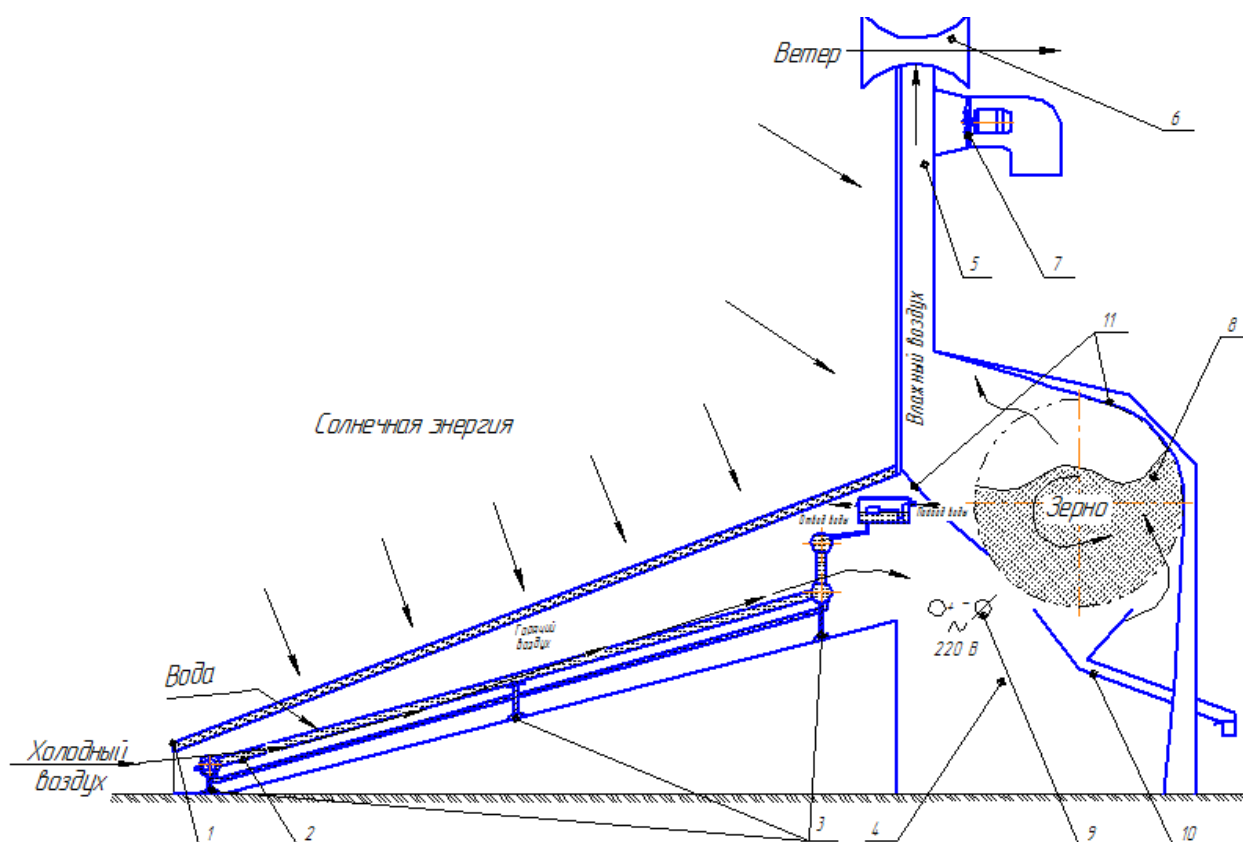


«1 – входной солнечный коллектор с двойным прозрачным покрытием; 2 – гравийный аккумулятор теплоты; 3 – перегородка; 4 – дефлектор; 5 – вертикальный солнечный коллектор; 6 – тепловоспринимающая стенка; 7, 8 – резиновые фартуки; 9 – сушильный барабан; 10 – лопажки; 11, 12 – крышки барабана; 13 – сетка» [97]

Рисунок 1.1 – Схема гелиосушки [38, 97]

В работе [97] для повышения эффективности гелиосушки зерна было предложено использование дополнительной резервной системы электроподогрева сушильного агента (рис. 1.2). При этом гравийный аккумулятор теплоты был заменен на водяной. Удельная производительность барабанной гелиосушки в этом случае повысилась до $79 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$. По данным Ченина А.Н. «тепловой КПД гелиосушки в дневное время суток составил 0,14, в ночное время - 0,09» [97].

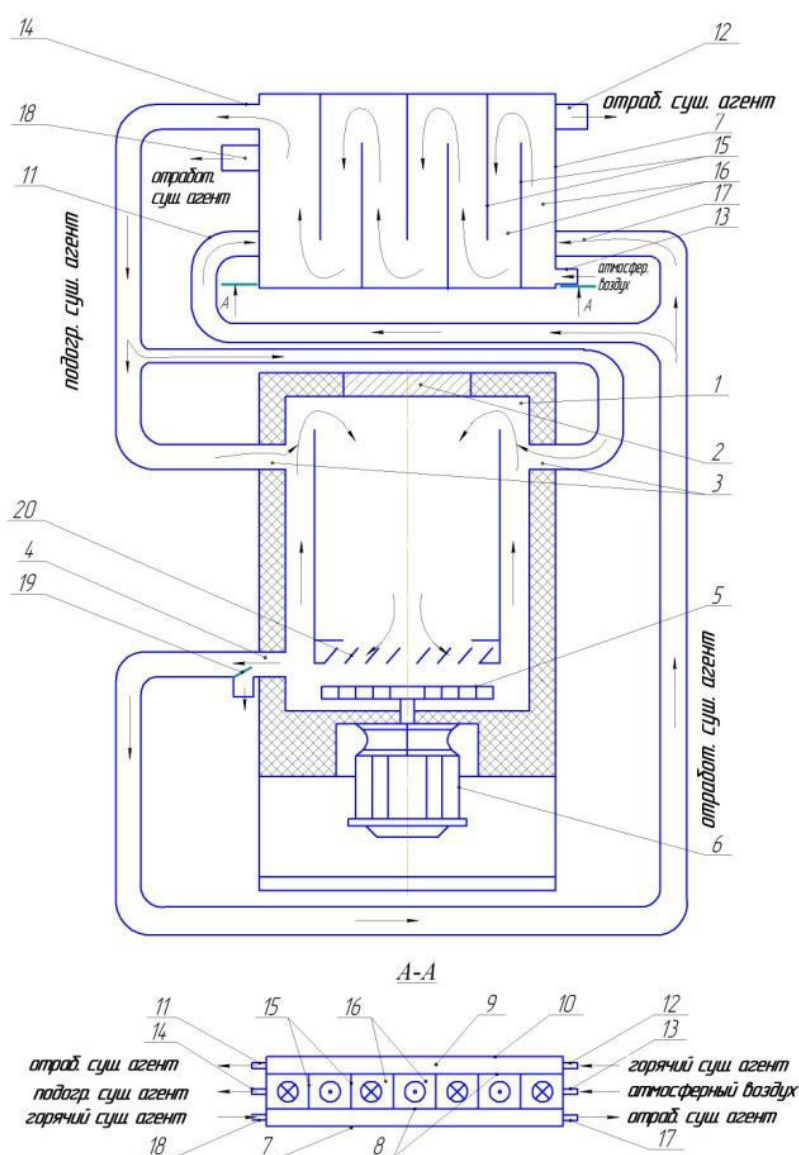
Использование солнечной энергии как основного источника теплоты в сушилке ограничивает ее производительность и дает низкий КПД использования тепловой энергии.



«1 – солнечный коллектор; 2 – водяной аккумулятор теплоты; 3 – опоры водяного аккумулятора теплоты; 4 – сушильная камера; 5 – вытяжная труба; 6 – дефлектор; 7 – система вентиляции; 8 – сушильный барабан; 9 – система электроподогрева сушильного агента; 10 – выгрузной механизм; 11 – фартуки» [97]

Рисунок 1.2 – Схема барабанной гелиосушки [38, 97]

По данным Исаева С.Х. как дополнительный источник теплоты солнечная энергия эффективно используется в сушилке ПАПРКТО посредством включения в схему циркуляции «сушильного агента комбинированного теплообменника (рис. 1.3)» [38].



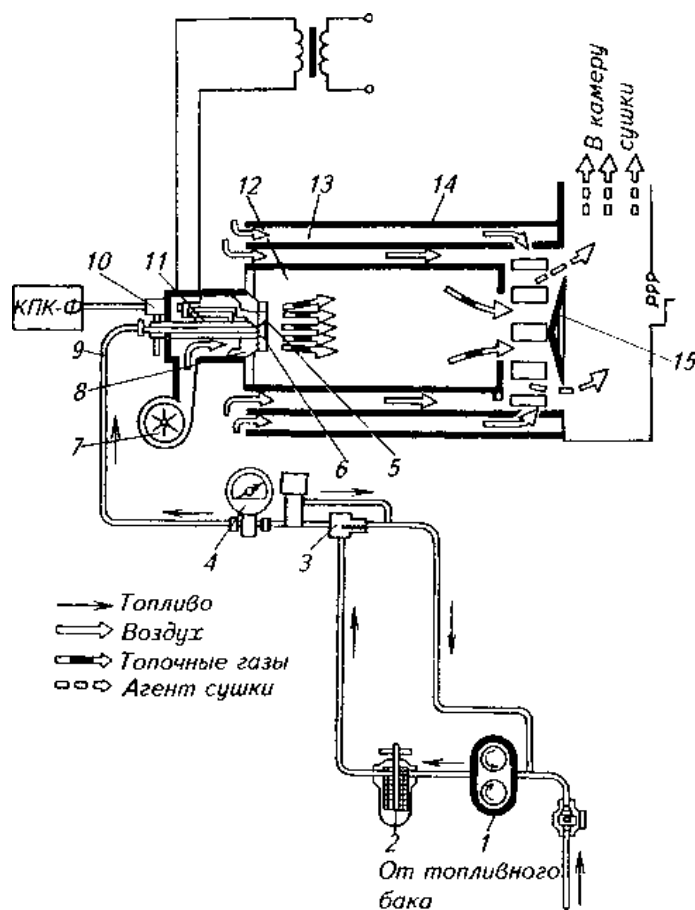
«1 - сушильная камера; 2 – дверь; 3 - патрубки для подсоса сушильного агента; 4 - патрубок для выброса сушильного агента (жалюзи в форме ромашки); 5 - нагревательный ротор центробежного вентилятора; 6 - приводной электродвигатель; 7 - комбинированный теплообменник; 8 - теплообменные поверхности; 9 - воздушный солнечный коллектор; 10 - светопрозрачное покрытие; 11 - патрубок для входа отработанного сушильного агента в верхнюю камеру; 12 - патрубок для выхода отработанного сушильного агента из верхней камеры; 13 - входной патрубок средней камеры; 14 - выходной патрубок средней камеры; 15 – перегородки; 16 - каналы для прохода подогреваемого атмосферного воздуха; 17 - патрубок для входа отработанного сушильного агента в нижнюю камеру; 18 - патрубок для выхода отработанного сушильного агента из нижней камеры; 19 – заслонка; 20 – жалюзи» [38]

«Рисунок 1.3 - Схема сушилки с комбинированным теплообменником» [38]

По данным Исаева С.Х. применение «комбинированного теплообменника обеспечило дополнительный подогрев сушильного агента на 20...25 °С выше температуры атмосферного воздуха и рекуперацию от 40 до 42 % теплоты отработанного сушильного агента в процессе сушки» [38].

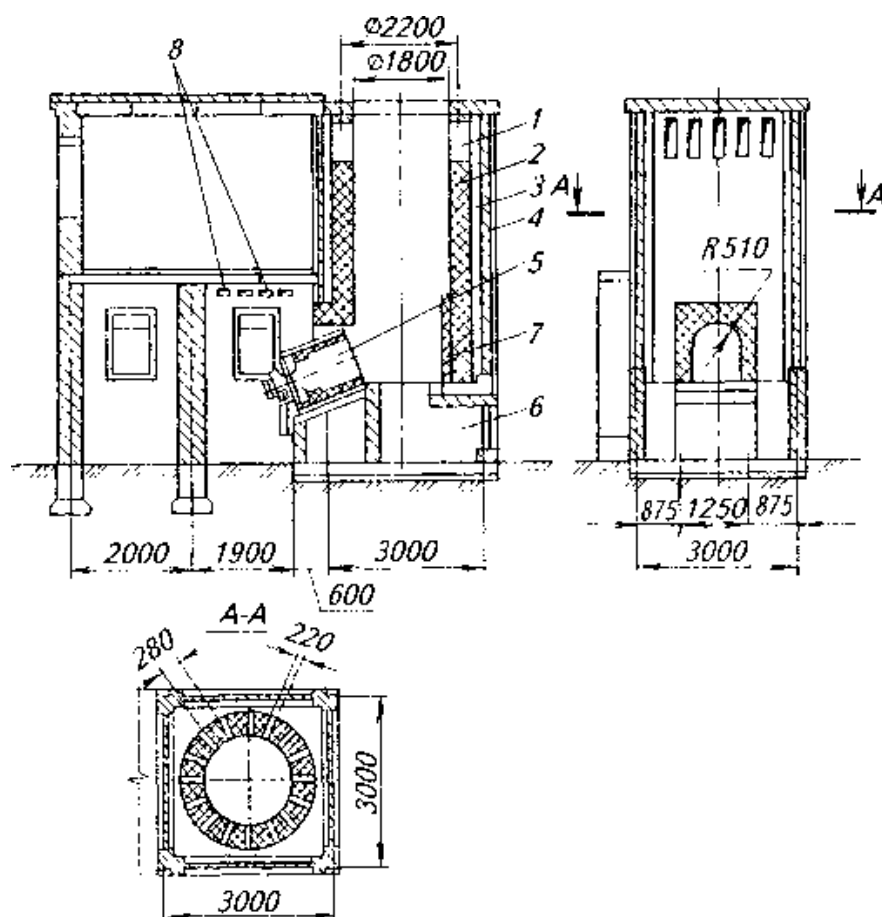
Наибольшее распространение в сушильных установках в качестве источников теплоты для нагрева сушильного агента получили топочные агрегаты, работающие на различных видах органического топлива: природном газе, дизельном топливе, тракторном керосине, соляровом масле, угле, торфе и др. [6].

Топочные агрегаты бывают горизонтального (рис. 1.4) и вертикального (рис. 1.5) типа.



1 - топливный насос; 2 - фильтр; 3 - клапан; 4 - манометр; 5 - смесительная коробка; 6 - завихритель; 7 - вентилятор; 8 - форсунка; 9 - топливопровод; 10 - фотоэлектрический прибор; 11 - свеча; 12 - камера сгорания; 13 - экран; 14 - кожух; 15 - противовзрывной клапан

Рисунок 1.4 – Топка зерносушилки СЗШ-16 [6]



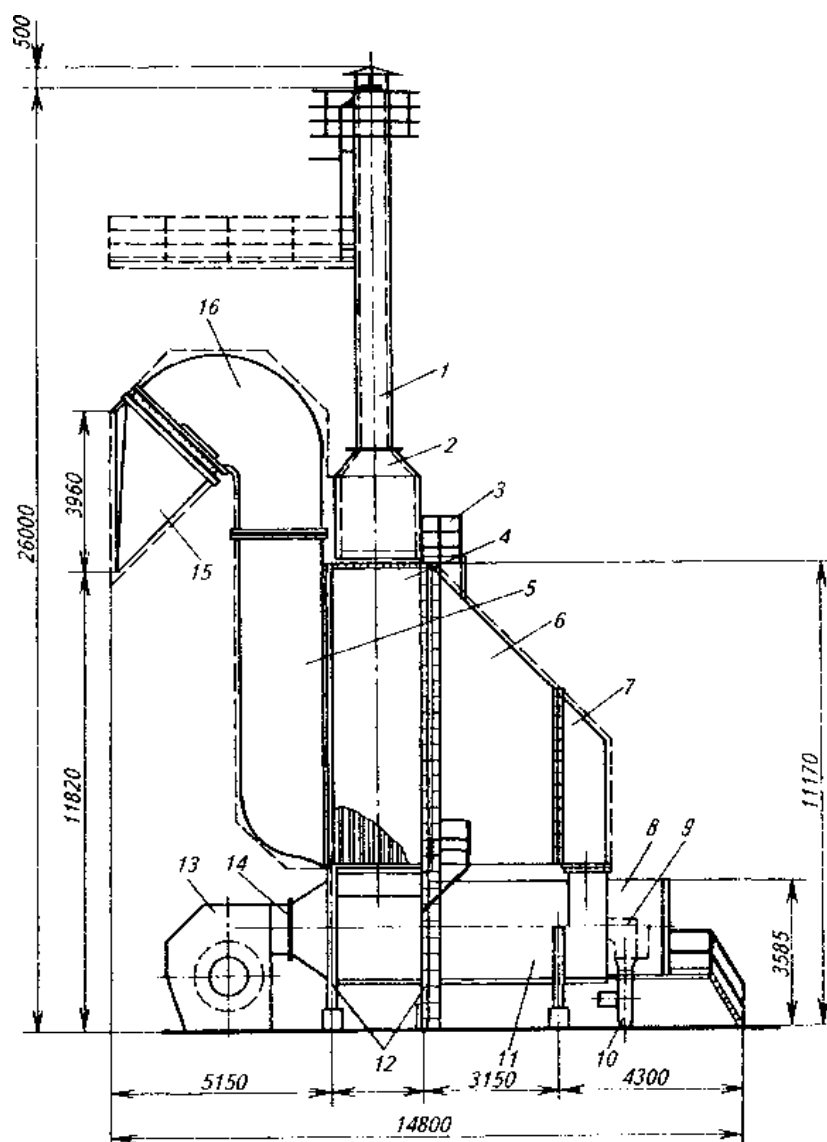
1 - соединительный канал; 2 - внутренняя стенка; 3 - воздушный канал (пространство между стенками); 4 - наружная стенка; 5 - форкамера; 6 - заборный канал; 7 - отражательный щит; 8 - проемы для подсоса подогретого воздуха

Рисунок 1.5 – Вертикальная топка с наклонной форкамерой [6]

Сушильный агент получается смешиванием топочных газов с атмосферным воздухом. Коэффициент полезного действия вертикальной топки составляет 92 % при температуре окружающей среды 15 °С. Достоинством вертикальной топки является также меньшая в 3,8 раза занимаемая площадь, на 15...20 % меньший расход топлива. Недостатком является более затрудненная эксплуатация форсунки.

Использование смеси топочных газов с атмосферным воздухом повышает пожароопасность сушильной установки, загрязняет продукт содержимым

топочных газов. Поэтому в состав сушильных установок часто включают теплообменники, обеспечивающие работу сушилки на чистом подогретом воздухе (рис. 1.6).

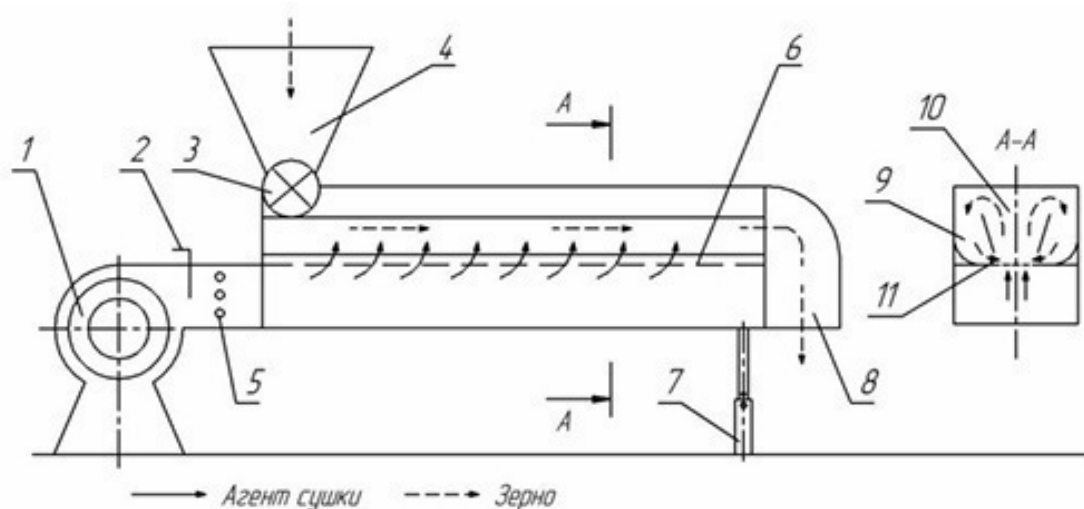


1 - дымовая труба; 2 - помещение для очистки труб теплообменника; 3 - платформа для обслуживания; 4 - теплообменник; 5 - сборник нагретого воздуха; 6 - диффузор; 7 - канал для распределения воздуха; 8 - кожух топки; 9 - форсунка; 10 - вентилятор высокого давления; 11 - камера сгорания; 12 - основание; 13 - вентилятор среднего давления; 14 - регулятор воздуха; 15 - соединительный патрубок; 16 - соединительное колено

Рисунок 1.6 – Теплогенератор зерносушилки А1-УСШ [6]

Мощность теплогенератора составляет 23 ГДж/ч. Работает как на природном газе, так и на жидком топливе. Удельный расход дизельного топлива для большинства шахтных прямоточных сушилок составляет 8,5 кг/т зерна, удельный расход электроэнергии на работу установленных приводных электродвигателей – 2,5...4,0 кВт·ч/т. При этом потери теплоты для таких сушилок составляют около 50 %, для камерных сушилок – до 75...80 % [6].

Технологическая схема зерносушилки с электрокалориферным нагревом представлена на рис. 1.7.

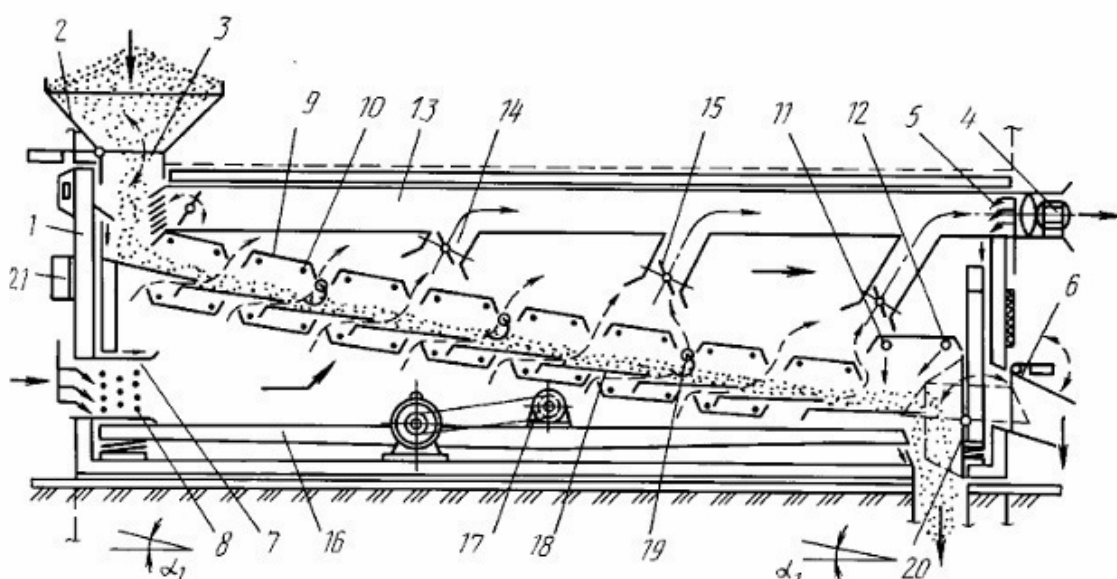


1 – вентилятор; 2 – заслонка; 3 – дозирующее устройство; 4 – бункер; 5 – ТЭНы; 6 – газораспределительная решетка; 7 – стойка, регулирующая угол подъема; 8 – выпускной патрубок; 9 – охладительная камера; 10 – сушильная камера; 11 – линейный зазор

Рисунок 1.7 – Технологическая схема зерносушилки [20]

Трубчатый электронагреватель (ТЭН) имеет практически 100% КПД преобразования электрической энергии в тепловую. Однако при этом осуществляется однократный проход сушильного агента через нагревательные элементы. С поверхностью ТЭНов контактирует не весь объем проходящего воздуха, что снижает эффективность нагрева воздушного потока. Поэтому для достижения требуемой температуры сушильного агента нужна соответствующая мощность электрокалорифера.

Примером сушилки с электрокалориферным нагревом сушильного агента является также аэродинамическая сушилka по патенту № 2018074 (рис. 1.8) [68].



«1 - неподвижный каркас; 2 - съемный загрузочный патрубок; 3 -балансируемый затвор; 4 - пылевой вентилятор; 5 -многосекционный затвор; 6 - балансируемый выгрузочный патрубок; 7 - всасывающий патрубок; 8 -нагреватели; 9 - отражатели; 10 - электронагреватели (ТЭН); 11 - ультрафиолетовые излучатели; 12 - инфракрасные излучатели; 13 - воздухопровод; 14 - отсосы; 15 - затворы; 16 - колеблющийся корпус; 17 - вибровозбудитель; 18 - наклонные полки; 19 - С-образные вилочные ворошители; 20 - балансируемый выгрузочный патрубок; 21 - пульт управления» [68]

Рисунок 1.8 – Аэродинамическая зерносушилка [68]

Следует отметить, что зачастую аэродинамическими называют сушилки, не имеющие роторного нагрева сушильного агента, как и в данном случае, или, например, на рис. 1.9 [101]. На наш взгляд более точно относить данный тип сушилок к пневматическим. В них сушка продукта происходит в процессе его транспортировки сушильным агентом по аэрожелобу или трубопроводу, длина которого определяет время обработки продукта.



Рисунок 1.9 – Аэродинамический сушильный агрегат СА 600 [101]

Сушка происходит в процессе перемещения материала вместе с горячим воздухом в аэродинамической трубе змеевикового вида. В качестве теплогенератора используется твердотопливный топочный блок, который топится древесиной в любом виде. Сушильный агрегат имеет следующие характеристики: расход топлива – 50...100 кг/ч, рабочая температура горячего воздуха при просушке - 260...300 °С, производительность до 600 кг/ч, мощность двигателя вентилятора - 7,5 кВт, расход воздуха - до 4520 м³/ч.

В отличие от вышеперечисленных способов нагрева сушильного агента роторный нагрев прост по конструкции, безопасен в пожарном отношении, не загрязняет высушиваемый продукт, отсутствует пригорание высушиваемого материала к поверхностям, на которых он располагается, компактен, не требует отдельной площади для своего размещения, имеет только один подвижный элемент – ротор-нагреватель, обеспечивающий как нагрев, так и нагнетание сушильного агента.

Попытки использовать тепловой «вентиляторный» эффект для сушки обмоток электродвигателей были предприняты ещё в 40-х годах [22]. Однако промышленного применения как технология нагрева этот эффект не нашёл.

С 1835 г., когда вентилятор был изобретен А.А. Саблуковым, он использовался только в качестве нагнетателя воздуха, работающего на открытую

сеть. Для реализации возникающего теплового эффекта аэродинамических потерь необходимо, чтобы отсутствовал корпус ротора, циркуляционный контур был замкнут или обеспечивался частичный обмен с атмосферой.

Способ аэродинамического нагрева и его реализация в виде печей – рециркуляционных нагревательных установок типа ПАП принадлежит СССР [92]. Промышленное освоение установок данного типа началось в 1963 - 1964 годах под руководством заслуженного изобретателя РСФСР П.И. Тевиса.

Теоретические исследования технологии аэродинамического нагрева были начаты профессором В.Н. Косточкиным, одним из авторов конструкции роторного нагревателя.

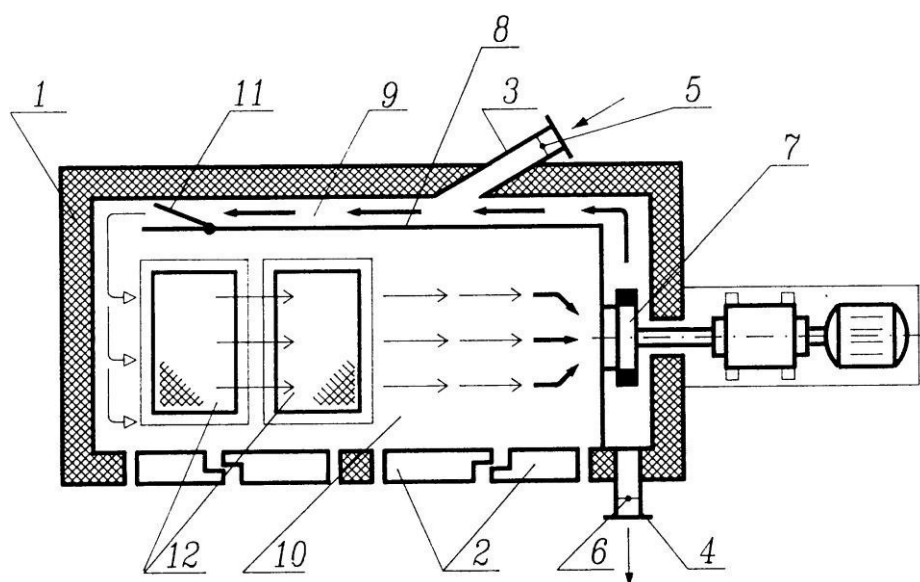
По данным Тевиса П.И. одной из основных характеристик ротора является его диаметр размером от 500 до 1100 мм. При необходимости может реализовываться схема установки с несколькими роторами [92].

Способ обеспечивает высокий КПД 0,75...0,82 и объемное генерирование теплоты, высокую равномерность нагрева по всему объему камеры, интенсивную теплопередачу за счет циркуляции теплоносителя с высокими скоростями (до 10...20 м/с).

По данным Исаева С.Х. «температура в установках ПАП регулируется следующими способами:

- изменением числа оборотов ротора центробежного вентилятора;
- изменением направления вращения ротора центробежного вентилятора;
- периодическими автоматическими включениями и отключениями ротора центробежного вентилятора;
- автоматическим изменением производительности ротора центробежного вентилятора» [38, 46, 92];
- изменением количества сбрасываемого и подсасываемого сушильного агента.

Сушилка (рис. 1.9) для сушки сельскохозяйственного сырья имеет недостаток в виде снижения температуры нагретого сушильного агента за счет подсоса атмосферного воздуха и сброса части нагретого сушильного агента [18].



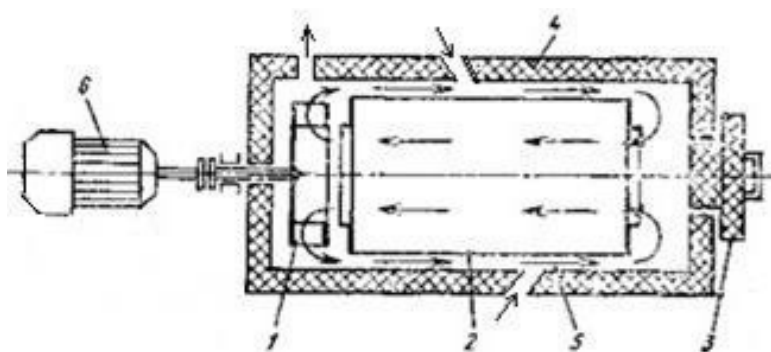
«1 – теплоизолированная камера; 2 – двери; 3 – патрубок подсоса свежего воздуха; 4 – патрубок выброса отработанного сушильного агента; 5, 6 – регулирующие заслонки; 7 – нагревательный ротор; 8 – Г-образный экран; 9 – рабочая камера; 11 – регулирующая заслонка; 12 – кассеты» [69]

Рисунок 1.9 – Сушилка аэродинамического нагрева [69]

На (рис. 1.10) «представлена сушилка аэродинамического подогрева ПАПРКТО, предназначенная для сушки растительной сельскохозяйственной продукции, преимущественно ягод, плодов, овощей и грибов» [38, 92].



«а



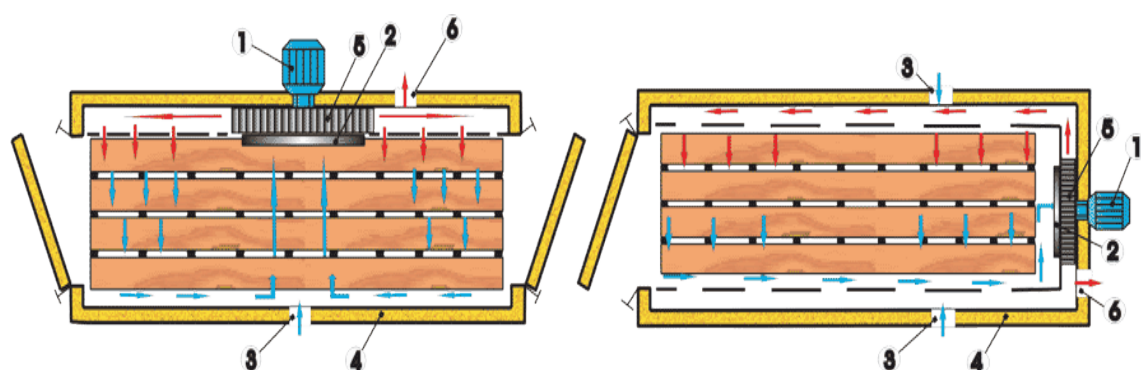
б

Рисунок 1.10 - Сушилка аэродинамического нагрева ПАПРКТО (а) и принципиальная схема работы (б): 1 – ротор-нагреватель; 2 – сушильная камера; 3 – загрузочный проем; 4 – корпус; 5 – циркуляционные каналы; 6 – электродвигатель» [38, 92]

«В процессе эксплуатации сушилки ПАПРКТО было установлено, что на длительность процесса сушки оказывает существенное влияние температура окружающей среды, поскольку при работе сушилки происходит непрерывный воздухообмен – идет постоянный сброс в атмосферу части циркулирующего в сушильной камере сушильного агента и подсос такого же количества не подогретого атмосферного воздуха.

При пониженной температуре атмосферного воздуха заметно снижалась скорость процесса сушки, т.к. генерируемая ротором-нагревателем теплота в значительной мере расходовалась не на дальнейший рост температуры сушильного агента, а на догрев поступающего в сушильную камеру атмосферного воздуха до температуры сушильного агента» [38].

В работе Исаева С.Х. приведены сушильные камеры для пиломатериалов фирмы СКРОН (рис. 1.11) [38].

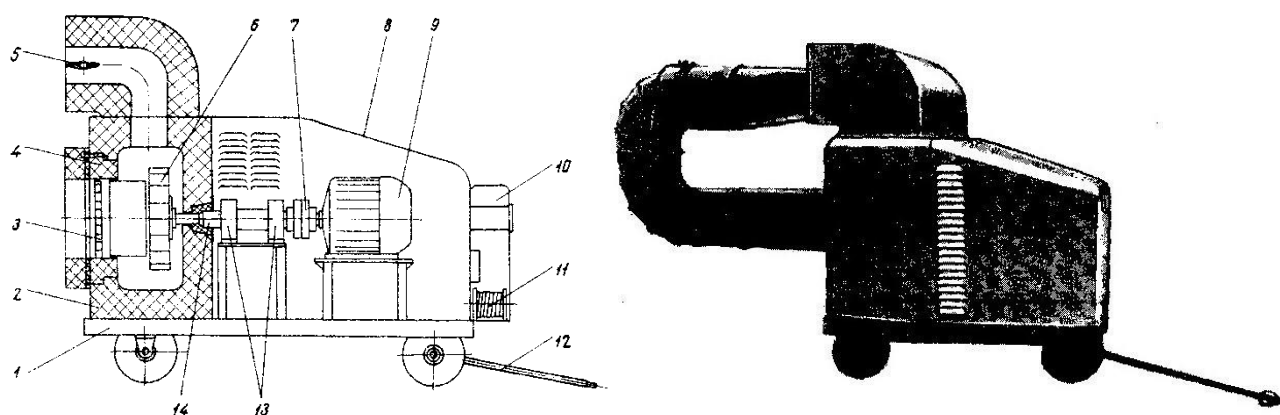


«1 - электродвигатель сушильной камеры; 2 - жалюзи; 3 - приточный канал системы воздухообмена; 4 - ограждения сушильной камеры; 5 - центробежный вентилятор; 6 - вытяжной канал системы воздухообмена» [38]

«Рисунок 1.11 – Аэродинамические сушильные камеры производства СКРОН» [38]

Перспективность роторного нагрева как универсального теплогенератора заключается в том, что вследствие экологичности технологического процесса его можно использовать повсеместно в различных тепловых системах: для сушки

пушно-мехового сырья, отопления помещений (рис. 1.12), сушки емкостей [92] и т.д.



«1 - тележка; 2 - рабочая камера; 3 - заградительная решетка; 4 - фланец; 5 - заслонка нагнетательного канала; 6 - ротор центробежного вентилятора; 7 - соединительная муфта; 8 - кожух; 9 - приводной электродвигатель; 10 - электропирометрический шкаф; 11 - барабан с кабелем электропитания; 12 - тяга; 13 - подшипниковые опоры; 14 - приводной вал» [38, 92]

«Рисунок 1.12 – Схема и вид установки ПАП-5 в комплектации для обогрева помещений» [38, 92]

«РНУ-50» [100] имеет двухроторную схему и предназначена для сушки лекарственных растений, грибов, фруктов, орехов и др. сырья (рис. 1.14) [100].

Таким образом, сушилки аэродинамического нагрева могут иметь многофункциональное назначение в сельскохозяйственном производстве за счет наличия роторного нагревателя. Однако практической реализации сушилок аэродинамического нагрева для сушки зерна не установлено.

Это связано с использованием только камерного типа размещения высушиваемого материала и необходимостью практически постоянной рециркуляции сушильного агента для достижения требуемых температур его нагрева. При этом необходимо найти баланс между объемами сбрасываемого

увлажненного сушильного агента и посасываемого свежего воздуха, не ухудшающий температурно-влажностный режим сушки.

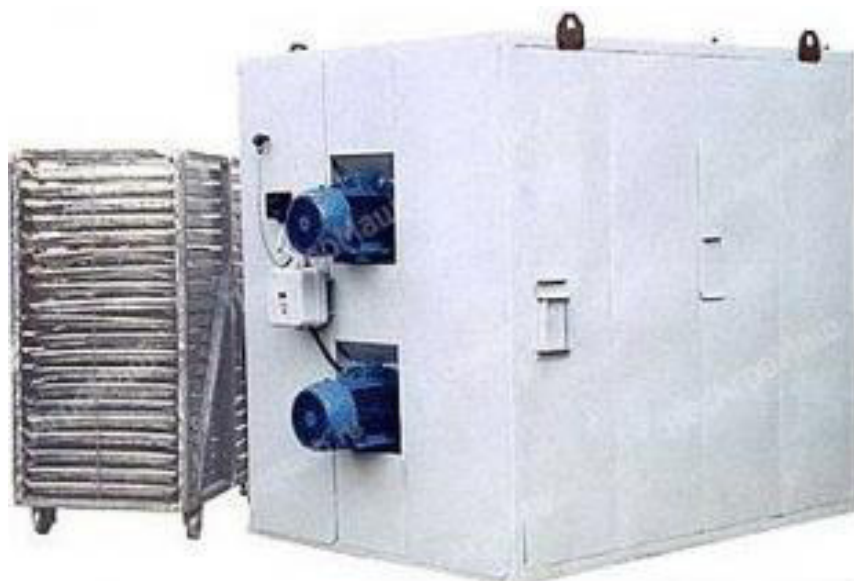


Рисунок 1.14 – Сушилка РНУ-50 [100]

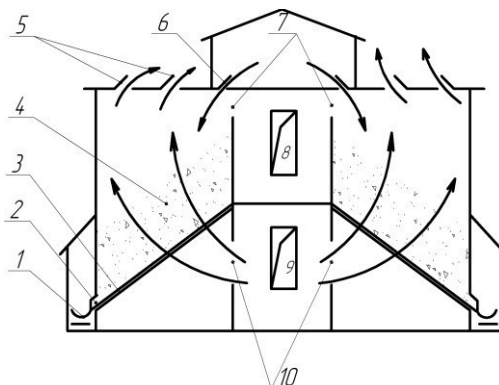
Это создает трудности в разработке работоспособной конструктивно-технологической схемы сушилки аэродинамического нагрева для зерна, несмотря на конструктивную простоту роторного нагрева.

1.2 Анализ конструкций сушилок как основы для разработки дополнительного модуля модульной сушилки аэродинамического нагрева

Для сушки зерна используются сушилки напольного, камерного, барабанного, конвейерного, карусельного, колонкового, башенного, шахтного типа, аэрожелоба, пневматические в виде трубы змеевикового типа или плоской бифилярной спирали и др.

Напольная схема практически не реализуема из-за невозможности организации рециркуляции сушильного агента и, соответственно, нагрева его до требуемой температуры.

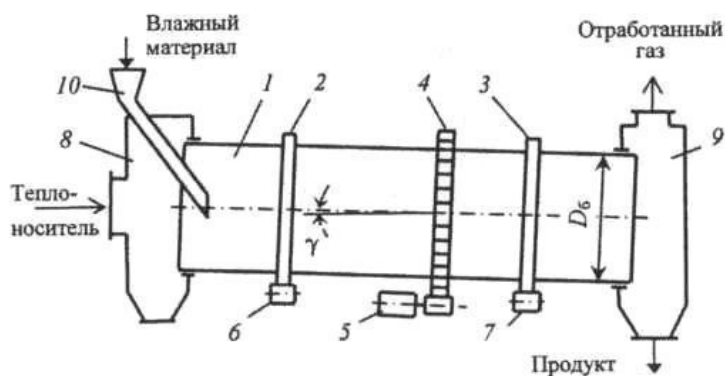
Использование сушилки камерного типа (рис. 1.15) в данном случае приведет к большим габаритам установки, периодичности процесса сушки, сложности устройства разгрузки высушенного зерна и не высокой производительности процесса сушки неподвижного слоя зерна [42].



«1 - конвейер для выгрузки кукурузы; 2 - люк; 3 - днище; 4 - сушильная камера; 5 - люки для выхода отработанного агента; 6 - люк для загрузки кукурузы; 7 - люк; 8 - верхний распределительный коридор; 9 - нижний распределительный коридор; 10 - дверные проемы» [42]

Рисунок 1.5 – Камерная сушилка СКП-6 [8]

По данным Байдакова Е.М. «барабанные (рис. 1.16), конвейерные (рис. 1.17) сушилки имеют сложную конструкцию и трудность организации рециркуляции сушильного агента.



«1 – барабан; 2,3 – бандаж; 4 – зубчатый венец; 5 – привод; 6 – опорные ролики; 7 – опорно-упорный механизм; 8,9 – камеры ввода и вывода теплоносителя; 10 – загрузочный бункер» [97]

Рисунок 1.16 – Барабанная сушилка зерна [97]

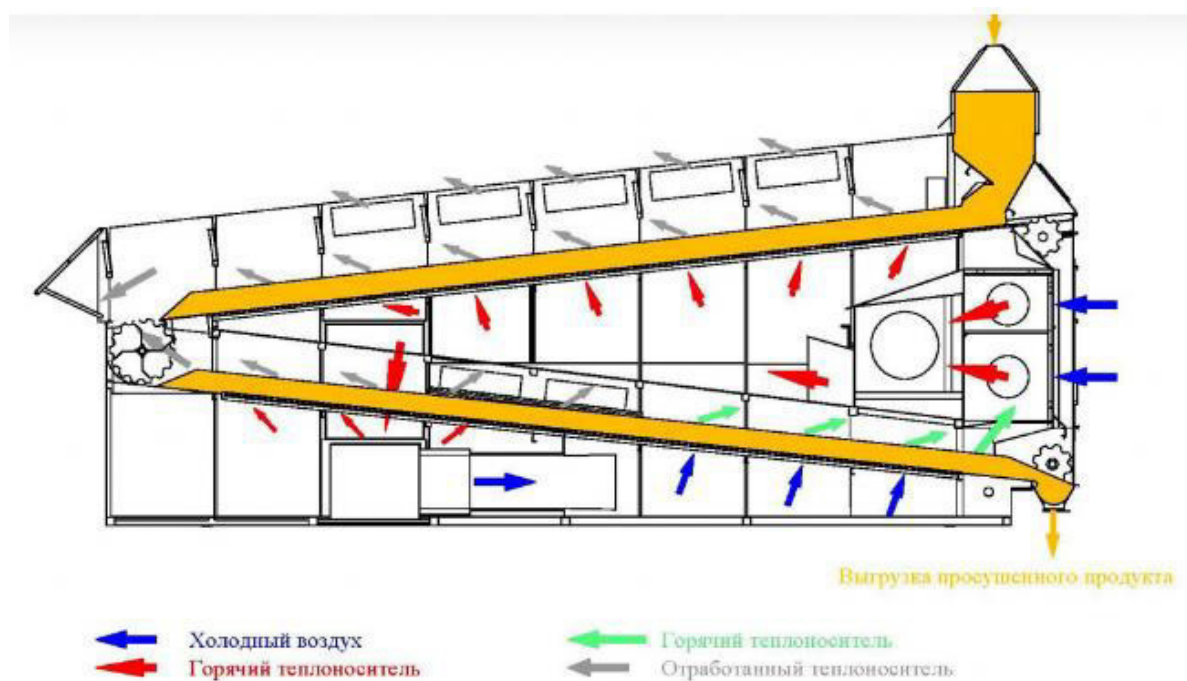


Рисунок 1.17 – Конвейерная сушилка зерна [102]

Карусельные (рис. 1.18), колонковые (модульные) (рис. 1.19), башенные сушилки (рис. 1.20) просты по конструкции, но организация рециркуляции сушильного агента также конструктивно затруднена.



Рисунок 1.18 – Карусельная сушилка зерна [103]



Рисунок 1.19 – Колонковая сушилка зерна ЗСК-45 [104]

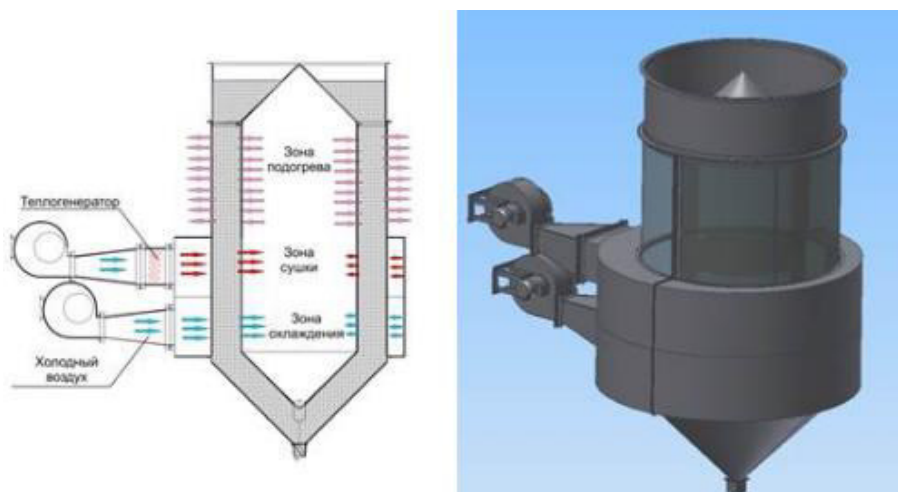
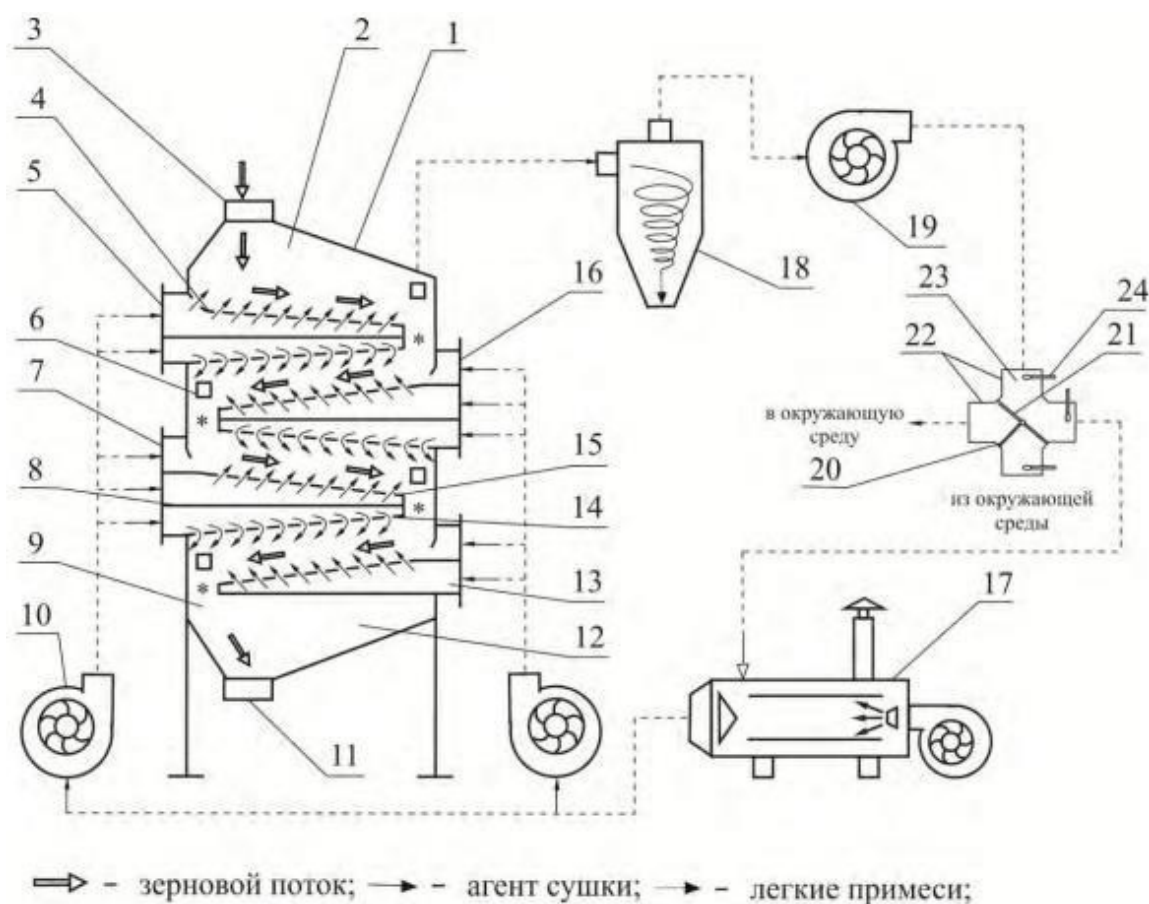


Рисунок 1.20 – Башенная сушилка зерна

При этом колонковые зерносушилки в большей степени повреждают зерно шнековыми транспортерами при его загрузке и выгрузке, а также вследствие трения зерновой массы о перфорацию колонок [103].

Аэрожелоба (рис. 1.21) и пневматические (см. рис. 1.8) сушилки требуют большого расхода сушильного агента, пневматические применяются в основном для мекодисперсных материалов и имеют большое аэродинамическое сопротивление, что при ограниченности в аэродинамических характеристиках штатного ротора-нагревателя модульной сушилки не позволяет их использовать в качестве дополнительного модуля.

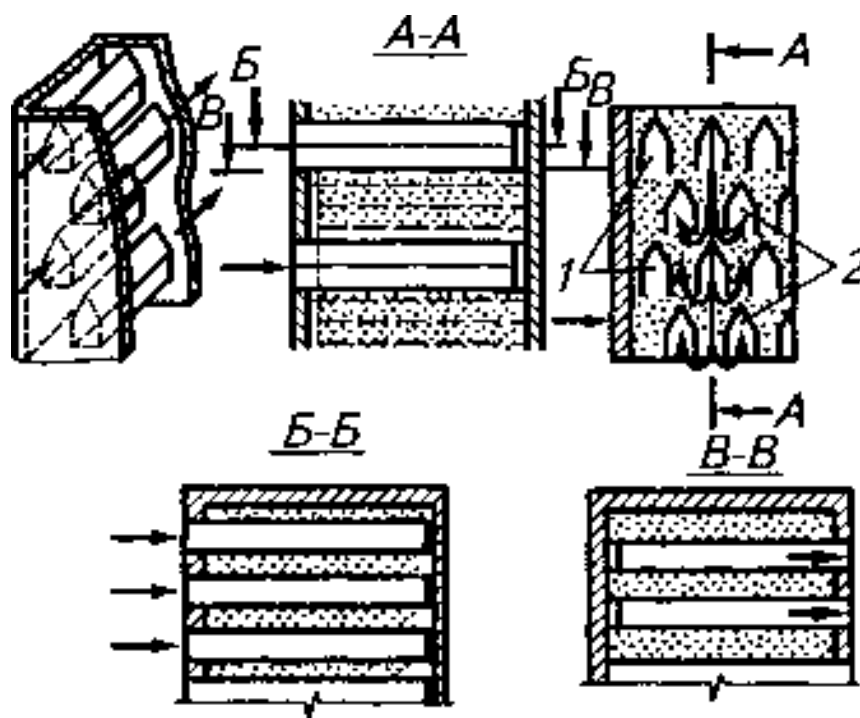


«1 – шахта; 2 – надсушильный бункер; 3 – загрузочная горловина; 4 – верхняя газораспределительная решетка; 5, 7, 13, 16 – воздухоподводящий короб; 6 – окно вытяжное; 8 – глухая перегородка; 9 – камера падающего слоя; 10 – вентилятор; 11 – выпускное устройство; 12 – подсушильный бункер; 14, 15 – газораспределительная решетка; 17 – теплогенератор; 18 – циклон; 19 – вентилятор; 20 – неподвижная заслонка; 21 – подвижная заслонка; 22 – патрубок; 23 – камера смешивания; 24 – датчик температуры и влажности» [21]

«Рисунок 1.21 – Технологическая схема работы рециркуляционной аэрожелобной зерносушилки СЗША-4» [21]

По совокупности параметров – простота геометрической формы, компактность, вертикальная направленность конструкции, движение зерна под действием силы тяжести, достаточно равномерное распределение сушильного

агента по потоку зерна, возможность рециркуляции сушильного агента, обеспечение непрерывного режима процесса сушки, производительность наиболее подходящим типом дополнительного модуля для сушки аэродинамического нагрева является сушильная шахта (рис. 1.22).



1 - подводящие короба; 2 - отводящие короба

Рисунок 1.22 – Шахта зерносушилки [6]

Из основных параметров, требующих определения, можно выделить – размеры поперечного сечения шахты, высота шахты, форма и размеры подводящих и отводящих коробов, конструкция выпускного устройства шахты.

1.3 Теоретические основы технологии аэродинамического нагрева

Генератором теплоты в РНУ является изолированный ротор центробежного вентилятора, т.е. ротор без корпуса, а источником теплоты - аэродинамические потери в рабочем колесе и частично в циркуляционном тракте.

КПД центробежных вентиляторов на рабочих режимах составляет от 0,5 до 0,88 [85]. Для изолированных роторов статический КПД снижается до 0,05...0,15 [92].

Из механики жидкостей и газов известно, что при движении сплошных сред в соответствие с законом сохранения энергии происходит преобразование одних видов энергии в другие, в первую очередь механической энергии в тепловую. Изменение температуры тела определяется взаимным переходом теплоты и механической работы в термодинамической системе.

Из газовой термодинамики известно, что при адиабатическом движении идеального газа с увеличением скорости газ охлаждается, а с уменьшением, наоборот, разогревается:

$$c_p T_r + 0,5v^2 = const, \quad (1.1)$$

где c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость газа, Дж/(кг·К);

T_r - абсолютная температура газа;

v – скорость газа, м/с.

В соответствие с формулой (1.1) и первым началом термодинамики при торможении воздушного потока его кинетическая энергия уменьшается, трансформируясь в теплоту, а общий запас энергии постоянен. Наоборот, разгоняясь, воздух отбирает от потока энергию, понижая его температуру.

По второму началу термодинамики в замкнутой адиабатической материальной системе энтропия является неубывающей функцией времени. Ее возрастание связано с необратимыми процессами преобразования механической энергии в теплоту за счет, например, потерь на внутреннее трение в идеальных средах.

Исходя из первого начала термодинамики, в адиабатическом процессе в несжимаемой среде вся мощность диссипированной в объеме удельной механической энергии внутренних сил необратимо переходит в теплоту.

Например, приведенная в движение вязкая жидкость рассеивает сообщенную ей энергию до тех пор, пока не придет в состояние покоя. Вихрь,

возникший от импульса энергии, затухает, а его энергия диссипирует в объеме за счет работы внутреннего трения, превращаясь в теплоту.

Воздух движется в рабочем колесе вентилятора при интенсивном вихреобразовании.

Известно, что термодинамическая (или статическая) температура T связана с температурой торможения T_0 зависимостью:

$$T_0 = T + 0,5v^2/c_p. \quad (1.2)$$

Второе слагаемое выражения (1.2), учитывая равенство (1.1), определяет возрастание температуры вследствие торможении потока. При скоростях порядка 20...50 м/с разность $\Delta T = T - T_0$ невелика (около 1...2 °С), и ее можно пренебречь. При скоростях от 300...400 м/с ΔT составляет уже 45...80°С.

Температура T определяется прибором, движущемся со скоростью потока. Неподвижный прибор измеряет температуру $T_0 > T$, так как тормозящийся на приборе поток разогревает его.

Таким образом, теплообразование в воздушном потоке имеет двойственную природу процесса: от изменения кинетической энергии (скорости потока) и вследствие трения о стенки и внутри потока вязкой среды (работа внутренних сил трения). Оба процесса неразрывно сопровождают друг друга.

Энергетический баланс движущегося воздушного потока на основании первого закона термодинамики в общем виде можно представить следующим образом [92]:

$$q + p_1 - p_2 = l + l_{\text{тр}} + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 + 0,5\rho(v_2^2 - v_1^2), \text{ Дж/м}^3, \quad (1.3)$$

где q - теплота, подводимая к 1 м³ воздуха (или отведенная от него) на рассматриваемом участке;

l – техническая работа, совершаемая 1 м³ воздуха;

$l_{\text{тр}}$ - работа сил трения, приходящаяся на 1 м³ воздуха;

$\varepsilon_2, \varepsilon_1$ - внутренняя энергия в рассматриваемых сечениях по ходу потока

($\varepsilon = c_v T$, c_v – удельная изохорная теплоемкость);

$p_1 - p_2$ - прирост (или убыль) энергии от работы внешних сил (давления);

$0,5\rho(v_2^2 - v_1^2)$ - то же, от изменения кинетической энергии потока.

Приток теплоты может происходить двумя способами: извне - подводом (отводом) теплоты через наружную поверхность и изнутри - путем преобразования в теплоту работы трения: $q = q_{\text{нар}} + q_{\text{вн}}$. При этом $q_{\text{вн}}$ эквивалентна работе трения: $q_{\text{вн}} = l_{\text{тр}}$. Подставляя вместо ε_2 и ε_1 эквивалентные им теплосодержания i_2 и i_1 , уравнение теплового баланса (по теплосодержанию) будет иметь вид:

$$q_{\text{нар}} - l = i_2 - i_1 + 0,5\rho(v_2^2 - v_1^2). \quad (1.4)$$

В уравнение не входит работа трения, так как она полностью преобразуется в теплоту, которая остается в воздушном потоке [15].

Для замкнутого контура энергетический баланс в форме уравнения Бернулли без учета силы тяжести газа для потока несжимаемой среды имеет вид:

$$0,5\rho(v_{2п}^2 - v_{1п}^2) = (p_1 - p_2) - \Delta p_{\text{пот}}, \quad (1.5)$$

где $v_{1п}, v_{2п}$ - средние скорости потока по полной кинетической энергии;

p_1, p_2 - давления в сечениях 1 и 2;

$\Delta p_{\text{пот}}$ - потери давления на трение.

Из выражения (1.5) видно, что изменение полной кинетической энергии происходит за счет действия внешних сил давления и потерь давления (энергии) на преодоление трения.

Для выделения доли энергии, связанной с вихреобразованием, которая затем преобразуется в теплоту, Бутаковым С.Е. [13] вводится еще одна скорость $v_{\text{в}}$ - относительного, в основном вихревого движения. Тогда, общие потери будут суммой потерь на трение и на вихреобразование:

$$\Sigma p_{\text{пот}} = \Delta p_{\text{тр}} + 0,5\rho(v_{2в}^2 - v_{1в}^2). \quad (1.6)$$

К этому добавляется еще потеря от избыточной кинетической энергии потока, равная $0,5\rho(\ddot{v}_2^2 - \ddot{v}_1^2)$, где $\ddot{v}_1, \ddot{v}_2$ – средние скорости потока по кинетической энергии поступательного движения. Эта энергия для принятой схемы процесса не может быть преобразована в статическое давление или произвести какую-либо полезную работу и вследствие вязкости среды постепенно трансформируется в тепловое молекулярное движение.

Тогда суммарные аэродинамические потери энергии в потоке составят:

$$\Delta p_{\text{пот}} = \Delta p_{\text{тр}} + 0,5\rho(v_{2в}^2 - v_{1в}^2) + 0,5\rho(\ddot{v}_2^2 - \ddot{v}_1^2). \quad (1.7)$$

Для записи уравнения Бернулли в окончательном виде с учетом всех видов потерь механической энергии $\Delta p_{\text{пот}}$ используется средняя по количеству движения скорость $\ddot{v}$ [13]:

$$0,5\rho(\ddot{v}_2^2 - \ddot{v}_1^2) = (p_1 - p_2) - \Delta p_{\text{пот}}. \quad (1.8)$$

Выполненный анализ носит только иллюстративный характер, т.к. рассматриваемые скорости чисто условные, не поддающиеся измерению и расчету, но он раскрывает физическую картину процесса.

По Комиссарову А.П. «анализируя работу вентилятора в контуре, будем называть все виды потерь механической энергии движущегося потока газа – с трением о стенки и внутри потока, на вихреобразование, отрывы, местные сопротивления и т. д. - аэродинамическими и разделим их на внутренние Δh_k - потери в рабочем колесе и внешние $\Delta h_{вн}$ - потери в циркуляционном тракте» [46].

«Механическая энергия (мощность привода) передается от ротора к воздуху и сообщает каждой единице объема газа энергию, равную теоретическому напору на выходе рабочего колеса H_r ; фактический (эффективный или полный) напор H_n

будет меньше H_T на величину внутренних аэродинамических потерь Δh_k в проточной части:» [46]

$$H_T = H_{\Pi} + \Delta h_k \text{ [61]}. \quad (1.9)$$

«Эффективный напор расходуется на преодоление сопротивления циркуляционного тракта, т. е. на покрытие внешних потерь $\Delta h_{\text{вн}}$ и полезную работу, необходимую в технологическом процессе $h_{\text{тех}}$ » [46].

«Из потерь $\Delta h_{\text{вн}}$ следует выделить как самостоятельную статью потери кинетической энергии выходящего с большой скоростью из ротора потока, связанные с преобразованием динамического давления в статическое при расширении потока на выходе из проточной части ротора $\Delta h_{\text{вых}}$; остальную часть составляют потери мощности (работы) на трение и местные сопротивления циркуляционного тракта Δh_T :» [46]

$$\Delta h_{\text{вн}} = \Delta h_{\text{вых}} + \Delta h_T. \quad (1.10)$$

«В итоге получаем уравнение баланса энергии, Дж/м³:» [46]

$$H_T = h_{\text{тех}} + \Delta h_k + \Delta h_{\text{вых}} + \Delta h_T. \quad (1.11)$$

«Хотя энергия Δh_T затрачивается на формально полезную работу - перемещение воздуха по контуру, она отнесена к потерям, так как в конечном счете трансформируется в тепло. Таким образом, все три последних слагаемых составляют в сумме аэродинамические потери; они-то и определяют тепловую мощность установки.» [46].

«В циркуляционном тракте скорости потока невелики, не превышают, как правило, 20 м/с, и соответствующие потери с трением о стенки каналов пренебрежимо малы. В проточной части ротора, где развиваются максимальные скорости потока, достигающие до 50 м/с и выше, затраты мощности на трение о диски колеса и в межлопаточных каналах могут быть значительными и их надо учитывать.» [46].

«Статья потерь $\Delta h_{\text{вых}}$ определяется значением динамического напора на выходе колеса и скоростями потока в конце тракта (перед колесом) и также должны учитываться. Основным же источником тепловой энергии являются аэродинамические потери в самом колесе, связанные с изменением характера течения - структуры и скоростей потока в межлопаточных каналах и в особенности на выходе колеса. В роторных нагревателях теплопроизводительность составляет до 90-95 % потребляемой мощности» [46].

Остальная подводимая энергия, за вычетом неизбежных и незначительных потерь в подшипниковых опорах вала, также расходуется полезно, поэтому в РНУ затраченная мощность реализуется практически на 100 % [92].

«По найденной подаче (производительности) L ($\text{м}^3/\text{с}$), полному напору $H_{\text{п}}$ (Па) и мощности $N_{\text{в}}$ (Вт) на валу вентилятора определяют его внутренний КПД» [46]

$$\eta_{\text{в}} = H_{\text{п}} L / N_{\text{в}}. \quad (1.12)$$

«Если пренебречь незначительными по сравнению с $\Delta h_{\text{к}}$ остальными потерями, то разность $1 - \eta_{\text{в}}$ составит общую относительную долю аэродинамических потерь, а так как они эквивалентно преобразуются в тепло, то $N_{\text{в}}(1 - \eta_{\text{в}})$ и является тепловой мощностью ротора» [46].

Таким образом, сушилка ПАПРКТО может быть оснащена дополнительным модулем в виде сушильной шахты, который обеспечит работу в непрерывном режиме сушки с использованием штатного ротора-нагревателя. При необходимости могут разрабатываться дополнительные модули и другого конструктивного исполнения в зависимости от свойств высушиваемого сельскохозяйственного сырья.

Выводы по главе 1

На основе выполненного анализа можно сформулировать следующую **рабочую гипотезу исследования**: сушилка аэродинамического нагрева может

обеспечить режим сушки зерна за счет дополнительного модуля в виде сушильной шахты при организации рециркуляции сушильного агента.

Цель и задачи исследования

Выполненный анализ определил **цель исследования** - разработка технологического процесса сушки зерна в модульной сушилке аэродинамического нагрева с обоснованием параметров её дополнительного модуля.

Задачи исследования:

1. На основе анализа конструкций зерносушилок обосновать конструктивно-технологическую схему дополнительного модуля сушилки аэродинамического нагрева.
2. Разработать математическую модель зависимости температуры сушильного агента от параметров модульной сушилки аэродинамического нагрева.
3. Исследовать влияние параметров модульной сушилки на температуру сушильного агента в режиме сушки зерна.
4. Произвести производственную проверку и технико-экономическую оценку предлагаемых решений.

Поставленные задачи решались во взаимодействии с решением задач по обоснованию параметров и режимов работы выпускного устройства сушильной шахты модульной сушилки аэродинамического нагрева соискателем Ялзой А.Г., т.к. предварительные исследования показали, что в модульной сушилке аэродинамического нагрева режимы работы базового модуля, сушильной шахты и ее выпускного устройства оказывают большое взаимное влияние.

Глава 2 Теоретическое обоснование параметров модульной сушилки аэродинамического нагрева

2.1 Обоснование конструктивно-технологической схемы модульной сушилки аэродинамического нагрева

Использование сушильной камеры сушилки ПАПРКТО (базового модуля) (рис. 2.1) для сушки зерна технологически затруднительно и явно не эффективно, поэтому необходима разработка внешнего дополнительного модуля.

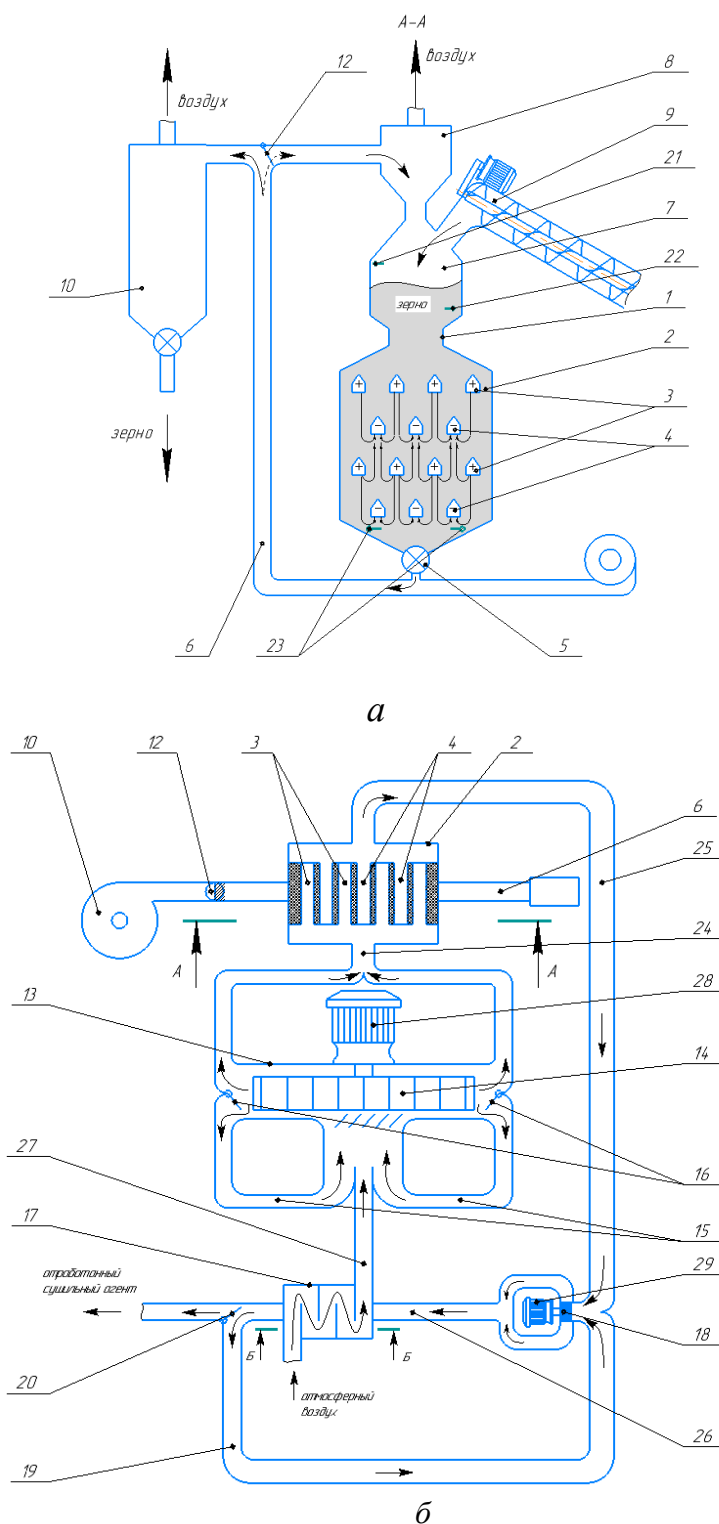


Рисунок 2.1 - Сушильная камера, заправленная нарезанными яблоками

Для разработки конструктивно-технологической схемы модульной зерносушилки провели анализ соответствующих патентов на полезные модели [70, 71, 75].

Схема зерносушилки с генератором теплоты аэродинамического типа по патенту [70] представлена на рис. 2.2.

Она включает в себя сушильную шахту 2, нагревательный ротор 14, пневмотранспортную систему рециркуляции и разгрузки зерна 6, теплообменник 17, дополнительный нагревательный ротор 18.



1 - теплоизолированная камера; 2 - сушильная шахта; 3 - подающие короба; 4 - отводящие короба; 5 - шлюзовой затвор; 6 - пневмотранспортер; 7 - зерновой бункер; 8 - загрузочный циклон; 9 - загрузочный шнековый транспортер; 10 - разгрузочный циклон; 11 - воздушная камера; 12 - заслонка; 13 - центробежный вентилятор; 14 - нагревательный ротор; 15 - каналы рециркуляции; 16 - заслонки; 17 - теплообменный аппарат; 18 - дополнительный нагревательный ротор; 19 - канал рециркуляции; 20 - заслонка; 21 - верхний датчик уровня зерна; 22 - нижний датчик уровня зерна; 23 - датчик влажности зерна; 24, 25, 26, 27 - воздуховоды; 28, 29 - приводные электродвигатели

Рисунок 2.2 - Схема работы сушилки: *а* - схема движения зерна в сушилке, *б* - схема движения сушильного агента в сушилке [70]

Несмотря на наличие рециркуляционных каналов у обоих роторов, сушильный агент не рециркулируется через сушильную шахту и основной нагрев должен получить в теплообменнике 17, т.к. по данным [38] практически однократный в этом случае (не считая подмешивание части сушильного агента, циркулирующего по каналам рециркуляции основного ротора) проход сушильного агента через нагревательный ротор повышает его температуру примерно на 10 °С.

Такая схема требует теплообменник значительных размеров, соответствующей мощности приводного электродвигателя дополнительного нагревательного ротора, что усложняет конструкцию сушилки, увеличивает гидравлическое сопротивление входного воздушного тракта.

При этом должна быть определенная согласованность производительностей роторов для обеспечения требуемого расхода сушильного агента через сушильную шахту и отработанного сушильного агента через теплообменник.

По данным Акулича П.В. «при использовании в качестве сушильного агента воздуха рециркуляцию осуществляют по двум схемам:

1) часть отработанного воздуха возвращается на вход калорифера, смешивается с атмосферным воздухом и подогревается в калорифере до требуемой температуры (рис. 2.3 а);

2) часть отработанного воздуха возвращается в зону после калорифера, смешивается с нагретым в калорифере свежим воздухом и затем подается в сушильную камеру» [5] (рис. 2.3 б).

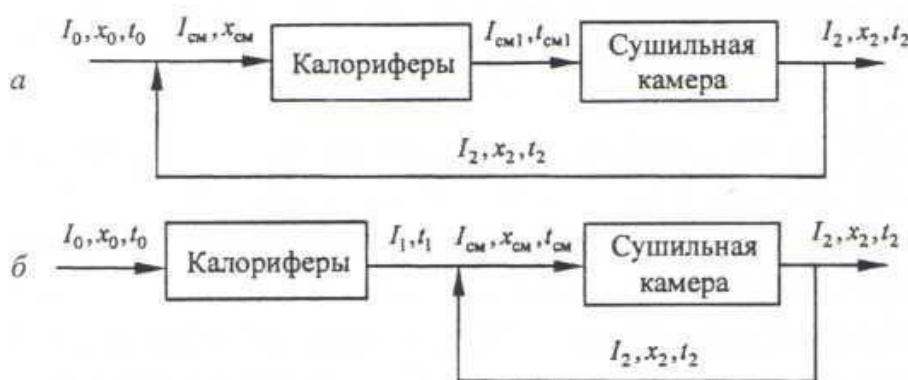
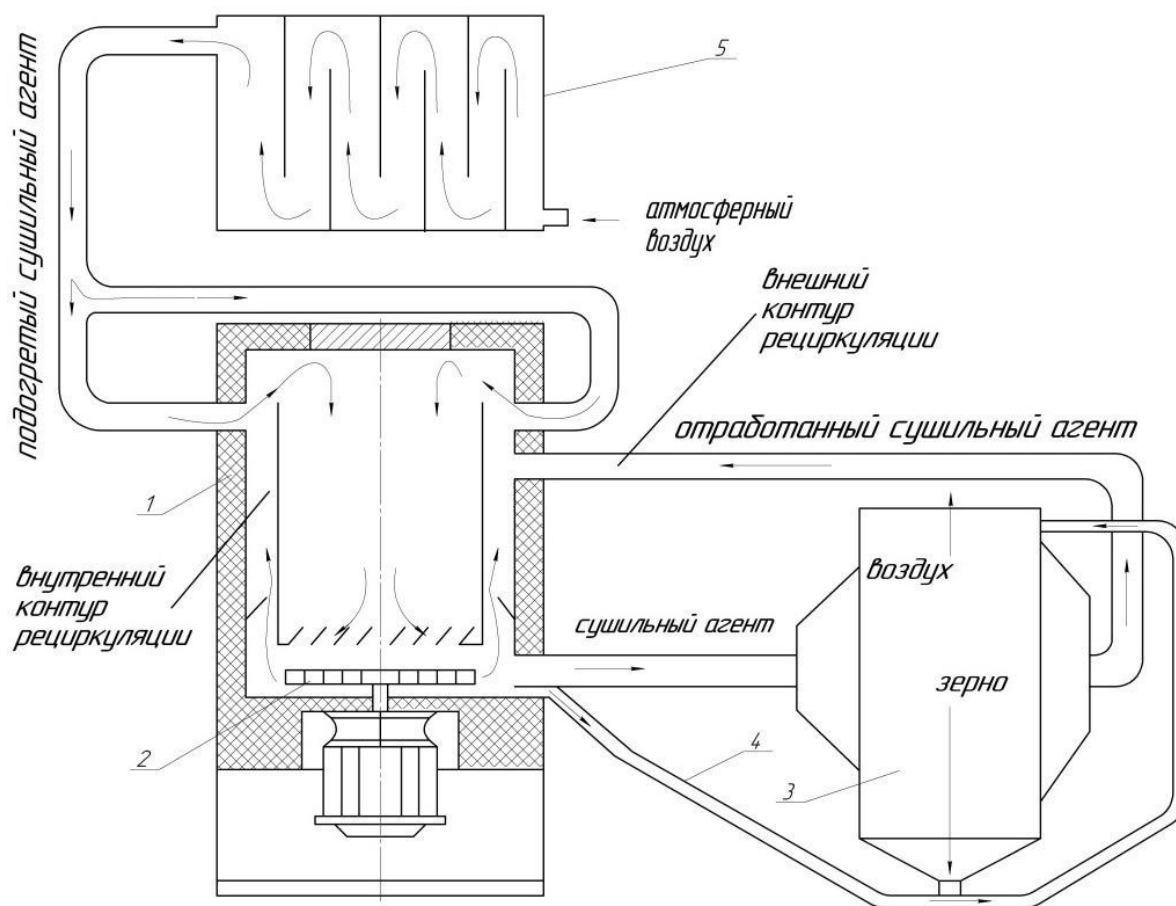


Рисунок 2.3 - Схемы рециркуляции сушильного агента [5]

При этом, по Акуличу П.В. «под коэффициентом рециркуляции k понимается отношение массового количества абсолютно сухого отработанного рециркулирующего теплоносителя к поступающему абсолютно сухому теплоносителю (абсолютно сухому атмосферному воздуху) [5].

Поэтому, учитывая конструктивные особенности сушилки ПАПРКТО, на основе выдвинутой рабочей гипотезы исследования предложили конструктивно-технологическую схему модульной сушилки в следующем виде (рис. 2.4).



«1 – базовый модуль (сушильная камера для сушки плодово-ягодного сырья); 2 – ротор-нагреватель; 3 – дополнительный модуль (сушильная шахта для зерна); 4 – пневмотранспортер; 5 – солнечный коллектор» [66]

Рисунок 2.4 – Конструктивно-технологическая схема модульной сушилки» [66]

В предлагаемой схеме используется только один ротор-нагреватель и двухконтурная схема рециркуляции сушильного агента. Внешний – воздуховодами, соединяющими дополнительный модуль с базовым. Внутренний контур, замыкающий вход и выход ротора-нагревателя каналами базового модуля, обеспечивает постоянное наличие в нем нагретого циркулирующего сушильного агента, смешивающегося с поступающим через солнечный коллектор атмосферным воздухом и отводимым из сушильной шахты отработанным сушильным агентом.

Внешний контур, образуемый воздуховодами, соединяющими дополнительный модуль с базовым, обеспечивает подачу сушильного агента из рабочей камеры ротора-нагревателя через сушильную шахту и отвод его в циркуляционный тракт базового модуля, где происходит смешивание всех воздушных потоков [93].

Сброс части отработанного сушильного агента предлагается обеспечить за счет работы пневмотранспортера с разгрузочным циклоном и зерно-отбойным фартуком с фильтрующим ограждением в загрузочном бункере сушильной шахты [19].

Для пневмотранспортирования зерна будет производится отбор сушильного агента из камеры ротора.

Т.к. скорость воздушного потока в циркуляционном тракте базового модуля составляет около 20 м/с, то при средней скорости витания зерна пшеницы порядка 8,9...11,5 м/с [36] и небольшой длине материалопровода пневмотранспортера это вполне осуществимо.

Таким образом, ротор-нагреватель будет обеспечивать нагрев сушильного агента, его нагнетание в сушильную шахту и отвод из нее, а также работу пневмотранспортера. Такая схема упрощает конструкцию сушилки, уменьшает количество силовых приводов, но усложняет организацию движения воздушных потоков в сушилке.

Отбор сушильного агента можно осуществить через смотровое окно рабочей камеры ротора-нагревателя (рис. 2.5). Оно использовалось в случае

необходимости при работе базового модуля в режиме сушки яблок для увеличения сброса увлажненного сушильного агента в начальный период сушки, когда его влажность достигает 100 %.

Для подогрева приточного атмосферного воздуха на крыше сушилки имеется комбинированный теплообменник. При работе базового модуля в него подается отработанный сушильный агент. При работе дополнительного модуля сушильный агент туда не подается, но приточный атмосферный воздух подогревается за счет солнечного коллектора, составляющего его верхнюю камеру.

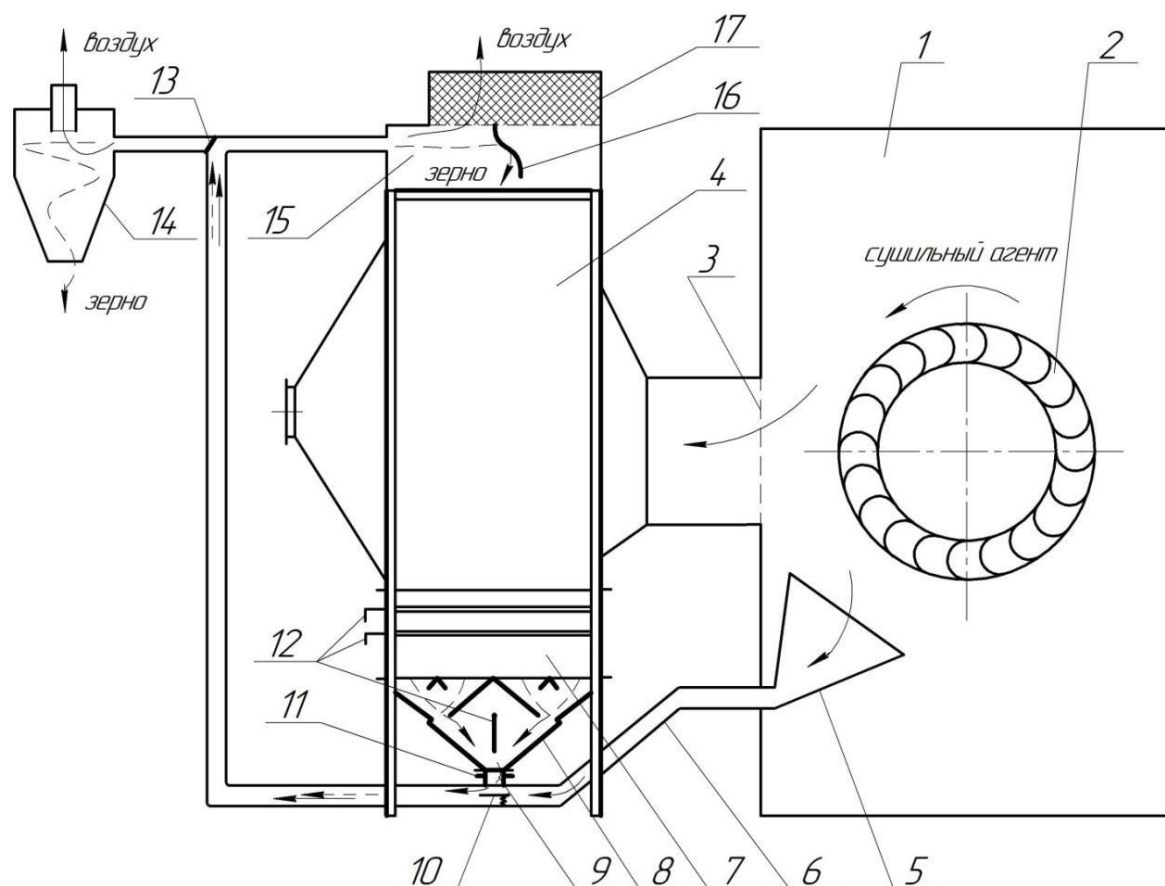


Рисунок 2.5 - Смотровое окно рабочей камеры ротора-нагревателя

Таким образом, конструктивно-технологическая схема дополнительного модуля должна иметь вид, представленный на рис. 2.6.

Обоснование параметров и исследование работы выпускного устройства сушильной шахты выполнено совместно с Ялзой А.Г. и отражено в публикациях [19, 44, 45, 49, 59, 61, 62, 73, 99].

Установлено, что материалопровод пневмотранспортера должен иметь прямоугольное сечение размером 120×60 мм, а под выпускным отверстием бесприводного выпускного устройства механического типа должен быть установлен пассивный вибратор [19].



1 – рабочая камера ротора-нагревателя; 2 – ротор-нагреватель; 3 – смотровое окно рабочей камеры; 4 – сушильная шахта; 5 – воздухозаборник пневмотранспортера; 6 – материалопровод пневмотранспортера; 7 – верхний бункер бесприводного выпускного устройства; 8 – нижний бункер бесприводного выпускного устройства; 9 – выпускное отверстие; 10 – приемное устройство пневмотранспортера; 11 – зерновые заслонки; 12 – клапана бесприводного выпускного устройства; 13 – переключатель потока; 14 – разгрузочный циклон; 15 – зерновой бункер; 16 – зерно-отбойный фартук; 17 – фильтрующее ограждение

Рисунок 2.6 – Конструктивно-технологическая схема дополнительного модуля [19]

2.2 Обоснование параметров сушильной шахты

При обосновании параметров сушильной шахты необходимо определиться, прежде всего, с ее поперечным сечением. Размеры поперечного сечения шахты зависят от параметров выпускного устройства. Дополнительный модуль сушилки

присоединяется к смотровому окну камеры ротора-нагревателя, нижняя кромка которого располагается на высоте 0,9 м от уровня земли (рис. 2.7) [60].

Соответственно в пределах этой высоты должно разместиться выпускное устройство сушилки.



Рисунок 2.7 – Вид на смотровое окно сушилки ПАПРКТО

Рассмотрим расчетную схему на рис. 2.8.

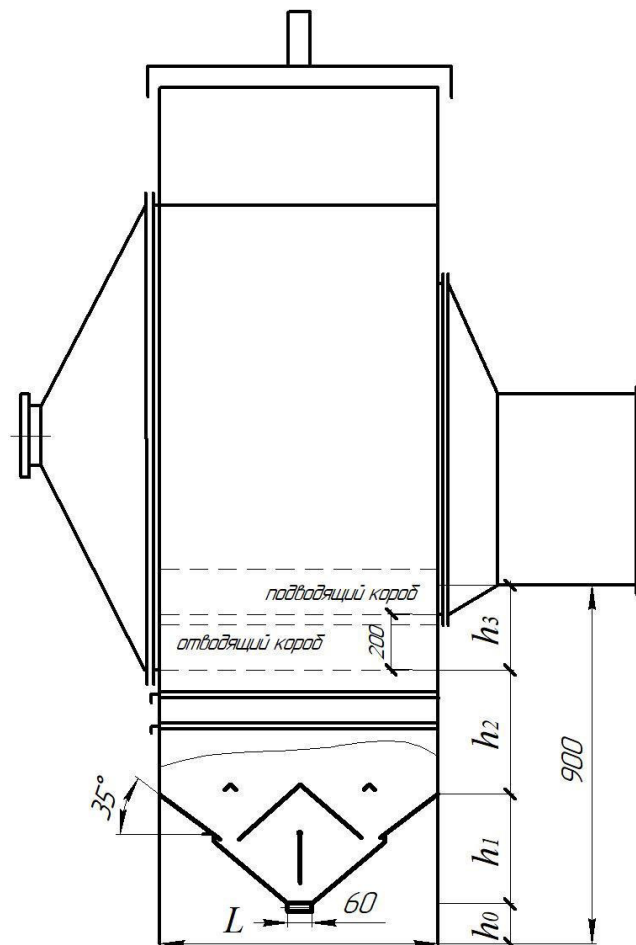


Рисунок 2.8 – Расчетная схема сушильной шахты (в мм)

Общая располагаемая высота 900 мм складывается из расстояния h_0 (высота для размещения выпускного патрубка с материалопроводом пневмотранспортера, принимаем 200 мм), высоты нижнего бункера h_1 , высоты верхнего бункера h_2 , высоты h_3 от низа отводящего короба до примерно середины подводящего короба [60].

Для упрощения и удешевления конструкции принимаем наиболее простую форму коробов по типу зерносушилки ДСП (рис. 2.9).

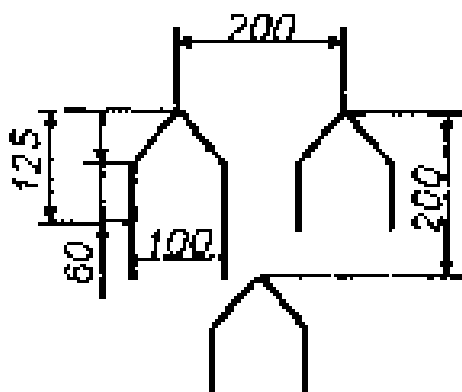


Рисунок 2.9 – Размеры коробов сушильной шахты (в мм) [6]

Тогда высота h_3 будет равна 250 мм. Таким образом, на общую высоту бесприводного выпускного устройства отводится примерно 450 мм.

Длина коробов и соответственно длина сушильной шахты будет определяться длиной нижнего бункера бесприводного выпускного устройства. Примем, что высоты бункеров одинаковы, т.е. $h_1 = h_2 = 450/2 = 225$ мм.

Сечение выпускного патрубка примем квадратное размером 60х60 мм. Такая ширина выпускного отверстия у зерносушилки А1-УЗМ.

Учитывая, что угол естественного откоса для пшеницы составляет 28...30°, угол наименьшего наклона самотека - 36° [36], при работе сушилки присутствует вибрация корпуса сушильной шахты и движение воздуха в слое зерна, принимаем угол наклона скатных поверхностей бесприводного выпускного устройства равным 35°.

Тогда, длина сушильной шахты L в поперечном сечении будет равна:

$$L = 2 \left(\frac{225}{\tan 35^\circ} + \frac{60}{2} \right) = 703 \text{ мм.} \quad (2.1)$$

Аналогично, ширина сушильной шахты будет определяться шириной верхнего бункера бесприводного выпускного устройства, что при тех же исходных значениях ширины выпускного отверстия верхней секции 60 мм и угла наклона скатных поверхностей 35° будет равно 703 мм.

Таким образом, максимальный размер поперечного сечения сушильной шахты может быть равен 700х700 мм.

Однако в 700 мм ширины шахты должна вписаться кратно ширина коробов шахты. Учитывая принятую схему размещения коробов (см. рис. 2.7) через 200 мм, вместо 700 мм окончательно принимаем ширину сушильной шахты равной 600 мм (рис. 2.10).

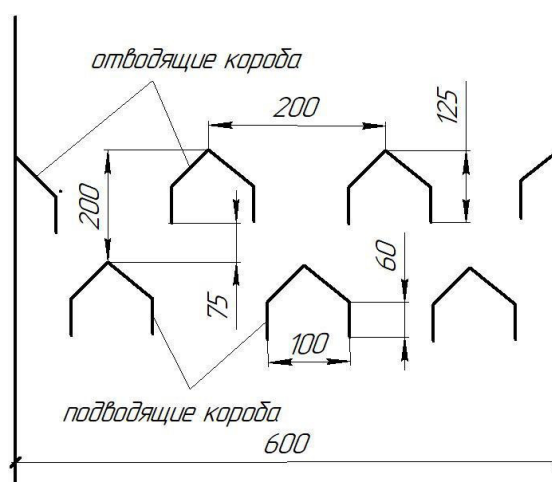


Рисунок 2.10 – Схема размещения коробов по ширине шахты

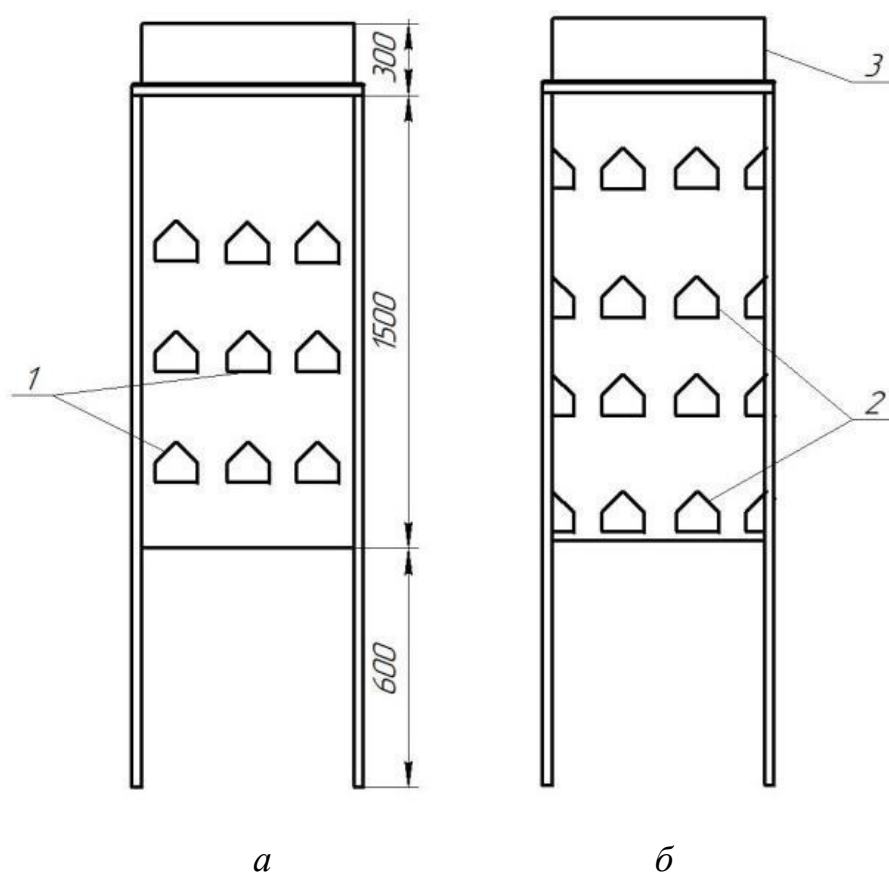
Полученное значение длины коробов 700 мм несколько меньше, чем, например, сушилки А1-УЗМ, у которой длина коробов составляет 1 м. Ширина же шахты может быть увеличена установкой нескольких модулей со своими выпускными устройствами. Но в этом случае ограничивающим фактором является установленная мощность привода ротора-нагревателя.

Высоту шахты определим из следующих соображений. При высоте сушилки ПАПРКТО в пределах 2 м, желательной ее относительной мобильности

в плане перемещения на другое место использования высота дополнительного модуля, т.е. сушильной шахты также должна укладываться в эти пределы. При этом необходимо также учитывать удобство загрузки и разгрузки сушильной шахты соответствующими техническими средствами.

Таким образом, исходя из общей высоты шахты в пределах около 2-х метров и отведенных 0,5 м на размещение бесприводного выпускного устройства, высота сушильной шахты должна быть в пределах 1,5 м.

Учитывая принятую схему размещения коробов, необходимость наличия в верхней части шахты загрузочного зернового бункера, предотвращающего, в том числе, выход сушильного агента через верх шахты и подсос атмосферного воздуха в верхние отводящие короба общая схема сушильной шахты будет иметь вид, представленный на рис. 2.11.



1 – подводящие короба; 2 – отводящие короба; 3 – загрузочный зерновой бункер

Рисунок 2.11 – Схема размещения коробов сушильной шахты: а – вид шахты со стороны подающих коробов; б - вид шахты со стороны отводящих коробов

На рис. 2.12 представлены схемы с основными конструктивными параметрами верхнего и нижнего бункеров бесприводного выпускного устройства механического типа. Общая высота устройства составила 0,576 м.

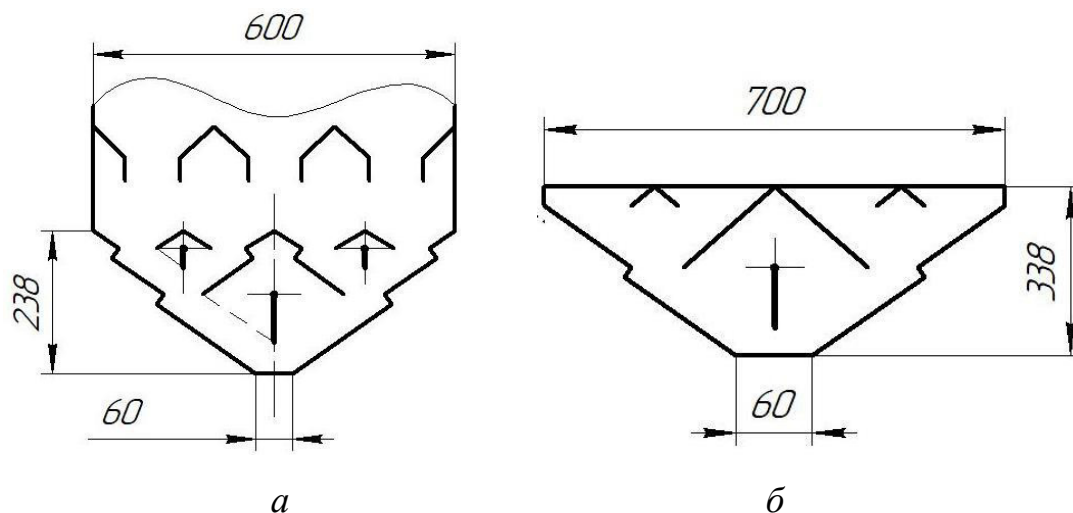


Рисунок 2.12 – Схемы верхнего (а) и нижнего (б) бункеров выпускного устройства

«Объем сушильной шахты без учёта объема бесприводного выгрузного устройства составляет $0,63 \text{ м}^3$ при габаритных размерах шахты $0,7 \times 0,6 \times 1,5 \text{ м}$. Для подачи сушильного агента в шахту предусмотрено 9 подводящих коробов, 8 отводящих полных коробов и 8 полукоробов» [78].

Определим расчетную массу зерна, которая может быть размещена в сушильной шахте.

Учитывая размеры короба и то, что под ним образуется не занятое зерном пространство треугольной формы, образованное скатами зерна под углом естественного откоса 30° , объем, занимаемый одним коробом в общем объеме сушильной шахты, будет равен $0,0065 \text{ м}^3$. С учетом 21 короба общий объем, занимаемый коробами, составит $0,166 \text{ м}^3$ [18].

При объеме бесприводного выпускного устройства $0,1 \text{ м}^3$ суммарный объем пустот под рассекателями бесприводного выпускного устройства равен $0,025 \text{ м}^3$. Объем загрузочного зернового бункера при высоте слоя зерна $0,15 \text{ м}$ равен $0,063 \text{ м}^3$.

Тогда, общий объем, занимаемый зерном в сушильной шахте, составит 0,6 м³. При насыпной плотности пшеницы от 650 до 810 кг/м³ [36] масса зерна в сушильной шахте составит 390...486 кг.

2.3 Математическая модель параметров рециркулирующего сушильного агента

На рис. 2.13 «представлена структурно-функциональная схема модульной сушилки аэродинамического нагрева при организации двухконтурной рециркуляции сушильного агента» [93].

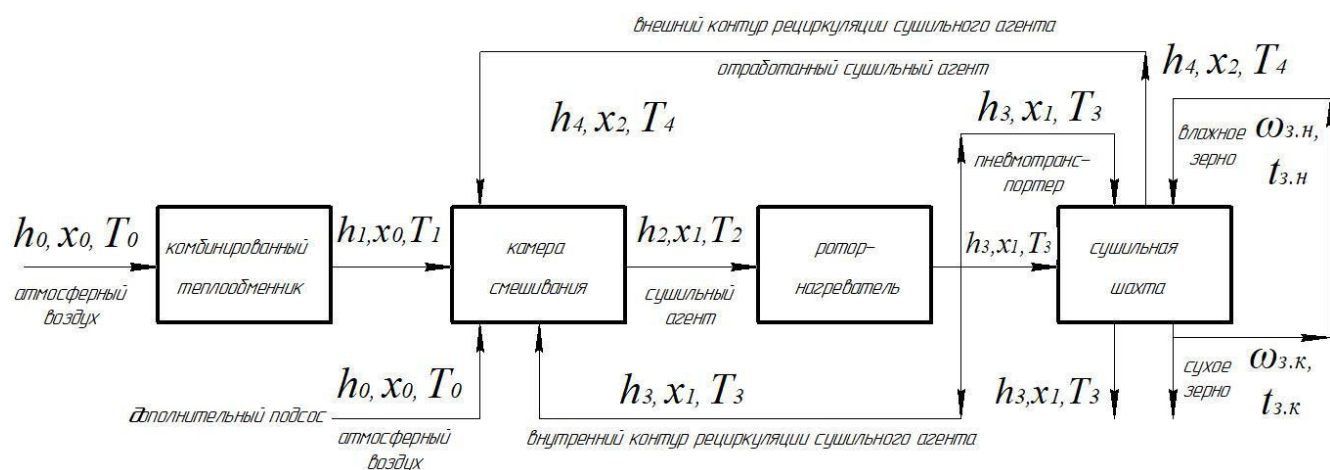
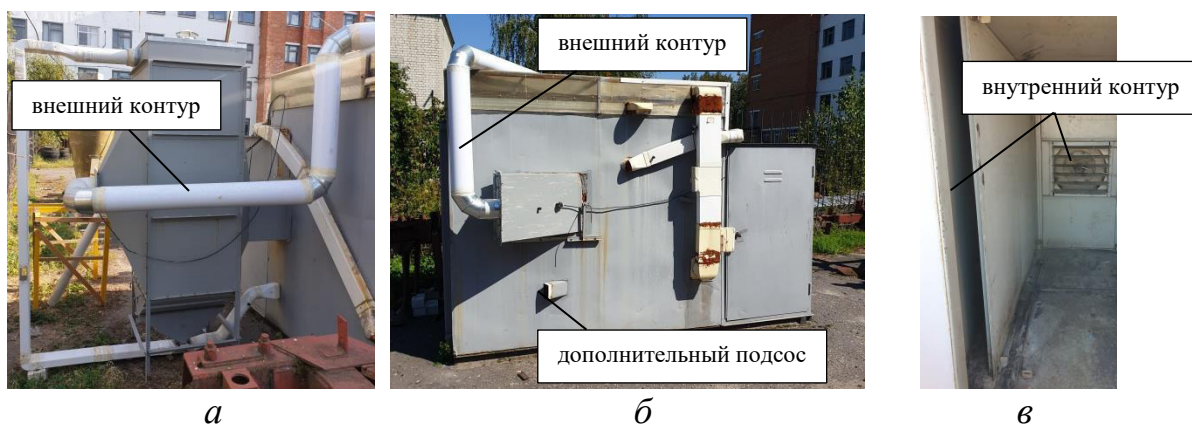


Рисунок 2.13 – Структурно-функциональная схема модульной сушилки аэродинамического нагрева [93]

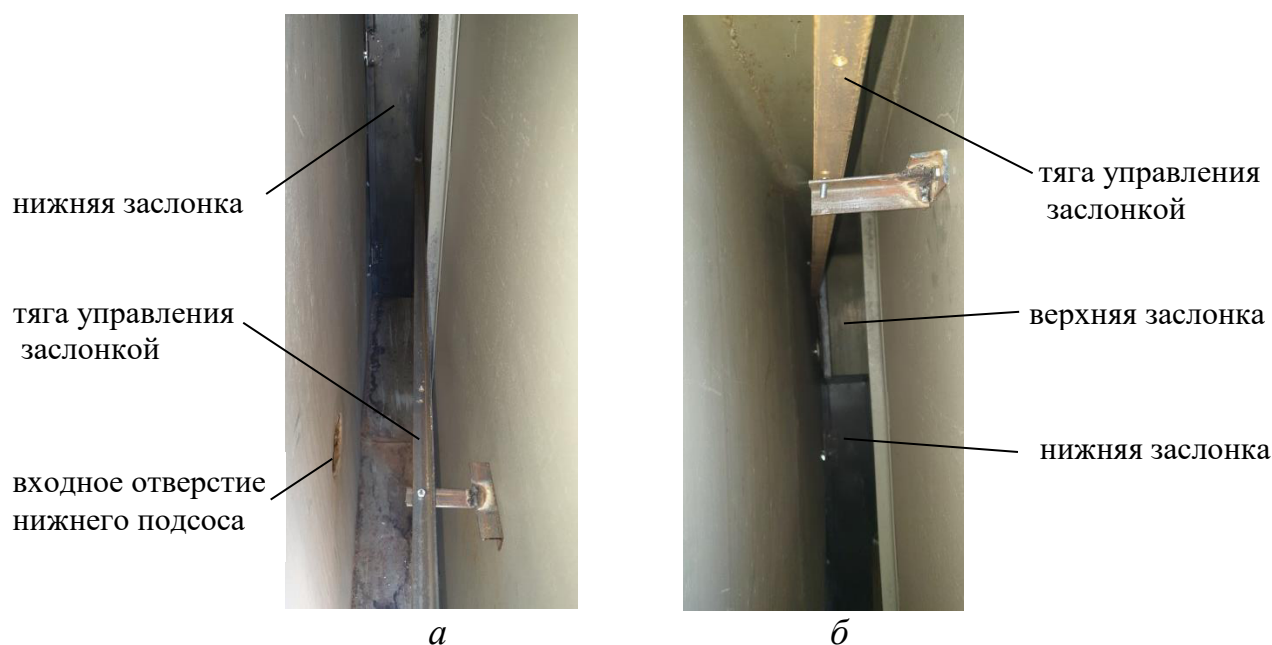
Подсасываемый в сушилку атмосферный воздух подогревается в комбинированном теплообменнике, использующем теплоту солнечной энергии [51, 54]. При необходимости увеличения расхода воздуха в камере смешивания (сушильная камера базового модуля) имеется дополнительный входной патрубок.

Необходимо «установление зависимости температуры сушильного агента в модульной сушилке аэродинамического нагрева при организации его двухконтурной рециркуляции» [93].

«Циркуляционные каналы сушильной камеры, используемые в режиме сушки плодово-ягодного сырья, в режиме сушки зерна образуют внутренний контур рециркуляции (рис. 2.14), перекрытый в нижней части поворотными заслонками, закрепленными на боковых стенках сушильной камеры (рис. 2.15). В верхней части циркуляционных каналов заслонки приоткрыты, что создает внутренний контур рециркуляции сушильного агента» [93].



«Рисунок 2.14 – Рециркуляция сушильного агента: *а, б* – внешний контур рециркуляции; *в* - внутренний контур рециркуляции» [93]



«Рисунок 2.15 – Внутренний контур рециркуляции: *а* – вид на нижнюю заслонку; *б* – вид на верхнюю заслонку» [93]

В режиме сушки плодово-ягодного сырья все заслонки открыты [93].

В режиме сушки зерна нижние заслонки закрыты. «Это обеспечивает необходимый подпор для нормальной работы пневмотранспортера» [93].

«В верхней части циркуляционных каналов заслонки приоткрыты, что создает внутренний контур рециркуляции сушильного агента» [93]. Это позволяет регулировать степень нагрева сушильного агента и коэффициент рециркуляции. «Часть сушильного агента постоянно циркулирует по внутреннему контуру рециркуляции. Увеличение расхода воздуха за счет внутреннего контура рециркуляции приводит к росту потребляемой мощности на привод ротора-нагревателя, а, следовательно, к увеличению преобразования электрической энергии в тепловую» [93].

«Уравнение теплового баланса сушилки за бесконечно малый промежуток времени dt :

$$dQ_{\text{кт}} + dQ_{\text{под}} + dQ_{\text{рн}} = dQ_{\text{зер}} + dQ_{\text{п}} + dQ_{\text{ст}} + dQ_{\text{пт}}, \text{ кДж}, \quad (2.2)$$

где $dQ_{\text{кт}}$ - количество теплоты, воспринятой сушильным агентом (атмосферным воздухом) в комбинированном теплообменнике;

$dQ_{\text{под}}$ - количество теплоты, поступившей с подсасываемым атмосферным воздухом через дополнительный патрубок;

$dQ_{\text{рн}}$ - количество теплоты, полученной в рабочей камере ротора-нагревателя;

$dQ_{\text{зер}}$ - количество теплоты, идущей на нагрев зерна;

$dQ_{\text{п}}$ - потери теплоты в окружающую среду через ограждения сушильной шахты;

$dQ_{\text{ст}}$ - количество теплоты, идущей на нагрев стенок и коробов сушильной шахты;

$dQ_{\text{пт}}$ - потери теплоты с воздушным потоком пневмотранспортера сушилки» [93].

«Определим выражения составляющих теплового баланса.

Количество теплоты, воспринятой сушильным агентом (атмосферным воздухом) в комбинированном теплообменнике

$$dQ_{\text{кт}} = L_0 h_1 dt = (L_{\text{пв}} + L_{\text{пн}}) h_1 dt, \quad (2.3)$$

где L_0 – расход атмосферного воздуха, кг с.в./с;

h_1 - энтальпия подогретого атмосферного воздуха, кДж/кг с.в.;

$L_{\text{пв}}$ – расход атмосферного воздуха через верхний подсос, кг с.в./с;

$L_{\text{пн}}$ - расход атмосферного воздуха через нижний подсос, кг с.в./с.

Энтальпия подогретого атмосферного воздуха может быть представлена в виде (Акулич П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. Мн.: Беларусь. Навука, 2010. 443 с.):

$$h_1 = c_0 T_1 + x_0 (r_0 + c_{\text{п}} T_1), \quad (2.4)$$

где c_0 - теплоёмкость сухого воздуха, кДж/(кг·°C);

T_1 – температура подогретого атмосферного воздуха на выходе из комбинированного теплообменника, °C;

x_0 – начальное влагосодержание сушильного агента (атмосферного воздуха), кг/кг с.в.;

r_0 – удельная теплота парообразования при температуре 0 °C, кДж/кг;

$c_{\text{п}}$ – теплоёмкость пара, кДж/(кг·°C).

Примем, что температура подогретого атмосферного воздуха на выходе из комбинированного теплообменника находится в прямой зависимости от его исходной температуры, т.е.:

$$T_1 = a_1 T_0 + b_1, \quad (2.5)$$

где a_1, b_1 - эмпирические коэффициенты;

T_0 - температура окружающей среды в период сушки, °С.

Подставим выражения (2.4) и (2.5) в (2.3), проведем преобразования и получим:

$$dQ_{\text{кт}} = k_0 dt, \quad (2.6)$$

где

$$k_0 = (L_{\text{пв}} + L_{\text{пн}})(c_0(a_1 T_0 + b_1) + x_0(r_0 + c_{\text{п}}(a_1 T_0 + b_1))) \quad [93]. \quad (2.7)$$

Количество теплоты, поступившей с подсасываемым атмосферным воздухом

$$dQ_{\text{под}} = L_{\text{под}} h_0 dt = k_1 dt, \quad (2.8)$$

где $L_{\text{под}}$ – расход подсасываемого атмосферного воздуха, кг/с;

h_0 - энтальпия подсасываемого атмосферного воздуха, кДж/кг с.в.;

$$k_1 = L_{\text{под}}(c_0 T_0 + x_0(r_0 + c_{\text{п}} T_0)) \quad [93]. \quad (2.9)$$

Количество теплоты, полученной в рабочей камере ротора-нагревателя

$$dQ_{\text{рн}} = N(1 - \eta)dt = k_2 dt, \quad (2.10)$$

где N – мощность привода ротора-нагревателя, кВт;

η – КПД ротора-нагревателя;

$$k_2 = N(1 - \eta) [93]. \quad (2.11)$$

Количество теплоты, идущей на нагрев зерна

$$dQ_{\text{зер}} = M_3 c_3 dT_{\text{зер}}, \quad (2.12)$$

где M_3 – масса зерна в сушильной шахте, кг;

c_3 – теплоемкость зерна, кДж/(кг·°C);

$T_{\text{зер}}$ – температура зерна, °C.

Примем, что температура зерна находится в прямой зависимости от температуры сушильного агента, т.е.:

$$T_{\text{зер}}(t) = a_2 T_3(t) + b_2, \quad (2.13)$$

где a_2 , b_2 – эмпирические коэффициенты;

$T_3(t)$ – температура сушильного агента, °C.

Тогда

$$dT_{\text{зер}} = a_2 dT_3(t). \quad (2.14)$$

С учетом выражения (2.14) зависимость (2.12) будет иметь вид:

$$dQ_{\text{зер}} = M_3 c_3 a_2 dT_3(t) = k_3 dT_3(t), \quad (2.15)$$

где

$$k_3 = M_3 c_3 a_2. \quad (2.16)$$

Потери теплоты в окружающую среду через ограждения сушильной шахты

$$dQ_{\Pi} = kF(T_{\text{ст}}(t) - T_0)dt, \quad (2.17)$$

где k – коэффициент теплопередачи через стенки сушильной шахты, кВт/(м²·°С);

F – площадь наружной поверхности сушильной шахты, м²;

$T_{\text{ст}}(t)$ – температура стенок комбинированного теплообменника в зависимости от времени в период сушки, °С.

Примем, что температура стенок и коробов сушильной шахты находится в прямой зависимости от температуры сушильного агента, т.е.:

$$T_{\text{ст}}(t) = a_{\text{ст}} T_3(t) + b_{\text{ст}}, \quad (2.18)$$

где $a_{\text{ст}}$, $b_{\text{ст}}$ – эмпирические коэффициенты.

Выражение (2.17) с учетом зависимости (2.18) будет иметь вид:

$$dQ_{\Pi} = kFa_{\text{ст}}T_3(t)dt + k_4dt, \quad (2.19)$$

где

$$k_4 = kF(b_{\text{ст}} - T_0). \quad (2.20)$$

Количество теплоты, идущей на нагрев стенок и коробов сушильной шахты,

$$dQ_{\text{ст}} = M_{\text{ст}}c_{\text{ст}}dT_{\text{ст}}, \quad (2.21)$$

где $M_{\text{ст}}$ – масса стенок и коробов сушильной шахты, кг;

$c_{\text{ст}}$ – теплоёмкость материала стенок и коробов сушильной шахты, кДж/(кг·°С);

$dT_{\text{ст}}$ – приращение температуры стенок и коробов сушильной шахты, °С.

Из выражения (2.18)

$$dT_{\text{ст}} = a_{\text{ст}} dT_3(t). \quad (2.22)$$

С учетом выражения (2.22) зависимость (2.21) будет иметь вид:

$$dQ_{\text{ст}} = M_{\text{ст}} c_{\text{ст}} a_{\text{ст}} dT_3(t) = k_5 dT_3(t), \quad (2.23)$$

где

$$k_5 = M_{\text{ст}} c_{\text{ст}} a_{\text{ст}}. \quad (2.24)$$

Потери теплоты с воздушным потоком пневмотранспортера сушилки

$$dQ_{\text{пт}} = L_{\text{пт}} h_3(t) dt, \quad (2.25)$$

где $h_3(t)$ - энтальпия сушильного агента, кДж/кг с.в. [93].

Энтальпия сушильного агента

$$h_3(t) = c_0 T_3(t) + x_1 (r_0 + c_{\text{п}} T_3(t)), \quad (2.26)$$

где x_1 – влагосодержание сушильного агента, кг/кг с.в.

Влагосодержание сушильного агента при его рециркуляции (Акулич П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. Мн.: Беларус. Навука, 2010. 443 с.):

$$x_1 = \frac{x_0 + k_{\text{п}} x_2}{k_{\text{п}} + 1}. \quad (2.27)$$

Выражение (2.25) с учетом зависимостей (2.26) и (2.27) будет иметь вид:

$$dQ_{\text{пт}} = L_{\text{пт}} (c_0 T_3(t) + \frac{r_0 + c_{\text{п}} T_3(t)}{k_{\text{п}} + 1} (x_0 + k_{\text{п}} x_2)) dt. \quad (2.28)$$

Тогда, подставив выражения составляющих теплового баланса (2.6), (2.8), (2.10), (2.15), (2.19), (2.23) и (2.28) в уравнение (2.2), после преобразований получим:

$$k_8 T_3(t)dt + k_{10} x_2 T_3(t)dt + k_7 dT_3(t) + k_9 x_2 dt - k_6 dt = 0, \quad (2.29)$$

где

$$k_6 = k_0 + k_1 + k_2 - L_{\text{пт}} \frac{r_0 x_0}{k_p + 1} - k_4; \quad (2.30)$$

$$k_7 = k_3 + k_5; \quad (2.31)$$

$$k_8 = kF a_{\text{ст}} + L_{\text{пт}} (c_0 + \frac{c_{\text{п}} x_0}{k_p + 1}); \quad (2.32)$$

$$k_9 = L_{\text{пт}} \frac{r_0 k_p}{k_p + 1}; \quad (2.33)$$

$$k_{10} = L_{\text{пт}} \frac{c_{\text{п}} k_p}{k_p + 1}. \quad (2.34)$$

В полученную зависимость (2.29) входит влагосодержание отработанного сушильного агента x_2 , которое имеет переменное значение на протяжении процесса сушки.

На основании (Акулич П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. Мн.: Беларус. Навука, 2010. 443 с.) влагосодержание отработанного сушильного агента можно определить по формуле:

$$x_2 = \frac{h_3(t) - x_0 \Delta - c_0 T_4(t)}{-\Delta + c_{\text{п}} T_4(t) + r_0}, \quad (2.35)$$

где Δ – величина, характеризующая действительный процесс сушки, кДж/кг;

$T_4(t)$ – температура отработанного (рециркулирующего) сушильного агента, °С» [93].

«Температуру отработанного (рециркулирующего) сушильного агента $T_4(t)$ представим в виде прямой зависимости от температуры сушильного агента:

$$T_4(t) = a_4 T_3(t) + b_4, \quad (2.36)$$

где a_4, b_4 - эмпирические коэффициенты» [18].

«Для рассматриваемого случая

$$\Delta = c_v T_{\text{зер.н}} - (q_{\text{зер}} + q_{\text{п}}), \quad (2.37)$$

где c_v – теплоемкость воды, кДж/(кг·°C);

$T_{\text{зер.н}}$ – температура зерна в начале процесса сушки, °C;

$q_{\text{зер}}$ – расход теплоты на нагрев зерна, кДж/кг влаги;

$q_{\text{п}}$ - потери теплоты в окружающую среду через ограждения сушильной шахты, кДж/кг влаги» [93].

«Расход теплоты на нагрев зерна в расчете на общее «количество удаляемой влаги представим в виде:

$$q_{\text{зер}} = \left(\frac{M_3}{W_{\text{в}}} - 1\right) c_{\text{з.к}} (T_{\text{зер.к}}(t) - T_{\text{зер.н}}), \quad (2.38)$$

где $W_{\text{в}}$ – общее количество удаляемой влаги, кг.

Общее количество удаляемой влаги» [93]

$$W_{\text{в}} = M_3 \left(1 - \frac{\omega_{\text{з.н}}}{100}\right) \left(\frac{\omega_{\text{з.н}}}{100 - \omega_{\text{з.н}}} - \frac{\omega_{\text{з.к}}}{100 - \omega_{\text{з.к}}}\right), \quad (2.39)$$

где $\omega_{\text{з.н}}, \omega_{\text{з.к}}$ – соответственно, начальная и конечная влажность зерна, %.

Теплоемкость зерна в зависимости от его влажности определяется по формуле [5]:

$$c_{3.к} = \frac{c_c(100-\omega_{3.к})}{100} + c_B \omega_{3.к}/100, \quad (2.40)$$

где c_c – удельная теплоемкость сухого зерна, кДж/(кг·К);

c_B – воды, кДж/(кг·К).

«Потери теплоты в окружающую среду через ограждения сушильной шахты в расчете на количество удаляемой влаги» [93] W , кг/ч, «представим в виде:

$$q_{\pi} = 3,6 \frac{kF}{W} (T_{ст}(t) - T_0) \quad [93]. \quad (2.41)$$

«Количество удаляемой влаги представим в функции от времени сушки в виде:

$$W = a_c t + b_c, \quad (2.42)$$

где a_c, b_c - эмпирические коэффициенты» [93].

«Тогда, выражение (2.35) с учетом зависимостей (2.36-2.42) после преобразований будет иметь вид:

$$x_2 = \frac{T_3(t)k_{24} - (a_c t + b_c)(k_{26} + k_{29}T_3(t)) - k_{25}}{(a_c t + b_c)(k_{27} - k_{28}T_3(t)) + k_{13}T_3(t) + k_{18}}, \quad (2.43)$$

где

$$k_{11} = T_{з.ер.н} \left(c_B + c_{3.к} \left(\frac{M_3}{W_B} - 1 \right) \right) - c_{3.к} \left(\frac{M_3}{W_B} - 1 \right) b_2; \quad (2.44)$$

$$k_{12} = a_2 c_{3.к} \left(\frac{M_3}{W_B} - 1 \right); \quad (2.45)$$

$$k_{13} = 1,8kF(1 + a_4); \quad (2.46)$$

$$k_{14} = 1,8kFb_4; \quad (2.47)$$

$$k_{15} = 3,6kFT_0; \quad (2.48)$$

$$k_{16} = r_0 + c_{\pi} b_4 - k_{11}; \quad (2.49)$$

$$k_{17} = c_{\pi} a_4 + k_{12}; \quad (2.50)$$

$$k_{18} = k_{14} - k_{15}; \quad (2.51)$$

$$k_{19} = c_0(a_4 - 1); \quad (2.52)$$

$$k_{20} = r_0 k_p / (k_p + 1); \quad (2.53)$$

$$k_{21} = \frac{c_{\pi} x_0}{k_p + 1}; \quad (2.54)$$

$$k_{22} = \frac{c_{\pi} k_p}{k_p + 1}; \quad (2.55)$$

$$k_{23} = x_0 k_{12}; \quad (2.56)$$

$$k_{24} = x_0 k_{13}; \quad (2.57)$$

$$k_{25} = x_0(k_{15} - k_{14}); \quad (2.58)$$

$$k_{26} = x_0(k_{11} - r_0 / (k_p + 1)) + c_0 b_4; \quad (2.59)$$

$$k_{27} = k_{16} - k_{20}; \quad (2.60)$$

$$k_{28} = k_{17} + k_{22}; \quad (2.61)$$

$$k_{29} = k_{19} - k_{21} - k_{23} \gg [93]. \quad (2.62)$$

«Подставив выражение (2.43) в (2.29) получим искомую зависимость температуры сушильного агента в процессе сушки:

$$k_{30} t T_3^2(t) dt - k_{31} t T_3(t) dt + k_{32} T_3^2(t) dt - k_{33} T_3(t) dt + k_{34} t T_3(t) dT_3(t) - \\ - k_{35} t dT_3(t) - k_{36} T_3(t) dT_3(t) + k_{37} t dt - k_{38} dT_3(t) + k_{39} dt = 0, \quad (2.63)$$

где

$$k_{30} = (k_8 k_{28} + k_{10} k_{29}) a_c; \quad (2.64)$$

$$k_{31} = a_c(k_8 k_{27} - k_{10} k_{26} - k_9 k_{29} + k_6 k_{28}); \quad (2.65)$$

$$k_{32} = b_c(k_{28} + k_{10} k_{29}) - k_8 k_{13} - k_{10} k_{24}; \quad (2.66)$$

$$k_{33} = b_c(k_8 k_{27} - k_{10} k_{26} - k_9 k_{29} + k_6 k_{28}) + k_8 k_{18} - k_{10} k_{25} + k_9 k_{24} - k_6 k_{13}; \quad (2.67)$$

$$k_{34} = a_c k_7 k_{28}; \quad (2.68)$$

$$k_{35} = a_c k_7 k_{27}; \quad (2.69)$$

$$k_{36} = k_7(k_{13} - k_{28} b_c); \quad (2.70)$$

$$k_{37} = a_c(k_9 k_{26} + k_6 k_{27}); \quad (2.71)$$

$$k_{38} = k_7(k_{27}b_c + k_{18}); \quad (2.72)$$

$$k_{39} = b_c(k_9k_{26} + k_6k_{27}) + k_9k_{25} + k_6k_{18} \gg [93]. \quad (2.73)$$

Аппроксимация решения уравнения (2.63) методом Эйлера первого порядка имеет вид:

$$T = T_0 + (T_{\max} - T_0)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (2.74)$$

где $T_{\max}$ – максимальная температура сушильного агента;

τ – постоянная времени.

Получаемый в процессе опытов коэффициент рециркуляции можно рассчитать следующим образом [5]:

$$k_p = \frac{L_4 V_{уд.п}}{V_{уд.4} L_{п}}, \quad (2.75)$$

где L_4 , $L_{п}$ – соответственно, расходы рециркулирующего сушильного агента и подсасываемого атмосферного воздуха, м³/с;

$V_{уд.п}$ – «удельный объем влажного воздуха, приходящийся на» [5] 1 кг сухого воздуха подсасываемого атмосферного воздуха, м³/кг с.в.;

$V_{уд.4}$ – удельный объем влажного воздуха, приходящийся на 1 кг рециркулирующего сушильного агента, м³/кг с.в. [8].

Значения удельных объемов можно определить по формуле [5]:

$$V_{уд} = \frac{R_{с.в}}{0,622p} (t + 273)(x + 0,622), \quad (2.76)$$

где $R_{с.в}$ – газовая постоянная сухого воздуха, Дж/(кг·К);

p – давление влажного воздуха, Па;

t – температура влажного воздуха, °С;

x – влагосодержание влажного воздуха, кг/кг с.в. [5].

На основании выражения (2.74) построим зависимость температуры сушильного агента в процессе сушки для значения коэффициента рециркуляции равного 0,38 (рис. 2.16).

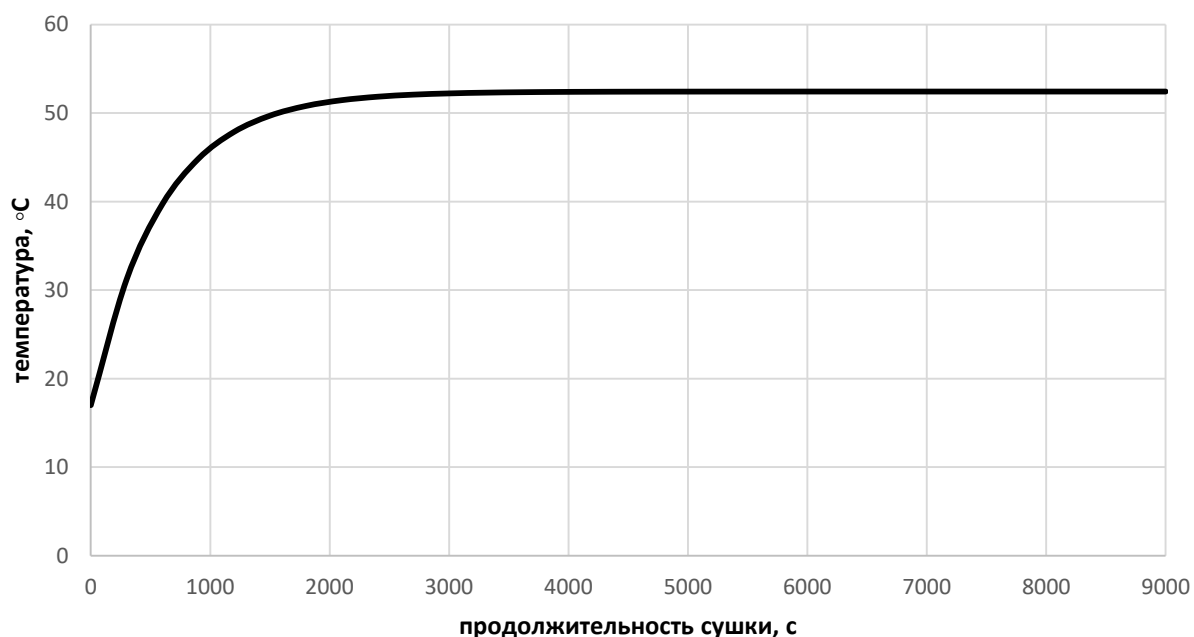


Рисунок 2.16 - Изменение температуры сушильного агента в течение процесса сушки

Для построения графика приняты также следующие исходные данные, полученные в ходе поисковых опытов: расход сушильного агента пневмотранспортером $L_{пт} = 0,13$ кг с.в./с; теплоёмкость сухого воздуха $c_0 = 1,01$ кДж/(кг·К); начальное влагосодержание сушильного агента (атмосферного воздуха) $x_0 = 0,007$ кг/кг; удельная теплота парообразования при температуре 0 °С $r_0 = 2493$ кДж/кг; теплоёмкость пара $c_{п} = 1,97$ кДж/(кг·К); коэффициенты: $a_1 = 1,16$, $b_1 = -0,21$, $a_2 = 0,63$, $b_2 = 1$, $a_{ст} = 0,8$, $b_{ст} = -10$, $a_4 = 0,78$, $b_4 = -7,47$; мощность привода ротора-нагревателя $N = 17,5$ кВт; КПД ротора-нагревателя $\eta = 0,1$; масса зерна в сушильной шахте $M_3 = 450$ кг; теплоемкость зерна $c_3 = 2,078$ кДж/(кг·К); коэффициент теплопередачи через стенки сушильной шахты $k = 0,002$ кВт/(м²·К);

площадь наружной поверхности сушильной шахты $F = 5,2 \text{ м}^2$; температура окружающей среды в период сушки $T_0 = 17 \text{ °С}$; масса коробов, стенок сушильной шахты и базового модуля $M_{\text{ст}} = 650 \text{ кг}$; теплоёмкость материала стенок и коробов сушильной шахты $c_{\text{ст}} = 0,46 \text{ кДж/(кг·°С)}$ [18, 93].

Выражение (2.74) в численных значениях с учетом исходных данных имеет вид [93]:

$$T = 17 + 35,43 \left(1 - e^{-\frac{t}{585}}\right). \quad (2.77)$$

Анализ рис. 2.16 показывает, что примерно за 50 минут процесса сушки температура сушильного агента при коэффициенте рециркуляции 0,38 достигает значения близкого к максимальному, равному 53 °С . Далее температура сушильного агента стабилизируется, и процесс сушки выходит на стационарный режим.

«Таким образом, полученная на основании теплового баланса сушилки зависимость (2.74) позволяет прогнозировать температуру сушильного агента при организации его двухконтурной рециркуляции в модульной сушилке аэродинамического нагрева.

Поскольку в стационарном режиме сушки температура сушильного агента будет в пределах $60...80 \text{ °С}$, что соответствует температуре сушильного агента при сушке семенного зерна, то данную сушилку целесообразно использовать именно в данных целях» [93].

2.4 Баланс воздушных потоков

Схема движения воздушных потоков в модульной сушилке представлена на рис. 2.17.

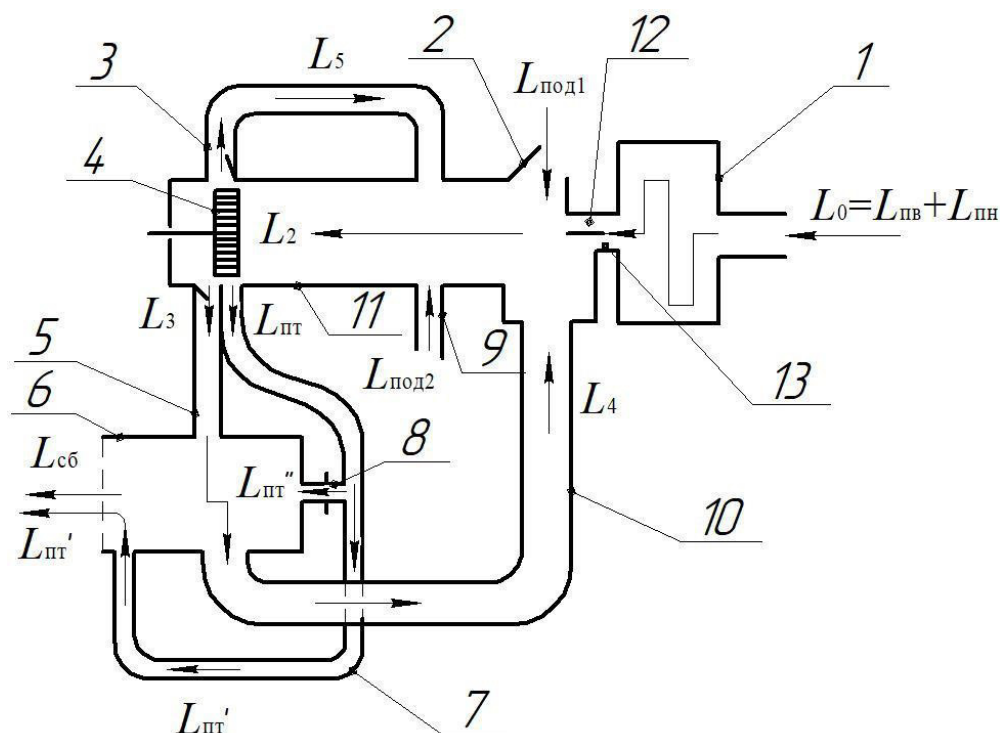
В камере смешивания на входе ротора-нагревателя образуется воздушный поток с расходом L_2 :

$$L_2 = L_4 + L_0 + L_{\text{под1}} + L_{\text{под2}} + L_5, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.78)$$

где $L_{\text{под1}}$ – подсос атмосферного воздуха через приоткрытую дверь сушильной камеры;

$L_{\text{под2}}$ – подсос атмосферного воздуха через патрубок дополнительного подсоса;

L_5 – расход воздуха через внутренний канал рециркуляции сушильной камеры.



1 – комбинированный теплообменник; 2 – дверь в сушильную камеру; 3 – внутренний канал рециркуляции сушильного агента; 4 – ротор-нагреватель; 5 – подводящий патрубок сушильной шахты; 6 – сушильная шахта (дополнительный модуль); 7 – материалопровод пневмотранспортера; 8 – выпуск; 9 – патрубок дополнительного подсоса атмосферного воздуха; 10 – внешний канал рециркуляции сушильного агента; 11 – сушильная камера (основной модуль); 12 – верхний подсасывающий патрубок; 13 – нижний подсасывающий патрубок

Рисунок 2.17 – Схема движения воздушных потоков в модульной сушилке

После ротора-нагревателя баланс воздушных потоков имеет следующий вид:

$$L_2 = L_3 + L_{\text{пт}} + L_5, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.79)$$

где $L_{\text{са}}$ – расход сушильного агента.

При работе пневмотранспортера вследствие избыточного давления в его материалопроводе часть воздушного потока отводится в сушильную шахту через выпуск ее бесприводного выпускного устройства.

Поэтому, расход воздуха на работу пневмотранспортера будет равен:

$$L_{\text{пт}} = L_{\text{пт}}' + L_{\text{пт}}'', \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.80)$$

где $L_{\text{пт}}'$ – расход сушильного агента на выходе материалопровода пневмотранспортера;

$L_{\text{пт}}''$ – расход сушильного агента через выпуск бесприводного выпускного устройства сушильной шахты.

Количество рециркулирующего отработанного сушильного агента будет равно:

$$L_4 = L_3 + L_{\text{пт}}'' - L_{\text{сб}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.81)$$

где $L_{\text{сб}}$ – расход сушильного агента, сбрасываемого в атмосферу через зерновой загрузочный бункер.

Приравнивая правые части выражений (2.78) и (2.79), с учетом выражений (2.80) и (2.81) получим баланс воздушных потоков на входе и выходе сушилки:

$$L_{\text{пт}}' + L_{\text{сб}} = L_0 + L_{\text{под1}} + L_{\text{под2}}. \quad (2.82)$$

Из выражения (2.81) с учетом выражений (2.80) и (2.82) количество рециркулирующего отработанного сушильного агента можно представить в виде:

$$L_4 = L_3 + L_{\text{пт}} - L_0 - L_{\text{под1}} - L_{\text{под2}}. \quad (2.83)$$

Из выражения (2.83) расход сушильного агента будет равен:

$$L_3 = L_4 + L_0 + L_{\text{под1}} + L_{\text{под2}} - L_{\text{пт}}. \quad (2.84)$$

Из выражения (2.27) коэффициент рециркуляции отработанного сушильного агента будет равен:

$$k_p = \frac{x_0 - x_1}{x_1 - x_2}. \quad (2.85)$$

Кроме рециркуляции отработанного сушильного агента происходит также рециркуляция сушильного агента в базовом модуле. При этом, «температура сушильного агента будет определяться массами смешиваемых в базовом модуле подсасываемых и рециркулирующих воздушных потоков» [93].

При организации внутреннего контура рециркуляции в камере смешивания базового модуля сушилки коэффициент рециркуляции сушильного агента:

$$k_{\text{рв}} = \frac{L_4/V_{\text{уд.4}} + L_5/V_{\text{уд.5}}}{L_0/V_{\text{уд.1}} + L_{\text{под1}}/V_{\text{уд.под1}} + L_{\text{под2}}/V_{\text{уд.под2}}}, \quad (2.86)$$

«где $V_{\text{уд.4}}$, $V_{\text{уд.5}}$, $V_{\text{уд.1}}$, $V_{\text{уд.под1}}$, $V_{\text{уд.под2}}$ – соответственно, удельные объемы влажного воздуха, приходящиеся на 1 кг сухого воздуха, рециркулирующего сушильного агента по внешнему, внутреннему контурам рециркуляции, подогретого в комбинированном теплообменнике, подсасываемого атмосферного воздуха» [78] через приоткрытую дверь и дополнительный подсос, м³/кг с.в.

С учетом выражения (2.76) формула (2.86) будет иметь вид:

$$k_{\text{рв}} = \frac{(L_4 p_4 / (T_4 (x_2 + 0,622)) + L_5 p_5 / (T_3 (x_1 + 0,622))) (x_0 + 0,622)}{L_0 p_1 / T_1 + (L_{\text{под1}} p_{\text{под1}} + L_{\text{под2}} p_{\text{под2}}) / T_0}, \quad (2.87)$$

где $p_4, p_5, p_1, p_{\text{под1}}, p_{\text{под2}}$ – соответственно, давление рециркулирующего сушильного агента по внешнему и внутреннему контуру рециркуляции, подогретого воздуха в комбинированном теплообменнике, подсасываемого атмосферного воздуха через приоткрытую дверь и дополнительный подсос, Па.

Учитывая, что рассматриваемые давления отличаются от атмосферного давления всего на несколько десятков паскалей в выражении (2.87) их можно принять равными и сократить.

Тогда, выражение коэффициента рециркуляции сушильного агента с учетом организации внутреннего канала рециркуляции будет иметь вид:

$$k_{\text{рв}} = \frac{(L_4 / (T_4 (x_2 + 0,622)) + L_5 / (T_3 (x_1 + 0,622))) (x_0 + 0,622)}{L_0 / T_1 + (L_{\text{под1}} + L_{\text{под2}}) / T_0}. \quad (2.88)$$

Требуемый расход воздуха пневмотранспортером находится по формуле [76]:

$$L_{\text{пт}} = W_{\text{п}} / (3,6 \rho_{\text{в}} \mu), \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.89)$$

где $W_{\text{п}}$ – производительность пневмотранспортера, кг/с;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воздушного потока, кг/м³;

μ – массовая концентрация транспортируемой смеси.

Мощность, потребляемая на работу пневмотранспортера,

$$N_{\text{в}} = L_{\text{пт}} P k_{\text{в}} / \eta_{\text{в}}, \text{ кВт}, \quad (2.90)$$

где P – полное давление на входе пневмотранспортера, кПа;

$k_{\text{в}} = 1,2$ – коэффициент, учитывающий потери мощности на утечке воздуха;

$\eta_b = 0,85$ – КПД системы.

Полное давление P обеспечивает перемещение зерна по материалопроводу с определенной скоростью v_0 (динамическое давление P_d) и преодоление местных сопротивлений в магистрали (статическое давление P_c), т. е.

$$P = P_d + P_c. \quad (2.91)$$

Динамическое давление

$$P_d = \rho_b \frac{v_{\Pi}^2}{2} (1 + \mu \frac{v_0^2}{v_{\Pi}^2}), \text{ Па.} \quad (2.92)$$

Статическое давление

$$P_c = \rho_b (1 + \mu) \left\{ \frac{v_{\Pi}^2}{2} \left[\frac{l_{\Pi}}{d_{\Pi}} \left(0,015 + \frac{0,0013}{d_{\Pi}} \right) + \sum \xi \right] + H_{\Pi} \left[1 + \left(0,015 + \frac{0,0013}{d_{\Pi}} \right) \frac{v_{\Pi}^2}{2d_{\Pi}} \right] \right\}, \quad (2.93)$$

где l_{Π} – длина горизонтального участка материалопровода, м;

d_{Π} – внутренний диаметр материалопровода, м;

$\sum \xi$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений;

H_{Π} – высота вертикального участка материалопровода, м.

Внутренний диаметр (м) материалопровода пневмотранспортера

$$d_{\Pi} = 2 \sqrt{\frac{L_{\Pi T}}{\pi v_{\Pi}}}. \quad (2.94)$$

В совместной с Ялзой А.Г. работе [62] дано теоретическое обоснование параметров разгрузочного циклона и зерноотбойного фартука в зерновом бункере.

Выводы по главе 2

1. Обоснована конструктивно-технологическая схема и определены параметры сушильной шахты;
2. Получена математическая модель зависимости температуры сушильного агента от параметров модульной сушилки;
3. Получено выражение баланса воздушных потоков в сушилке.

ГЛАВА 3 ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа исследований

1. Определить физико-механические свойства зерна пшеницы, используемой в исследованиях.
2. Исследовать опытный образец сушильной шахты при организации двухконтурной циркуляции сушильного агента.
3. Произвести планирование и реализацию многофакторного эксперимента по установлению зависимости времени сушки зерна от температуры сушильного агента и влажности зерна.
4. Сравнить результаты теоретических и экспериментальных исследований.
5. Исследовать работу модульной сушилки в производственных условиях, оценить ее технико-экономическую эффективность.

3.2 Методика исследований

3.2.1 Методика исследований физико-механических свойств зерна

Для исследований взяли зерно озимой пшеницы сорта «Московская – 39». Определяли согласно частным методикам и ГОСТам: коэффициент внутреннего трения, угол естественного откоса, насыпную плотность (рис. 3.1), коэффициент внешнего трения [25]. Использовали пурку с падающим грузом, электронный штангенциркуль DCO220, электронные весы Scout Pro, влагомер зерна Wile-65 (рис. 3.2).

Насыпную плотность зерна определяли по методике [25] (рис. 3.1).

Угол естественного откоса φ определения прибором (рис. 3.3 а) [97] и транспортиром с параллелограммным механизмом (рис. 3.3 б).



Рисунок 3.1 – Пурка с падающим грузом [97]



Рисунок 3.2 – Влагомер зерна Wile-65 [97]



а



б

Рисунок 3.3 – Оборудование для определения угла естественного откоса: а – воронка с задвижкой [97]; б - транспортер с параллелограммным механизмом

Коэффициенты внешнего трения зерна определяли, используя площадку с регулируемым наклоном (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Площадка с регулируемым наклоном

Полученные результаты использовались при обосновании конструктивных параметров сушильной шахты.

3.2.2 Описание экспериментальной установки и средств измерения параметров

Общий вид модульной сушилки аэродинамического нагрева с дополнительным модулем в виде сушильной шахты представлен на рис. 3.5 [18].



Рисунок 3.5 – Модульная сушилка аэродинамического нагрева [18]

На рис. 3.6 представлен вид на подводящие и отводящие короба сушильной шахты.

На рис. 3.7 (а) представлен вид через короб диффузора сушильной шахты на подающие короба, на рис. 3.7 (б) представлен вид через конфузор сушильной шахты на ее отводящие короба.

*а**б*

Рисунок 3.6 – Подводящие короба (*а*), отводящие короба (*б*) сушильной шахты

*а**б*

Рисунок 3.7 – Вид на подводящие (*а*) и отводящие короба (*б*) сушильной шахты

На рис. 3.8 представлены виды загрузочного зернового бункера (3.8 *а*) и низа сушильной шахты (3.8 *б*).

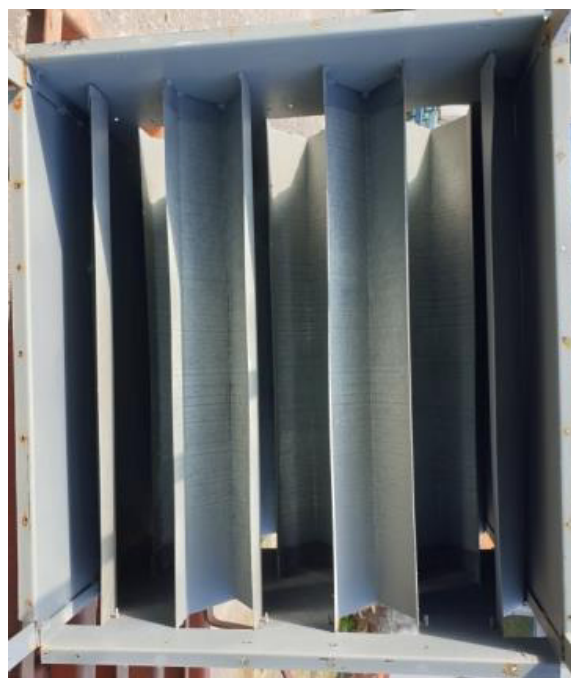
*а**б*

Рисунок 3.8 – Вид на короба сушильной шахты сверху (*а*) и снизу (*б*)

Над рабочим объемом шахты располагается загрузочный зерновой бункер высотой 0,3 м, имеющий входное отверстие пневмотранспортера (рис. 3.9), и закрываемый после работы крышкой с вентиляционным колпаком (рис. 3.10).



Рисунок 3.9 – Загрузочный зерновой бункер сушильной шахты



Рисунок 3.10 – Крышка загрузочного зернового бункера

«Нижние короба сушильной шахты являются отводящими и состоят из двух полных и двух полукоробов. Ширина коробов и расстояние между ними составляет 100 мм.

Таким образом, зерно в выпускное устройство поступает через три выпускных отверстия шахты каждое размером 700х100 мм» [60].

Под сушильной шахтой располагается бесприводное выпускное устройство механического типа, обеспечивающее регулируемую заслонками подачу зерна в пневмотранспортер (рис. 3.11 - 3.14).



Рисунок 3.11 – Бесприводное выпускное устройство сушильной шахты

*а**б*

Рисунок 3.12 – Беспроводное выгрузное устройство сушильной шахты:

а – верхний бункер, *б*- нижний бункер



Рисунок 3.13 – «Верхний бункер беспроводного выпускного устройства» [60]

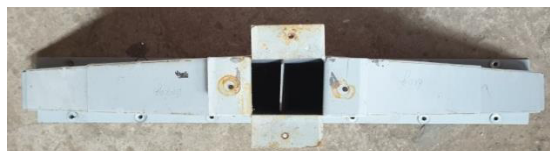


Рисунок 3.14 – «Нижний бункер беспроводного выпускного устройства» [60]

«Верхний бункер бесприводного выпускного устройства» [60] имеет три заслонки для регулировки потоков зерна, нижний бункер – одну заслонку [60]. Бесприводное выпускное устройство заканчивается выпуском квадратной формы размером 60х60 мм с двумя оппозитными зерновыми заслонками (рис. 3.15), соединяемым с приемным устройством пневмотранспортера (рис. 3.16).

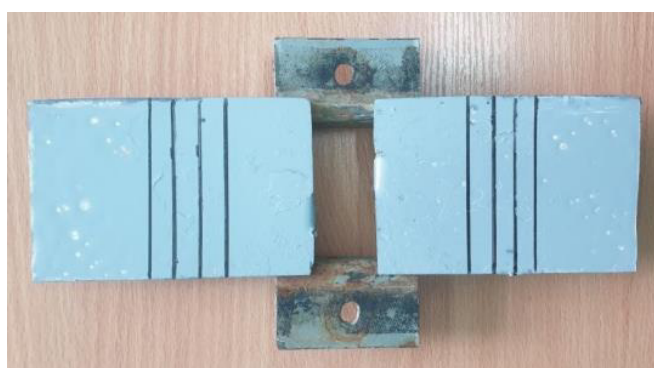


Рисунок 3.15 – Выпуск с зерновыми заслонками

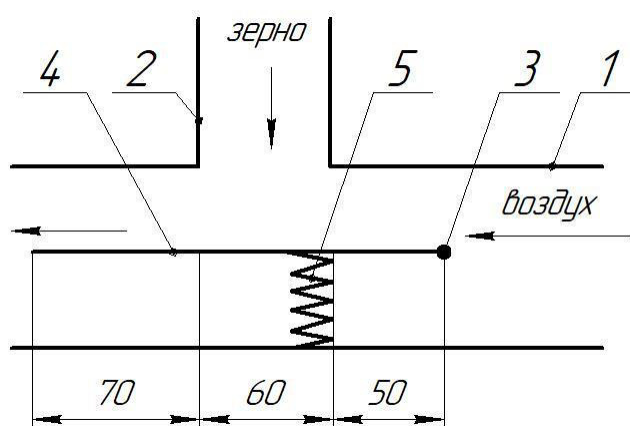


а

б

Рисунок 3.16 – Приемное устройство пневмотранспортера для материалопровода сечением 120х60 мм: *а* – с пассивным вибратором; *б* – с защитной вставкой

Пассивный вибратор улучшает условия транспортирования зерна на начальном разгонном участке материалопровода. Принцип его работы представлен на рис. 3.17.



1 – материалопровод; 2 – выпуск; 3 – ось вибратора; 4 – пластина вибратора; 5 – пружина

Рисунок 3.17 – Принцип работы пассивного вибратора приемного устройства пневмотранспортера (размеры в мм)

Для отбора воздушного потока в пневмотранспортер выполнено отдельное заборное окно в стенке рабочей камеры ротора-нагревателя (рис. 3.18).



Рисунок 3.18 – Расположение заборных окон

Перевод сушилки с режима рециркуляции зерна на режим разгрузки сушильной шахты производится с помощью переключателя. Общий вид

переключателя и подсоединение циклона при разгрузке зерна представлено на рис. 3.19 - 3.20.



а

б

Рисунок 3.19 – Переключатель потока зерна: *а* – режим рециркуляции зерна; *б* – режим разгрузки зерна в циклон



Рисунок 3.20 – Подключение циклона при разгрузке зерна

В режиме рециркуляции зерна над сушильной шахтой устанавливается зерно-отбойный фартук с фильтрующим ограждением (рис. 3.21).



Рисунок 3.21 – Общий вид зерно-отбойного фартука с фильтрующим ограждением

Диффузор сушильной шахты имеет присоединительный фланец прямоугольной формы размером 480х240 мм (см. рис. 3.7 *a*), а конфузор сушильной шахты имеет переход квадратного фланца на круглый для присоединения воздуховода внешнего контура рециркуляции сушильного агента диаметром 150 мм (рис. 3.22).

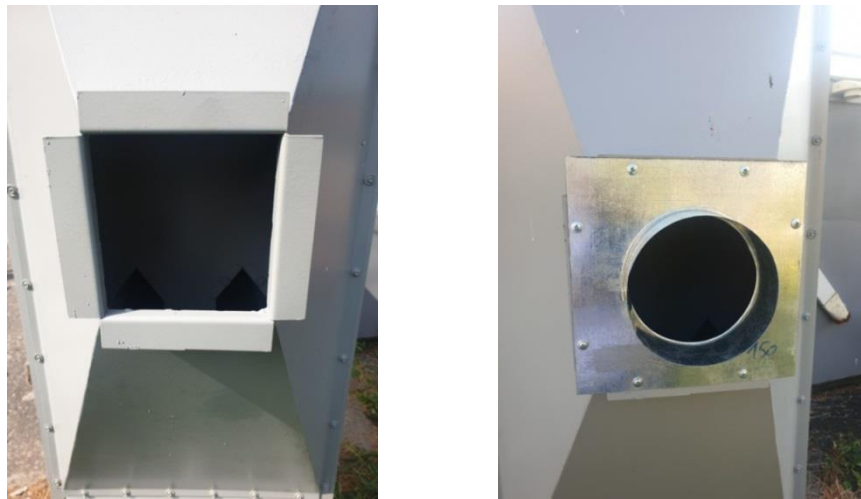


Рисунок 3.22 – Присоединительный фланец конфузора

Привод ротора-нагревателя осуществляется асинхронным 3-х фазным двигателем через четырех ручьевую ременную передачу (рис. 3.23).



Рисунок 3.23 – Привод ротора-нагревателя (по Исаеву С.Х.) [38]

Он по данным Исаева С.Х. «имеет следующие технические характеристики: мощность электродвигателя привода нагревательного ротора – 17,5 кВт, частота вращения ротора – 1500 мин^{-1} , наружный диаметр ротора – 700 мм; внутренний диаметр ротора – 550 мм; ширина ротора – 150 мм; число лопаток – 20» [38].

Экспериментальными исследованиями предусматривалось высушивание зерна исходной влажности до кондиционной влажности 14 % и ниже при фиксировании параметров окружающей среды, зерна и сушильного агента [78].

Предусматривалось фиксирование следующих параметров [78]:

окружающей среды

- влажность атмосферного воздуха;
- температура атмосферного воздуха;
- атмосферное давление;

сушильного агента

- температура на входе в сушильную шахту;
 - температура на выходе из сушильной шахты;
 - температура на входе ротора-нагревателя;
 - температура на выходе из комбинированного теплообменника;
 - температура нижней теплообменной поверхности комбинированного теплообменника;
 - температура в солнечном коллекторе;
 - скорость сушильного агента на входе в сушильную шахту;
 - скорость сушильного агента на выходе из шахты;
 - скорость сушильного агента в патрубках подсоса после комбинированного теплообменника;
 - скорость сушильного агента в дополнительном патрубке подсоса;
 - скорость сушильного агента в материалопроводе пневмотранспортера;
- #### зерна
- влажность;
 - температура [78].

Для замера температуры окружающей среды, а также температуры сушильного агента в сушилке, стенок сушильной шахты использовались датчики термосопротивления и восьмиканальный измеритель-регулятор температуры ТРМ-138 с выводом результатов замеров на ноутбук, пирометр aseline DIN35, приборы для определения скорости и расхода воздуха термоанемометр testo 405 V1 и метеометр МЭС-200, прибор для измерения влажности воздуха и температуры термогигрометр testo 625 фирмы «TestoAG», а также штатный термостат на пульте управления сушилки (рис. 3.24). Температура и влажность зерна измерялись влагомером Wile -65 [78].



а - датчик термосопротивления ДТС 015-50М.В3.500; *б* - восьмиканальный измеритель-регулятор температуры ТРМ 138; *в* - фиксация показаний датчиков на ноутбуке; *г* - МЭС-200; *д* - термоанемометр testo 405 V1; *е* - термогигрометр testo 625; *ж* - штатный термостат на пульте управления сушилки; *з* - пирометр

Рисунок 3.24 - Измерительное оборудование [78]

Для измерения расхода электроэнергии использовали трехфазный счетчик электрической энергии, включенный в цепь питания приводного электродвигателя ротора-нагревателя через трансформаторы тока 50/5 с коэффициентом трансформации 10 (рис. 3.25 а) [78].

По методике, использованной в работах Байдакова Е.М., Ченина А.Н., Исаева Х.М., можно определить мощность по формуле [38]:

$$\langle N_{08} = k_T \cdot m / 0,125, \text{ кВт}, \quad (3.5)$$

где k_T – коэффициент трансформации тока, $k_T = 10$;

m – количество оборотов диска счетчика, приходящееся на одну секунду измерений;

0,125 – количество оборотов диска счетчика соответствующих 1 кВт·с» [38].

Цифровой тахометр DT2234B позволил определить частоту вращения ротора-нагревателя (рис. 3.25 б) [38].



а



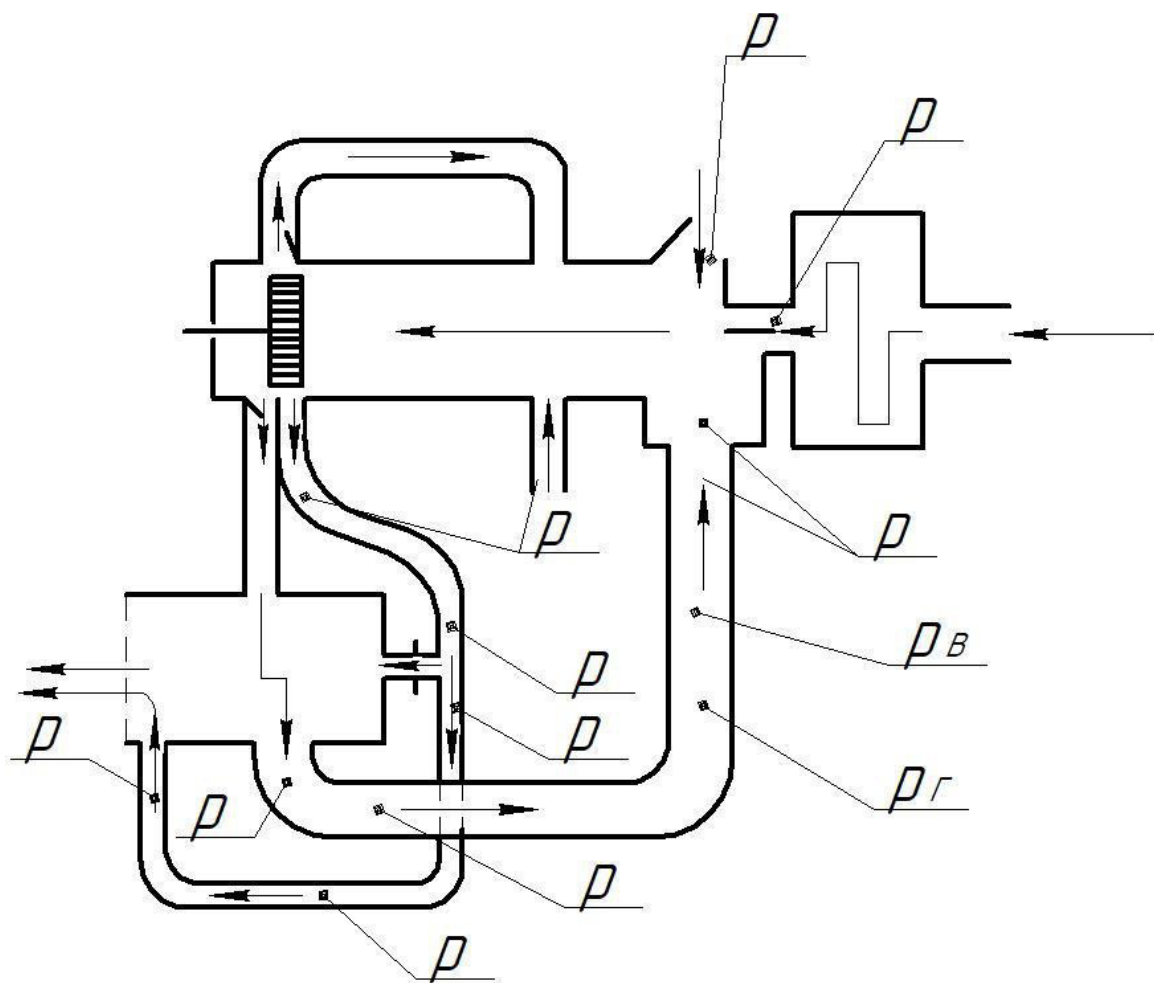
б



в

«Рисунок 3.25 – Счетчик электрической энергии (а), цифровой тахометр (б), рукоятка управления величиной открытия жалюзи ротора-нагревателя (в)» [38]

Схема точек замера параметров воздушных потоков в модульной сушилке представлена на рис. 3.26.



P – точки замера параметров воздушного потока; $P_Г$ – точка замера параметров на горизонтальном участке канала рециркуляции; P_B – точка замера параметров на вертикальном участке канала рециркуляции

Рисунок 3.26 – Схема точек замера параметров воздушных потоков в модульной сушилке

Для замера избыточного давления в контрольных отверстиях использовали микроманометр ММН-2400 (5)-1,0 (рис. 3.27).

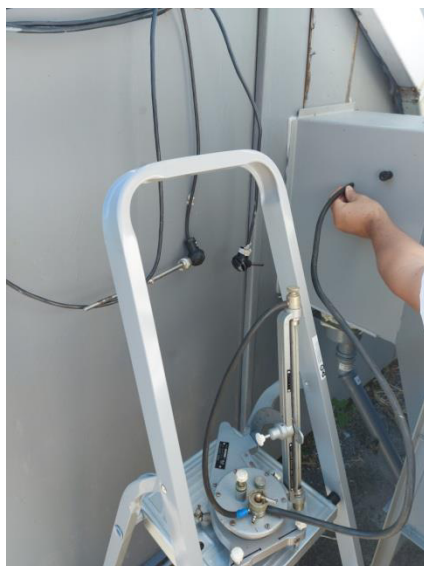


Рисунок 3.27 - Измерение избыточного давления на входе в сушильную шахту

Скорость воздушного потока, его температура, относительная влажность и атмосферное давление измерялось метеометром МЭС-200 (рис. 3.28).



Рисунок 3.28 – Измерение параметров метеометром МЭС-200

Он предназначен для измерений данных параметров внутри помещений или в вентиляционных трубопроводах в соответствии с ГОСТ 12.1.005 и СанПиН 2.2.4.548-96.

Вследствие турбулентности воздушного потока определялась его средняя скорость движения по результатам фиксации минимального и максимального значения скорости при замере.

Производительность пневмотранспортера и, соответственно, сушилки в режиме разгрузки зерна в циклон определялась путем деления массы зерна, поступившей в фильтрующий рукав, на время отбора зерна.

Взвешивание поступившего в фильтровальный рукав зерна производили на электронных весах Scout Pro, обеспечивающих взвешивание максимальной массы 2 кг, точность измерения 0,1 г.

В процессе экспериментальных исследований производилась видеосъемка процесса работы пневмотранспортера сушилки.

С помощью программы Vegas Pro 13 производилась раскадровка с временным интервалом 0,033 с при обычной съемке. Часть опытов снималось на мобильный телефон Samsung Galaxy S9+ в режиме замедленной скорости с коэффициентом 8. В этом случае временной интервал раскадровки составил 0,004 с.

3.3 Методика планирования двухфакторного эксперимента

На продолжительность сушки зерна наибольшее влияние оказывают следующие факторы:

- влажность зерна ω_3 ;
- температура сушильного агента T_3 ;
- расход сушильного агента L_3 .

Для регулирования расхода сушильного агента можно использовать заслонку смотрового окна рабочей камеры ротора-нагревателя. Однако измерение скорости воздушного потока в подающем патрубке диффузора сушильной шахты показало, что при изменении положения заслонки не наблюдалось адекватного изменения скорости воздушного потока, т.к. в камере ротора-нагревателя происходит вихреобразное движение сушильного агента и вследствие очень короткой длины подающего патрубка такое движение сохраняется и в нем.

Вследствие этого обеспечить достоверно заданный расход сушильного агента не представлялось возможным. Поэтому все испытания сушилки

проводились при полностью открытой заслонке и максимальной подаче сушильного агента.

Определять подачу сушильного агента по количеству отводимого из шахты сушильного агента также было не корректно из-за прохода в сушильную шахту части воздушного потока из пневмотранспортера через его приемное устройство, а также возможного подсасывания атмосферного воздуха через верх шахты в отводящие короба из-за замыкания их на всасывающий канал ротора-нагревателя через внешний контур рециркуляции сушильного агента.

Кроме этого наблюдался также в загрузочном зерновом бункере шахты при ее полной загрузке некоторый выход сушильного агента вдоль центральной части стенки конфузора, которая заглушает торцы подающих коробов. Это было видно по небольшому столбику взвешенных примесей зерновой массы.

Таким образом, будет реализован план типа 3^2 со значениями факторов на трех уровнях:

- влажность зерна $\omega_z = 16; 18; 20 \%$;
- температура сушильного агента $T_3 = 50; 55; 60 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Откликом будет являться продолжительность процесса сушки зерна до кондиционной влажности 14% .

План эксперимента представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – План эксперимента

№ опыта	Факторы		Параметр оптимизации
	влажность зерна $\omega_z, \%$	температура сушильного агента $T_a, \text{ } ^\circ\text{C}$	продолжительность сушки зерна $t, \text{ ч}$
1	-1	-1	Y_{cp1}
2	-1	0	Y_{cp2}
3	-1	+1	Y_{cp3}
4	0	-1	Y_{cp4}
5	0	0	Y_{cp5}
6	0	+1	Y_{cp6}
7	+1	-1	Y_{cp7}
8	+1	0	Y_{cp8}
9	+1	+1	Y_{cp9}

Опыты проводились в трех кратной повторности после рандомизации их очередности.

В программе STATISTICA 13 получили уравнение регрессии, проверили адекватность по критерию Фишера, достоверность коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента [38].

Для уменьшения трудоемкости экспериментальных исследований, уменьшения массы высушиваемого и, соответственно, увлажняемого зерна часть подводящих и отводящих коробов сушильной шахты было заглушено (рис. 3.29). Оставлен только ряд подводящих коробов и два ряда отводящих.



а



б

Рисунок 3.29 – Вид шахты со стороны подводящих (*а*) и отводящих (*б*) коробов

Для достижения требуемой влажности зерна, подвергающегося сушке, по методике [6] производили его увлажнение в количестве 200 кг.

Увлажнение зерна производили послойно в ванне с помощью электрического опрыскивателя при перемешивании всей массы зерна вручную (рис. 3.30).



Рисунок 3.30 – Ванна с зерном в процессе увлажнения

Количество воды M_v , вносимой в массу зерна, рассчитывали по формуле:

$$M_v = M_z \frac{\omega_{z,k} - \omega_{z,n}}{100 - \omega_{z,k}}, \text{ кг}, \quad (3.6)$$

где M_z – масса увлажняемого зерна, кг;

$\omega_{z,k}$, $\omega_{z,n}$ – конечная и начальная влажность зерна, %.

Продолжительность выдержки увлажненного зерна составляла 3 дня для обеспечения равномерного распределения влаги по массе зерна. В течение дня два-три раза производилось перемешивание зерна.

Выводы по главе 3

Программа и рассмотренная методика экспериментальных исследований обеспечат реализацию поставленных задач.

ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты определения физико-механических свойств зерна

Озимая пшеница сорта «Московская – 39» имеет зерно высокой крупности, удлиненно-яйцевидной формы, бороздка - средняя. Средняя длина зерновки – 6,4, ширина – 3,5, толщина – 3,0 мм.

Масса 1000 зерен составила 49,3 г при влажности 13,2 %. Насыпная плотность зерна составила 628 кг/м³.

Угол естественного откоса при влажности зерна 15,0 % составил 33° (рис. 4.1). Угол естественного откоса определялся путем вычитания из 90° угла, фиксируемого на транспорте.



Рисунок 4.1 – Определение угла естественного откоса

Коэффициенты внешнего трения зерна при влажности 15 % определяли по окрашенной стали, имитирующей поверхности сушильной шахты: угол трения покоя - 30°, коэффициент трения покоя зерна пшеницы по окрашенной стали - 0,57, угол трения движения - 33°, коэффициент трения движения – 0,64 (рис. 4.2). Наибольший угол трения движения зерновка имеет при укладке ее на поверхность стороной бороздки.



Рисунок 4.2 – Определение угла внешнего трения

Зерновая масса взята непосредственно из производственного зернохранилища.

4.2 Параметры сушильного агента при его однократной циркуляции в сушилке

В ООО «ОКБ по теплогенераторам» (г. Брянск) был изготовлен опытный образец сушильной шахты [60].

«Сушилка работает следующим образом. Загрузочным шнековым транспортером зерно подается в сушильную шахту и, распределяясь между подающими и отводящими сушильный агент коробами, под действием силы тяжести движется вниз к бесприводному выпускному устройству и приемному устройству пневмотранспортера.

Атмосферный воздух, проходя через комбинированный теплообменник, подогревается за счет теплообмена с тепловоспринимающей поверхностью солнечного коллектора комбинированного теплообменника и через штатные отверстия в сушильной камере для подсоса воздуха в режиме сушки плодово-

ягодного сырья поступает в камеру смешивания с рециркулирующим» [93] по внешнему и внутреннему контурам сушильным агентом.

Дополнительно в камеру смешивания через дополнительный патрубок подсоса и приоткрытую на ширину 2 см дверь сушильной камеры подсасывается атмосферный воздух. Дополнительный подсос связан с нехваткой для работы пневмотранспортера притока воздуха только через штатные патрубки подсоса сушильной камеры.

«Смешанный сушильный агент ротором-нагревателем подается в сушильную шахту и далее увлажненный после контакта с зерном по внешнему контуру рециркуляции возвращается в камеру смешивания. Часть нагнетаемого сушильного агента используется для работы пневмотранспортера, обеспечивающего при необходимости рециркуляцию влажного зерна в сушильной шахте, либо выгрузку высушенного зерна» [93].

При проведении исследований вначале модульная сушилка испытывалась в режиме отсутствия рециркуляции сушильного агента, но при подаче отработанного сушильного агента в верхнюю и нижнюю камеры комбинированного теплообменника для рекуперации теплоты отработанного сушильного агента (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – Исследование модульной сушилки при однократной циркуляции сушильного агента

Переоборудование сушильной камеры модульной сушилки при однократной циркуляции сушильного агента представлено на рис. 4.4.



Рисунок 4.4 – Переоборудование сушильной камеры модульной сушилки при однократной циркуляции сушильного агента

«Погодные условия проведения опыта были благоприятными: солнечно, ясное небо, плотность потока прямой солнечной радиации - 1010 Вт/м^2 , начальная температура атмосферного воздуха – 14°C , относительная влажность воздуха – 47% » [78].

Приток атмосферного воздуха осуществлялся только через штатные патрубки подсоса. Изменение температуры атмосферного воздуха и сушильного агента без его рециркуляции в процессе сушки зерна представлено на рис. 4.5 [78].

Анализ рис. 4.5 «показывает, что при температуре атмосферного воздуха в пределах $17 - 18^\circ\text{C}$ температура подогретого атмосферного воздуха на выходе из

средней камеры комбинированного теплообменника составляла 26 - 27 °С при относительной влажности воздуха до 37 %» [78].

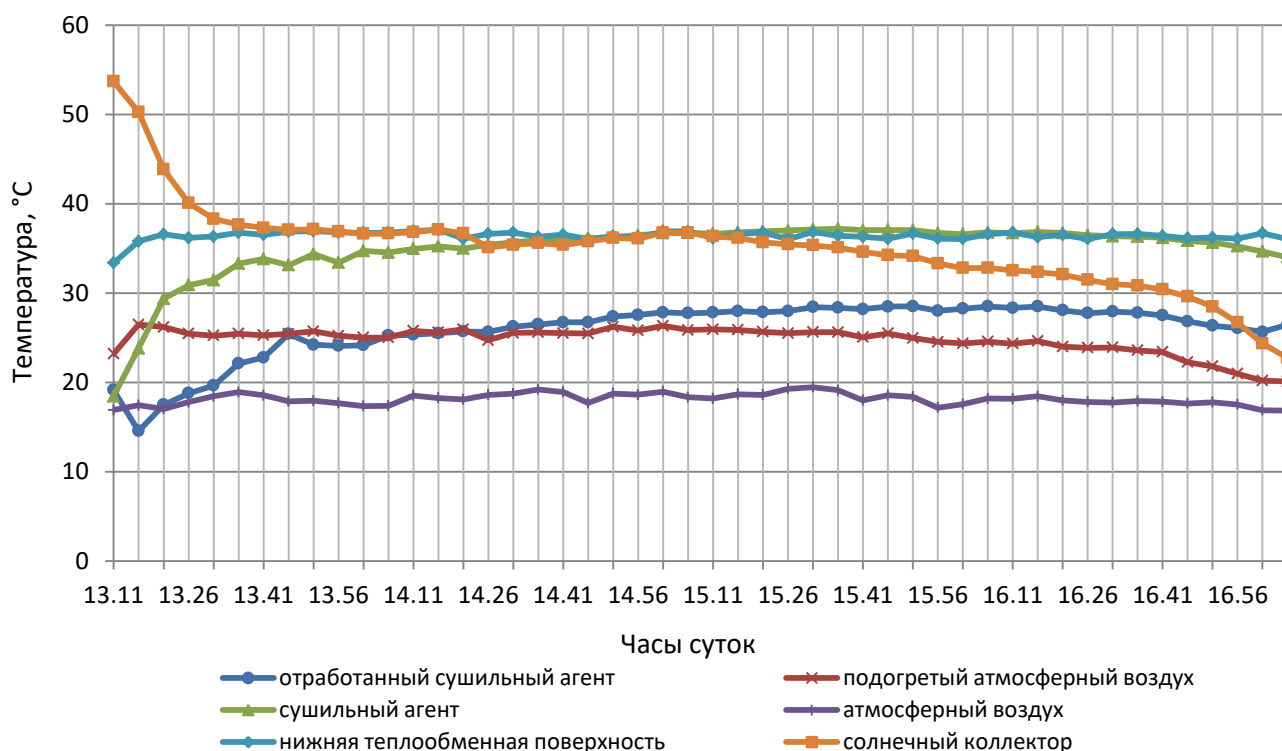


Рисунок 4.5 - Изменение температуры сушильного агента в процессе сушки зерна без рециркуляции сушильного агента [78, 79]

«В роторе-нагревателе воздух ещё догревался до температуры порядка 37 °С при относительной влажности в среднем 18 % и нагнетался в сушильную шахту» [78]. «Термодатчик сушилки показывал температуру 40 °С в камере ротора-нагревателя» [78].

«Отработанный увлажнённый сушильный агент с температурой 25 - 28 °С и относительной влажностью до 40 % поступал в нижнюю и верхнюю камеры комбинированного теплообменника для теплообмена через теплообменные поверхности средней камеры с засасываемым атмосферным воздухом» [78] (рис. 4.6).

Анализ J-d диаграммы влажного воздуха показывает, что при данных параметрах его влагосодержание составляет 8 г/(кг с.в.) при максимально возможном влагосодержании 20 г/(кг с.в.) [78].

«Температура нагрева теплообменных поверхностей составляла порядка 37 °С, что определялось температурой отработанного сушильного агента и работой солнечного коллектора» [78].

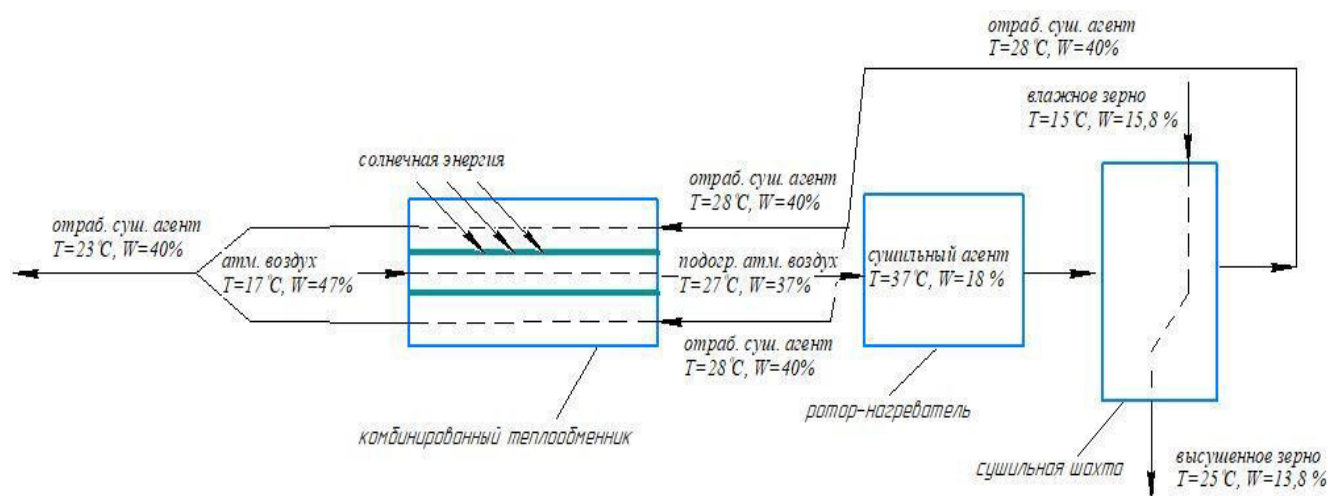


Рисунок 4.6 – «Схема движения сушильного агента с изменением его параметров в процессе сушки» [78]

«Температура воздуха в солнечном коллекторе до начала работы сушилки составляла 53 °С. При подаче отработанного сушильного агента в солнечный коллектор температура в нем снижалась до 37 °С. При этом теплообменная поверхность в конце эксперимента имела температуру более высокую, чем омывающий ее отработанный сушильный агент, в том числе в солнечном коллекторе за счет поглощения теплоты от прямой солнечной радиации.

В процессе сушки максимальная температура нагрева зерна составляла 25 °С. Снижение влажности зерна на 1% было зафиксировано через 1 час сушки по влажности зерна на выходе из пневмотранспортера в зерновом бункере» [78]. При этом на входе в сушильную шахту сушильный агент имел температуру 36,0 °С, влажность 17,5 %, влагосодержание 6,2 г/ кг с.в. На выходе из сушильной шахты сушильный агент имел температуру 25,4 °С, влажность 45,4 %, влагосодержание 9,2 г/ кг с.в.

«За 3 часа сушки снижение влажности зерна составляло 2%, за 4 часа сушки влажность зерна снизилась с 15,8% до 12,5 %» [78].

«Скорость сушильного агента, подаваемого в сушильную камеру при не полностью открытой заслонке, составляла в среднем 6 м/с при замере в коробе диффузора. Это соответствует расходу сушильного агента $0,25 \text{ м}^3/\text{с}$ или $900 \text{ м}^3/\text{ч}$. При полностью открытой заслонке расход сушильного агента составлял $0,43 \text{ м}^3/\text{с}$ или $1555 \text{ м}^3/\text{ч}$. Избыточное давление, измеренное микроманометром, составило 296 Па.

Скорость сушильного агента в начальном участке воздуховода пневмотранспортера была равна в среднем 15 м/с. Это соответствовало расходу воздуха $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$ или $106 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На входе в комбинированный теплообменник скорость потока отработанного сушильного агента составляла 8 м/с, что соответствовало расходу воздуха $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ или $360 \text{ м}^3/\text{ч}$. Большая разница между подачей сушильного агента и отводом в теплообменник связана с потерями воздуха через зерновой бункер, выпускное устройство и неплотности в соединениях сушильной шахты.

Скорость воздуха в двух подсасывающих патрубках на выходе из теплообменника составляла в среднем 15 м/с, что соответствует суммарному расходу воздуха через них - $0,16 \text{ м}^3/\text{с}$, или $594 \text{ м}^3/\text{ч}$. Вакуумметрическое давление в подсасывающих патрубках составляло 800 Па.

Производительность пневмотранспортёра по зерну была равна 50 кг/ч при массовой концентрации смеси 0,55. За время опыта половина загруженного зерна прошла через рециркуляцию, что обеспечило одинаковое воздействие сушильного агента на все объемы зерна при условии его непрерывного движения.

При этом по всему сечению сушильной шахты наблюдалось равномерное истечение зерна, что свидетельствовало об отсутствии сводообразования в бесприводном выгрузном устройстве» [78] (рис. 4.7).

«Потребляемая мощность приводного электродвигателя составляла порядка 7 кВт при силе тока 17 А.

Высушенное зерно было оставлено в сушильной шахте для оценки возможности хранения в неблагоприятных погодных условиях. Следующие сутки шел дождь. Через двое суток хранения при относительной влажности

атмосферного воздуха 68,2 % и температуре 15,1 °С влажность зерна в зерновом бункере составляла 13,8 % при температуре 16,8 °С» [78].



Рисунок 4.7 – «Характер истечения зерна из сушильной шахты» [60]

Таким образом, для повышения температуры сушильного агента необходимо организовать его рециркуляцию в сушилке.

4.3 Параметры сушильного агента при его одноконтурной рециркуляции

Для исследования модульной сушилки в режиме одноконтурной рециркуляции сушильного агента сушильная камера базового модуля соответствовала рис. 4.4, а отвод отработанного сушильного агента производился по воздуховоду диаметром 150 мм в специально выполненный в боковой стенке сушильной камеры приемный короб (рис. 4.8).



Рисунок 4.8 – Вид на приемный короб сушильной камеры

Изменение параметров сушильного агента при его одноконтурной рециркуляции представлено на рис. 4.9.

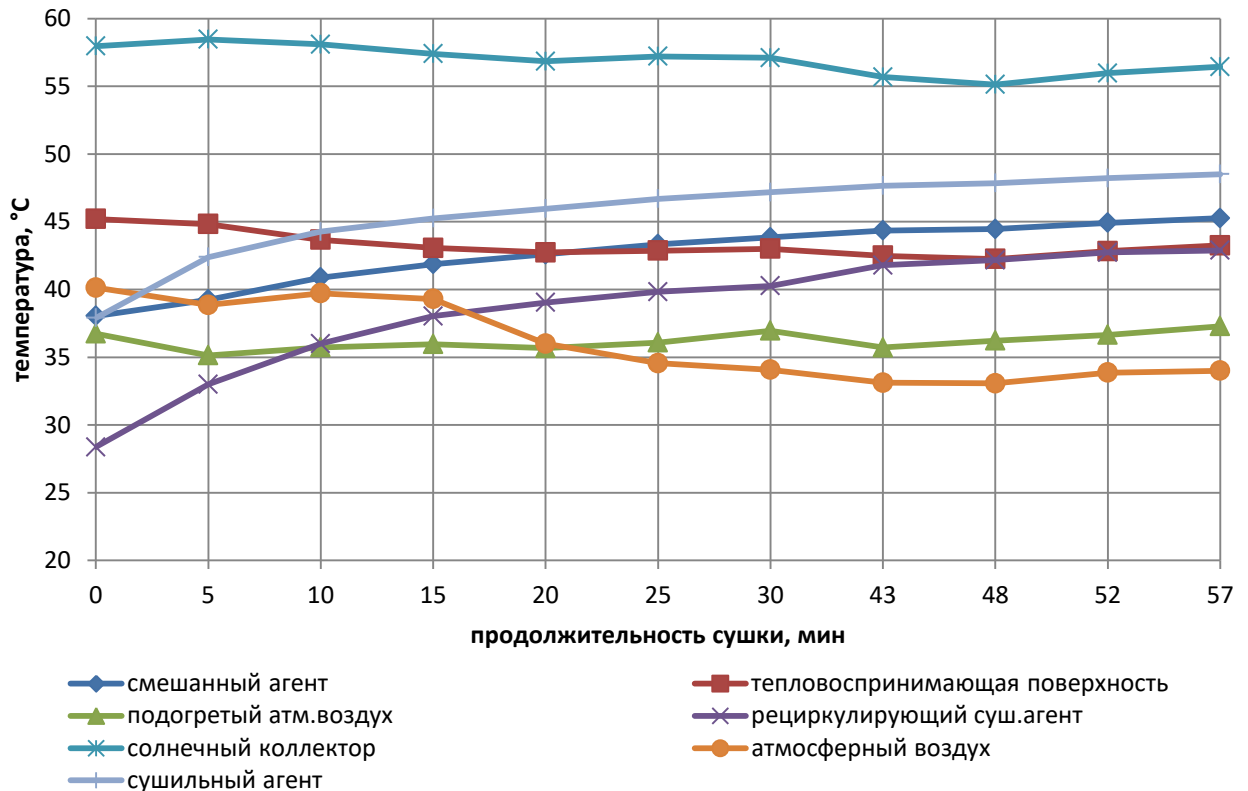


Рисунок 4.9 - Изменение температуры сушильного агента в режиме одноконтурной рециркуляции сушильного агента

Анализ рис. 4.9 показывает, что температура сушильного агента стабильно росла и в течение часа достигла 48 °C [18]. В начале сушки интервал температур сушильного агента на входе и выходе сушильной камеры составил 10 °C, в конце сушки по мере прогрева зерна и снижения его влажности составил 5 °C.

Температура сушильного агента на выходе ротора-нагревателя составляла в среднем на 3 °C больше, чем на входе.

Общий расход сушильного агента через сушильную шахту и пневмотранспортер составил 0,40 м³/с. При этом на сушильную шахту приходится 75% расхода сушильного агента, на работу пневмотранспортера – 25%. Однако скорость воздушного потока в материалопроводе при этом составила 13,6...14,5 м/с, что делает его работу неустойчивой.

Такая ситуация связана с недостатком общего расхода воздуха через ротор-нагреватель. Отсюда и достаточно высокая скорость рециркулирующего сушильного агента – до 12,4 м/с, что опасно выносом зерна из сушильной шахты. И высокая скорость воздуха в посасывающих патрубках – в верхнем подсосе (расположен над приемным коробом рециркулирующего сушильного агента) до 13 м/с, в нижнем – 3,3 м/с. На долю рециркулирующего сушильного агента приходилось 53% объема воздуха, через подсасывающие патрубки – 47%.

Для дополнительного притока атмосферного воздуха было задействовано ранее выполненное в сушильной камере отверстие под пневмотранспортер размером 60x120 мм (см. рис. 4.8) для иного расположения сушильной шахты.

В результате произошло увеличение общего расхода воздуха до 0,44 м³/с и перераспределение долей воздушных потоков: рециркулирующий сушильный агент – 40%, через патрубки подсоса – 33%, через дополнительное отверстие – 27%. Замер разряжения микроманометром показал, что в канале рециркуляции на выходе из сушильной шахты оно снизилось с 240 до 120 Па. Скорость рециркулирующего сушильного агента на выходе из сушильной шахты снизилась до 11 м/с.

Таким образом, испытание модульной сушилки на сушке зерна в режиме одноконтурной рециркуляции сушильного агента показало, что для повышения температуры сушильного агента необходимо организовать его рециркуляцию не только по внешнему контуру – от сушильной шахты до камеры смешивания, но и внутри камеры смешивания рециркулирующего агента и подсасываемого атмосферного воздуха [93].

Увеличение расхода воздуха ротором-нагнетателем обеспечивается дополнительным притоком атмосферного воздуха в камеру смешивания, за счет приоткрытия двери сушильной камеры базового модуля.

При полностью открытой двери сушильной камеры происходит следующее перераспределения воздушных потоков: рециркулирующий сушильный агент – 17%, через патрубки подсоса – 2%, через дополнительное отверстие – 2%, через

проем двери сушильной камеры – 79%. Общий расход воздуха ротором-нагнетателем увеличился до 0,516 м³/с.

4.4 Изменение параметров сушильного агента при его двухконтурной рециркуляции

Для организации внутреннего контура циркуляции сушильного агента было опробовано несколько вариантов переоборудования сушильной камеры.

Снятие одной перегородки и установка вместо нее отдельных отсекателей воздушного потока на заборные патрубки сушильной шахты и пневмотранспортера привело к неработоспособности пневмотранспортера из-за недостаточности давления на его входе (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 – Установка отсекателей воздушного потока

Замена отсекателя пневмотранспортера на воздухозаборник (рис. 4.11) улучшила работу пневмотранспортера, повысив скорость воздушного потока в материалопроводе до 14 м/с.



Рисунок 4.10 – Установка воздухозаборника пневмотранспортера

Для повышения давления в зоне входного патрубка пневмотранспортера левая перегородка была опущена до поля сушильной камеры (рис. 4.11). Таким образом, левый циркуляционный канал был открыт на $1/3$ в верхней части.



Рисунок 4.10 – Вид циркуляционного канала

В результате скорость воздушного потока в пневмотранспортере достигла рабочих значений в пределах $15,8...16,7$ м/с.

Изменение температуры сушильного агента при организации внутреннего контура его циркуляции при отсутствии зерна в сушильной шахте представлено на рис. 4.11.

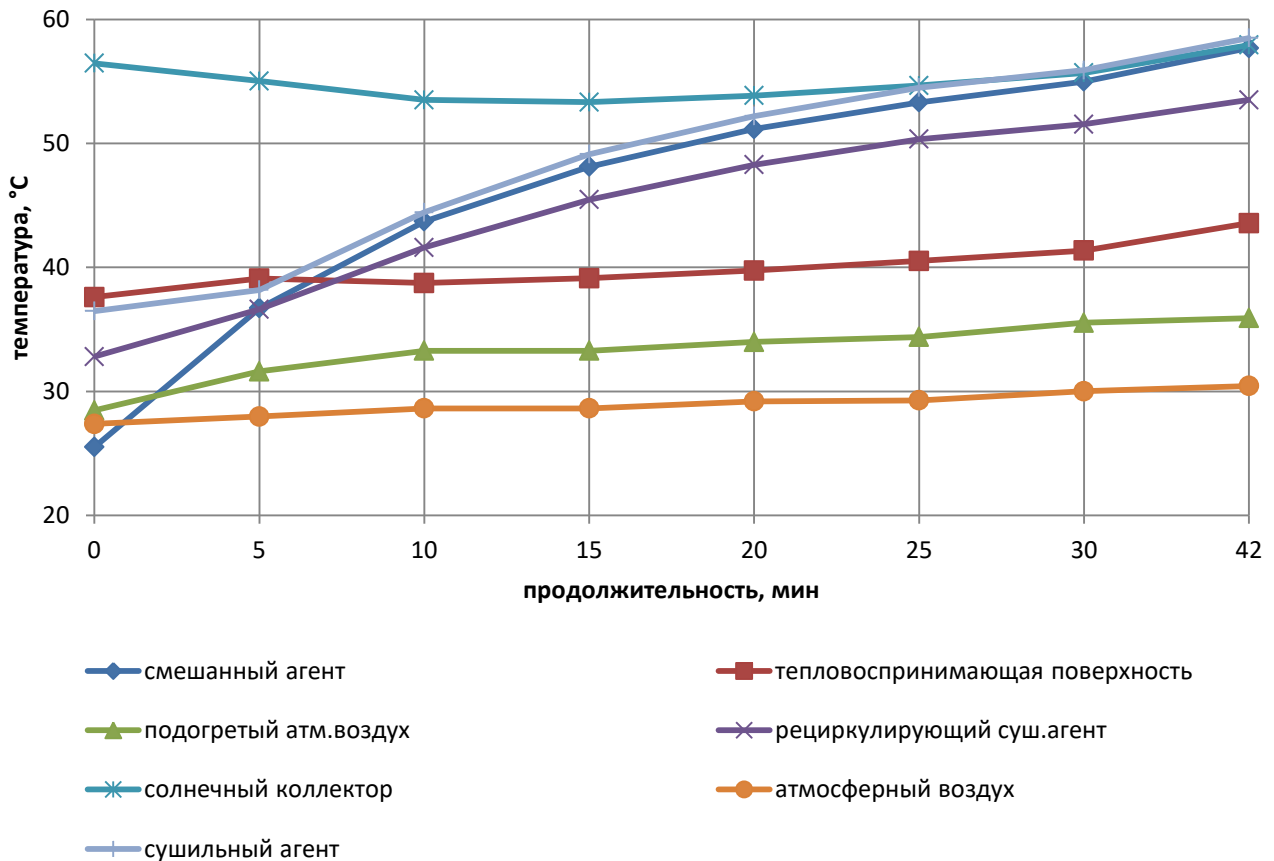


Рисунок 4.11 – Изменение температуры сушильного агента при двухконтурной циркуляции (сушильная шахта без зерна)

В этом случае происходит следующее перераспределения воздушных потоков: рециркулирующий сушильный агент – 23%, через патрубки подсоса – 14%, через дополнительное отверстие – 19%, через проем двери сушильной камеры – 44%. Общий расход воздуха ротором-нагнетателем составил $0,404 \text{ м}^3/\text{с}$. Расход сушильного агента через внутренний канал рециркуляции не учитывается, т.к. он замыкает вход и выход ротора-нагревателя.

Анализ рис. 4.11 показывает, что практически через 5 мин работы сушилки температура смешанного агента достигает более высоких значений в сравнении с одноконтурной циркуляцией и всего на $1...2 \text{ °C}$ ниже температуры сушильного

агента на выходе ротора-нагревателя. Потребляемая мощность составила 14,5 кВт, что говорит о росте нагрузки на ротор-нагреватель и, соответственно, увеличении его теплопроизводительности.

Однако, такое переоборудование сушилки каждый раз, когда после сушки плодово-ягодного сырья необходимо сушить зерно является неудобным в эксплуатации. Поэтому вместо стационарных перегородок рабочей камеры ротора-нагревателя в каждом рециркуляционном тракте сушильной камеры были установлены верхняя и нижняя поворотные заслонки с возможностью их фиксации в открытом, закрытом и среднем положениях (рис. 4.12).

Было проведено исследование влияния различного положения поворотных заслонок сушилки на изменение параметров сушильного агента (рис. 4.13).



Рисунок 4.12 – Поворотные заслонки: а – левого тракта в положении «закрыто»; б – правого тракта в положении «открыто» (стенка тракта снята); в - правого тракта в положении «закрыто» (стенка тракта снята)

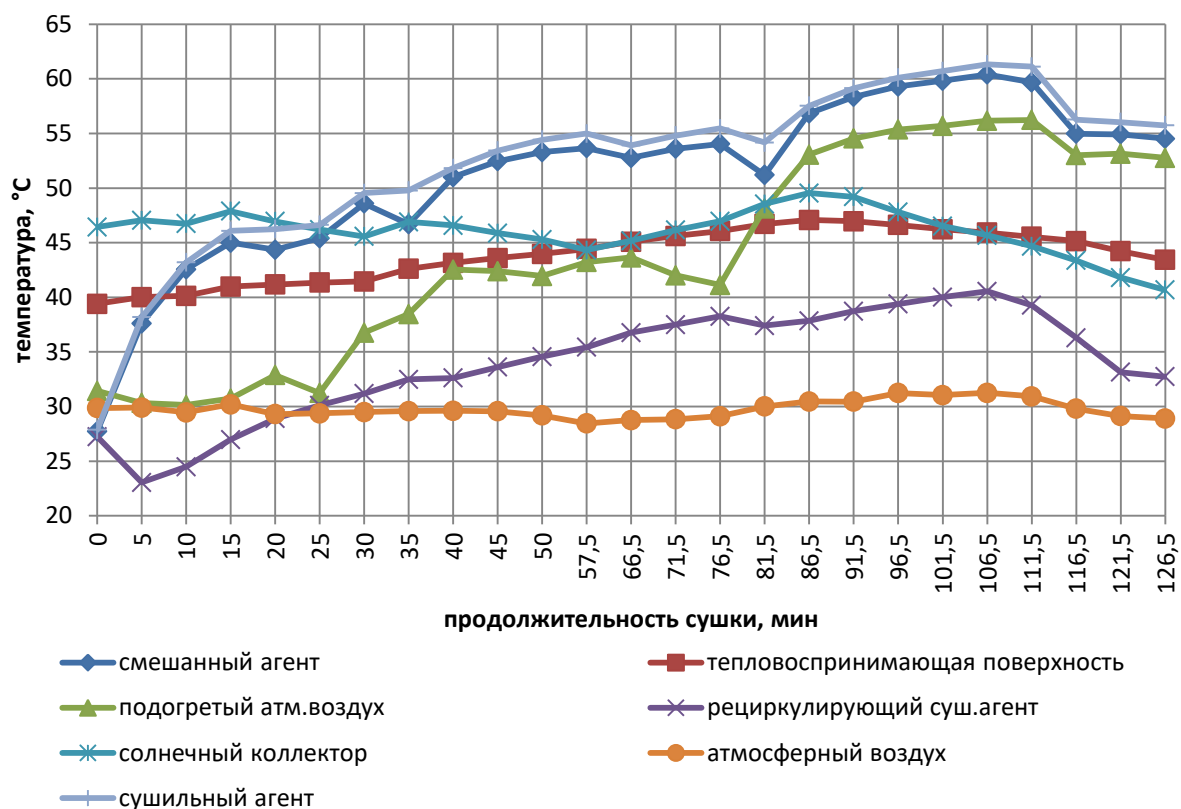


Рисунок 4.13 – Изменение температуры сушильного агента при двухконтурной циркуляции и различном положении поворотных заслонок

Сушильная шахта была заполнена зерном средней влажности 16% в количестве 140 кг.

В начале сушки левая верхняя поворотная заслонка находится в среднем положении, жалюзи «ромашка» (сброс части сушильного агента из рабочей камеры ротора-нагревателя в камеры комбинированного теплообменника) открыта.

Анализ рис. 4.13 показывает, что в течение первых 15 мин происходит интенсивный нагрев сушильного агента от 27 до 46 °С. При этом температура рециркулирующего сушильного агента вначале в течение 5 минут снижалась, потом в течение 10 мин повышалась до первоначального уровня. Это свидетельствует о периоде прогрева зерна.

Открытие правой нижней поворотной заслонки на 16-й минуте привело к неустойчивой работе пневмотранспортера и повышению температуры сушильного агента. Влажность сушильного агента на входе в сушильную шахту составила 27, на выходе – 59%.

Через час влажность сушильного агента на входе в сушильную шахту составила 14, на выходе – 34%. Температура зерна на выходе пневмотранспортера составила 32,3 °С, влажность зерна – 13,3%. Температура в рабочей камере ротора-нагревателя достигла 61 °С.

Закрытие жалюзи «ромашка» на 82-й мин процесса и открытое среднее положение только левой верхней поворотной заслонки привело к дальнейшему росту температуры сушильного агента. Температура в рабочей камере ротора-нагревателя достигла 66 °С.

Закрытие левой верхней поворотной заслонки на 111-й мин (прекращение циркуляции сушильного агента по внутреннему контуру) процесса привело к снижению температуры сушильного агента.

Таким образом, для устойчивой работы пневмотранспортера нижние поворотные заслонки должны быть закрыты. При открытии верхних поворотных заслонок образуется внутренний контур циркуляции сушильного агента, что ведет к повышению его температуры.

Режим двухконтурной циркуляции сушильного агента с открытыми верхними поворотными заслонками был испытан при сушке зерна влажностью 16, 18, 20% и массой 200 кг.

Характерные графики изменения температуры сушильного агента представлены на рис. 4.14-4.16.

Анализ рис. 4.14-4.16 показывает, что с увеличением исходной влажности зерна максимальная температура нагрева сушильного агента снижается. Так, при влажности зерна 16% температура сушильного агента в 60° достигается на 40-й минуте процесса сушки (см. рис. 4.14).

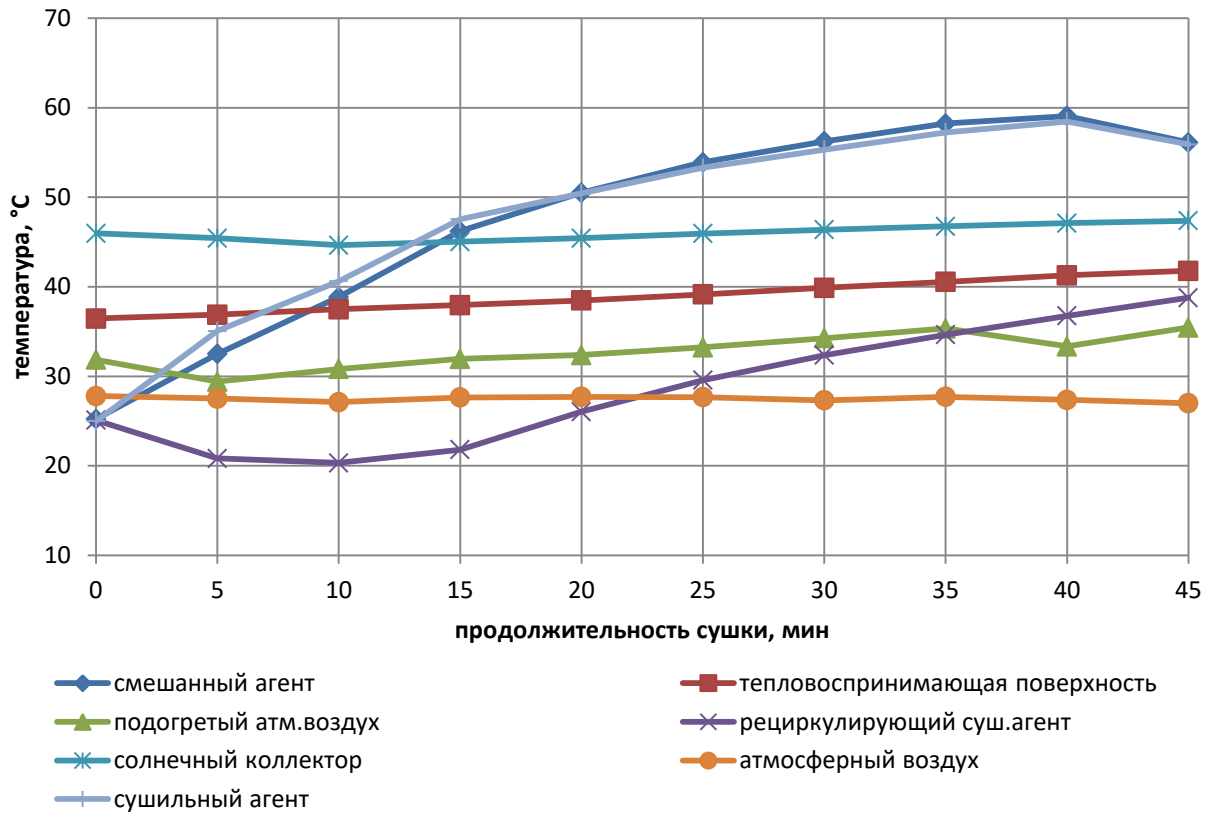


Рисунок 4.14 – Зависимость температуры сушильного агента
(влажность зерна 16%)

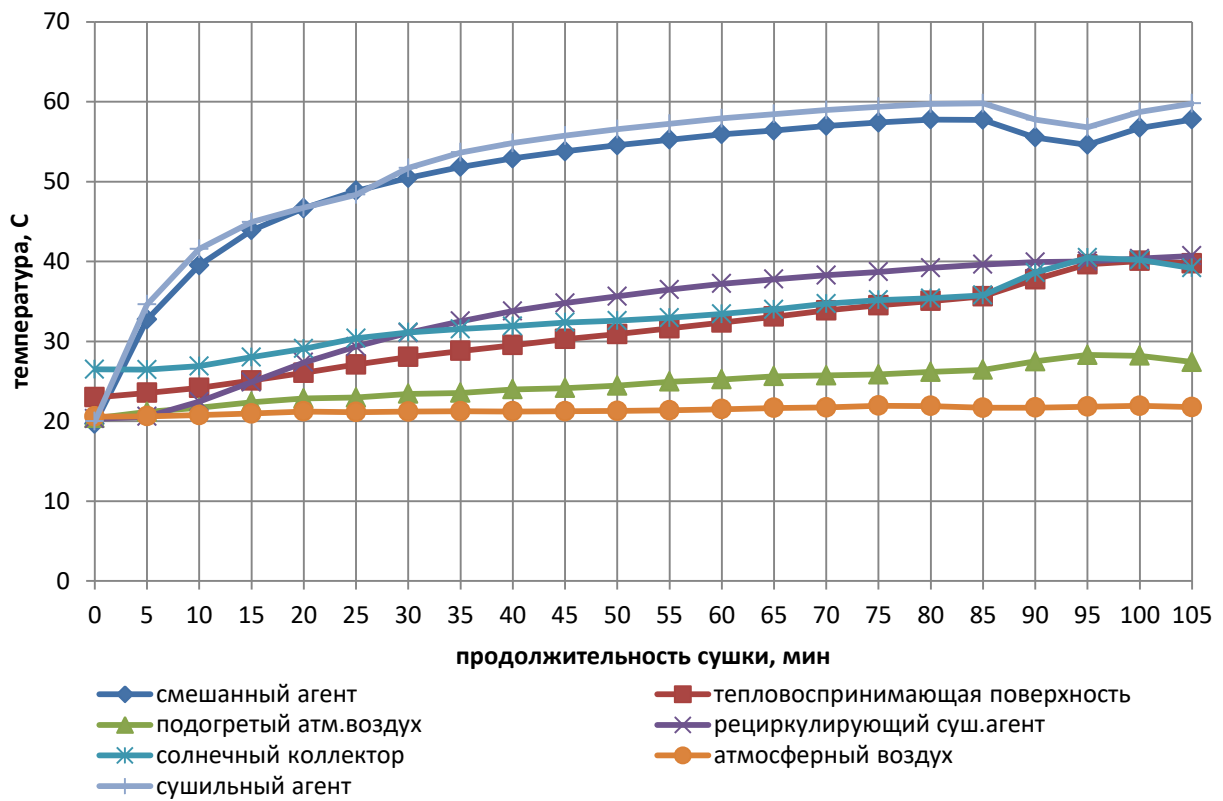


Рисунок 4.15 – Зависимость при влажности зерна 18%

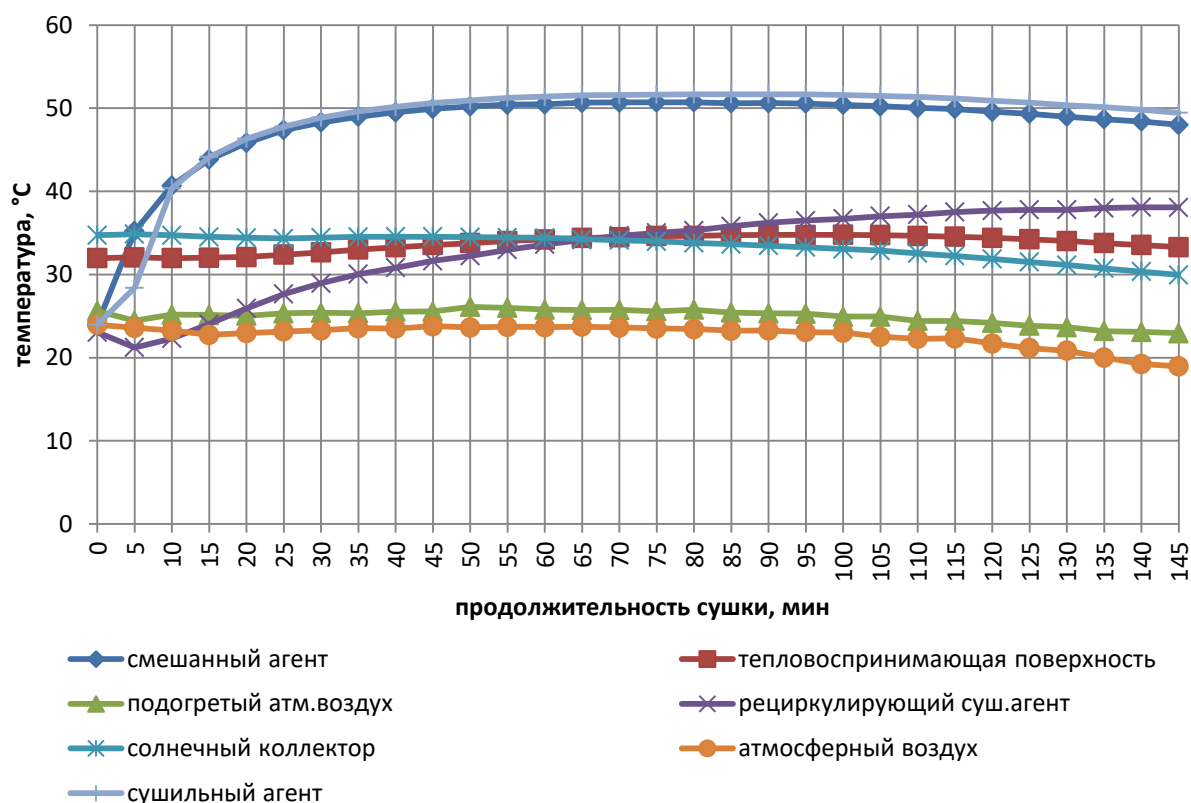


Рисунок 4.16 – Зависимость температуры сушильного агента
(влажность зерна 20%)

При влажности зерна 18% сушильный агент нагревается до 60°C к 80-й минуте (см. рис. 4.15). На 70-й минуте максимальная температура сушильного агента 52°C достигается при влажности зерна 20% (см. рис. 4.16). На входе и выходе из сушильной камеры разница температур сушильного агента в рассматриваемых опытах составляет в среднем 20°C.

В конце процесса сушки зерна влажностью 20% (см. рис. 4.16) на входе в сушильную шахту температура сушильного агента составила 48,3°C при влажности 17%, что соответствует влагосодержанию 11,0 г/кг с.в.; температура отработанного сушильного агента составила 39,0°C при влажности 38% и влагосодержании 16,5 г/кг с.в. При температуре атмосферного воздуха 19,2°C, влажности 55%, влагосодержании 8,0 г/кг с.в. коэффициент рециркуляции отработанного сушильного агента по формуле (2.85) составил 0,54, по формуле (2.88) – 1,34.

Баланс воздушных потоков в сушилке (без учета внутреннего канала рециркуляции) в этом случае представлен на рис. 4.17.

Расход в сушильную шахту L_3 , 0,373 м ³ /с, 78,0%	Общий расход сушильного агента 0,478 м ³ /с, 100%	Расход отработанного сушильного агента по внешнему каналу рециркуляции L_4 0,132 м ³ /с, 28,0%	Расход через приоткрытую дверь $L_{\text{под1}}$, 0,255 м ³ /с, 53,0%
Расход в пневмотранспортер $L_{\text{пт}}$, 0,105 м ³ /с, 22,0%		Расход через верхний подсасывающий патрубок $L_{\text{пв}}$, 0,013 м ³ /с, нижний подсасывающий патрубок $L_{\text{пн}}$, 0,023 м ³ /с, всего 0,036 м ³ /с, 7,5%	Расход через дополнительный подсос $L_{\text{под2}}$, 0,055 м ³ /с, 1%

Рисунок 4.17 – Баланс воздушных потоков в сушилке (без учета внутреннего канала рециркуляции)

Температура нагрева зерна в конце сушки составила 32,2°C.

Таким образом, при повышении степени нагрева сушильного агента за счет его многократного прохода через ротор-нагреватель сушилки относительная влажность сушильного агента будет уменьшаться, что будет увеличивать его потенциальную сушильную способность. Однако при этом многократный проход через высушиваемый материал будет увеличивать и влагосодержание сушильного агента, которое будет зависеть от отношения объемов уходящего отработанного агента и приточного атмосферного воздуха.

4.5 Влияние температуры сушильного агента и влажности зерна на продолжительность процесса сушки

В таблице 4.1 представлены результаты проведения многофакторного эксперимента типа 3².

Таблица 4.1 – Результаты проведения многофакторного эксперимента

№ опыта	Факторы		Отклик
	X_1	X_2	Y
	влажность зерна $\omega_3, \%$	температура сушильного агента $T_3, ^\circ\text{C}$	продолжительность сушки зерна t , мин
1	16	50	60
2	16	55	48
3	16	60	40
4	18	50	135
5	18	55	120
6	18	60	90
7	20	50	150
8	20	55	135
9	20	60	110

После обработки данных в Statistica 13 уравнение регрессии:

$$t = -79,33 + 20,58\omega_3 - 3,5T_3. \quad (4.1)$$

Коэффициент корреляции $R = 0,945$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,893$. Расчетное значение критерия Фишера $F_p = 25,145 > F_t = 5,14$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и уровне значимости F – критерия $p = 0,001$, что свидетельствует об адекватности уравнения регрессии [23, 38].

Поверхность отклика представлена на рис. 4.18.

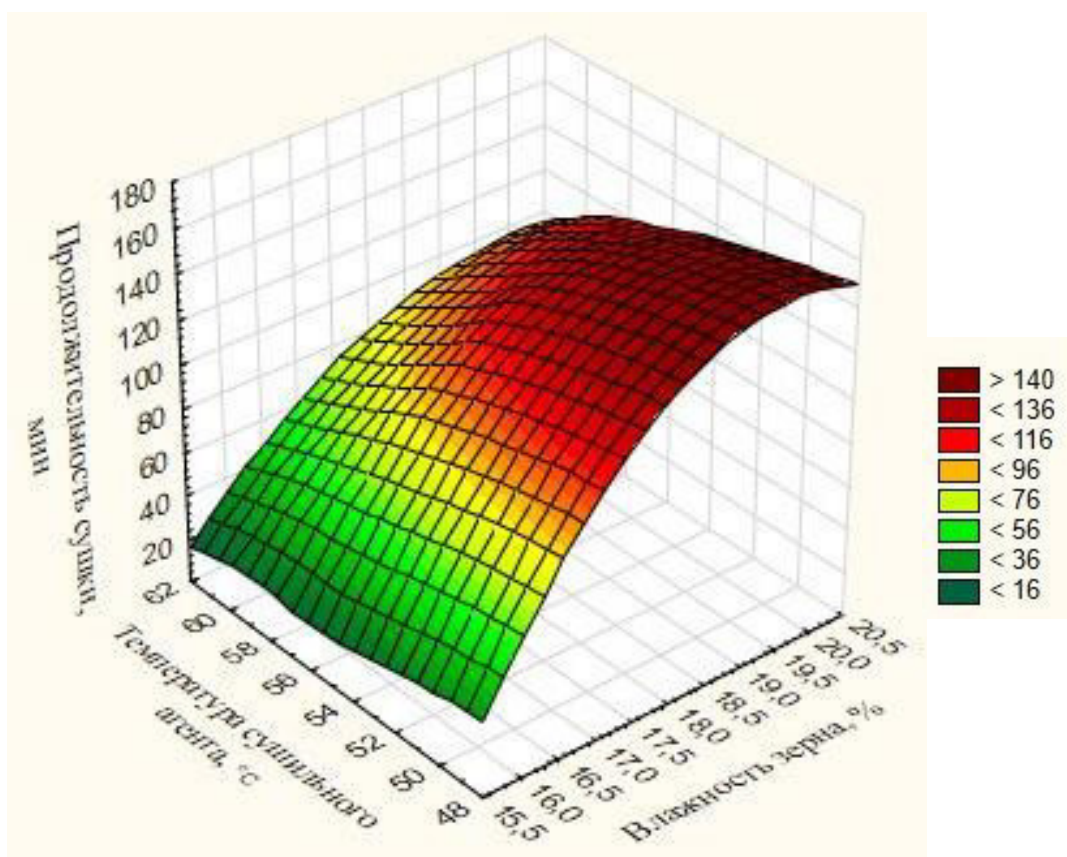


Рисунок 4.18 – Поверхность отклика

Двумерное сечение поверхности отклика представлено на рис. 4.19.

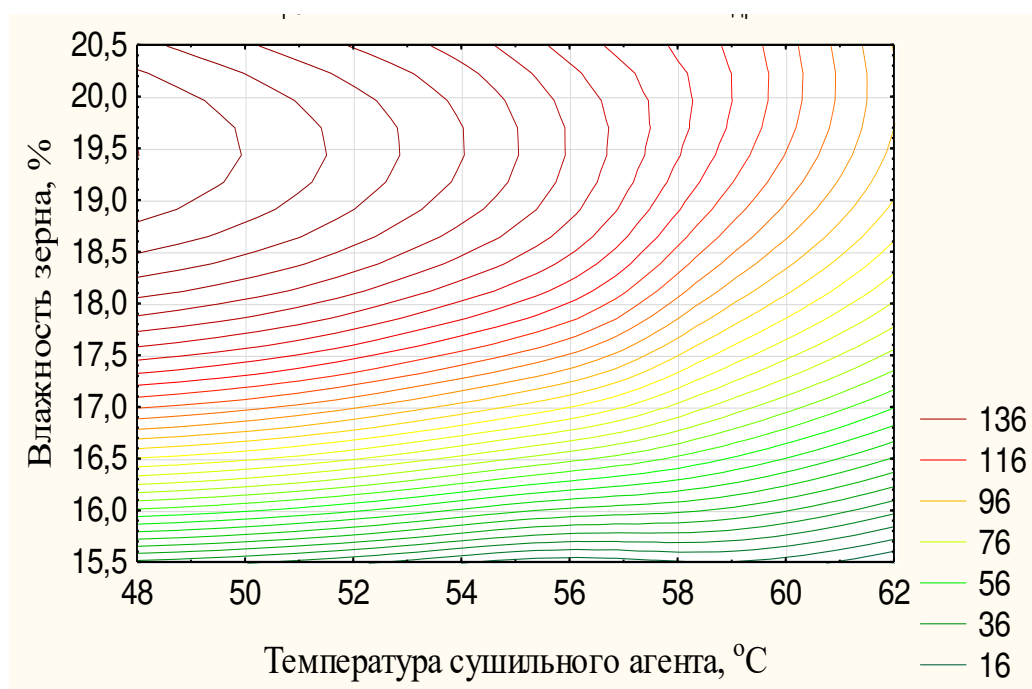


Рис. 4.19 – Двумерное сечение поверхности отклика зависимости продолжительности сушки зерна от температуры сушильного агента и влажности зерна

С ростом температуры сушильного агента и понижением влажности зерна продолжительность сушки снижается. При этом в продолжительность сушки входит время прогрева самой сушилки, которое составляет порядка 20 мин до набора температуры сушильного агента в пределах 45°C.

4.6 Результаты исследования модульной сушилки в производственных условиях

Исследования модульной сушилки аэродинамического нагрева в производственных условиях были проведены в августе 2024 года на базе учхоза Брянского ГАУ. Для испытаний использовалось зерно пшеницы «Московская – 39» после очистки зернового вороха на зерноочистительной установке «Петкус».

Общий вид модульной сушилки с загрузочным шнековым транспортом ТСШ-10 представлен на рис. 4.20.

Транспортер имеет пульт управления с частотным преобразователем для регулировки частоты вращения шнека. Высота загрузки транспортером – 2,45 м, высота сушильной шахты – 2,37 м.



Рисунок 4.20 – Общий вид модульной сушилки с загрузочным транспортером ТСШ-10

В режиме двухконтурной рециркуляции сушильного агента были проведены исследования сушилки с полной загрузкой сушильной шахты. Сушке подвергалось зерно пшеницы средней влажностью 18 % в количестве 450 кг.

Вначале в течение 10 минут производился разогрев сушильного агента при его рециркуляции только по внутреннему контуру до температуры 40 °С. При этом сушильный агент в сушильную шахту не поступал. Затем подключался внешний контур рециркуляции с подачей сушильного агента в сушильную шахту.

«Изменение температуры сушильного агента при двухконтурной его рециркуляции в процессе сушки зерна представлено» [79] на рис. 4.21. Максимальная температура сушильного агента составила 52,3°С.

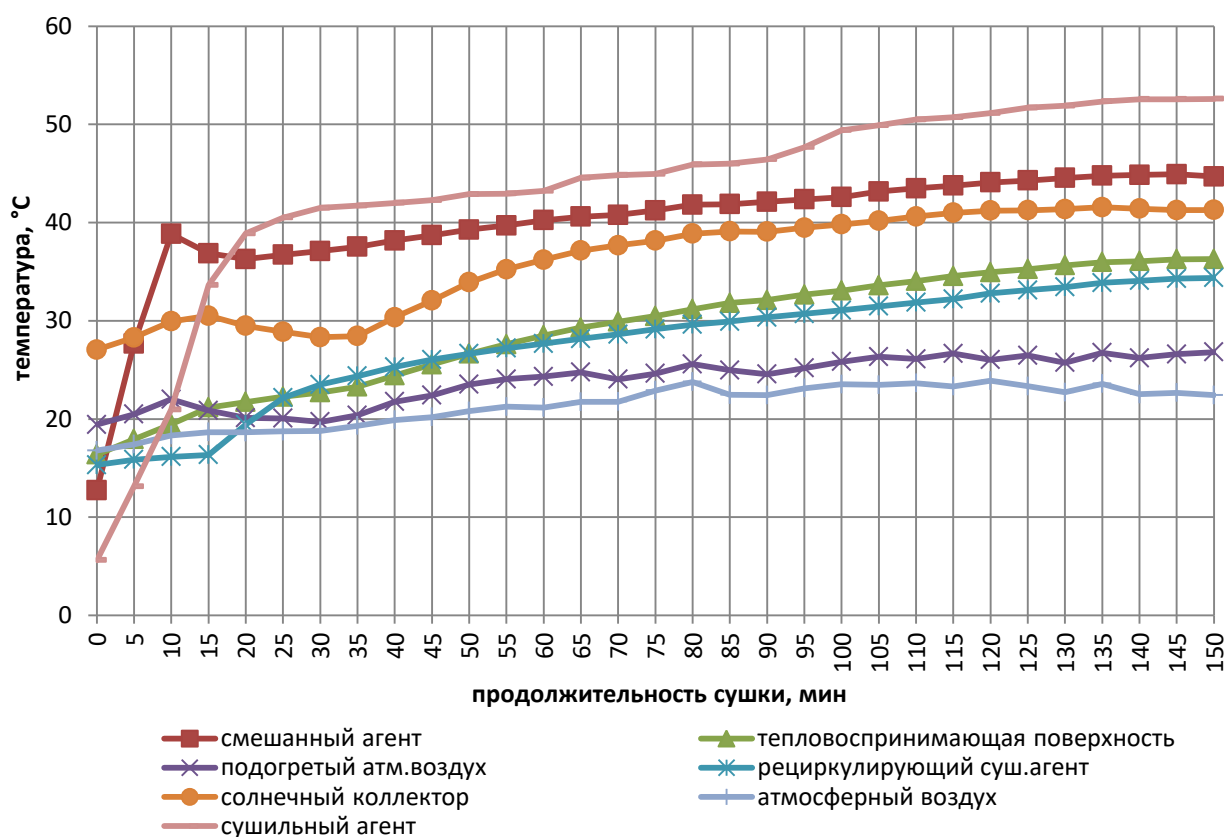


Рисунок 4.21 – Изменение температуры сушильного агента в процессе сушки зерна при двухконтурной рециркуляции [93]

На рис. 4.22 представлены экспериментальная кривая изменения температуры сушильного агента (см. рис. 4.21), теоретическая кривая, построенная на основе решения дифференциального уравнения (2.63) и ее

аппроксимация экспоненциальной зависимостью (2.77) по методу наименьших квадратов.

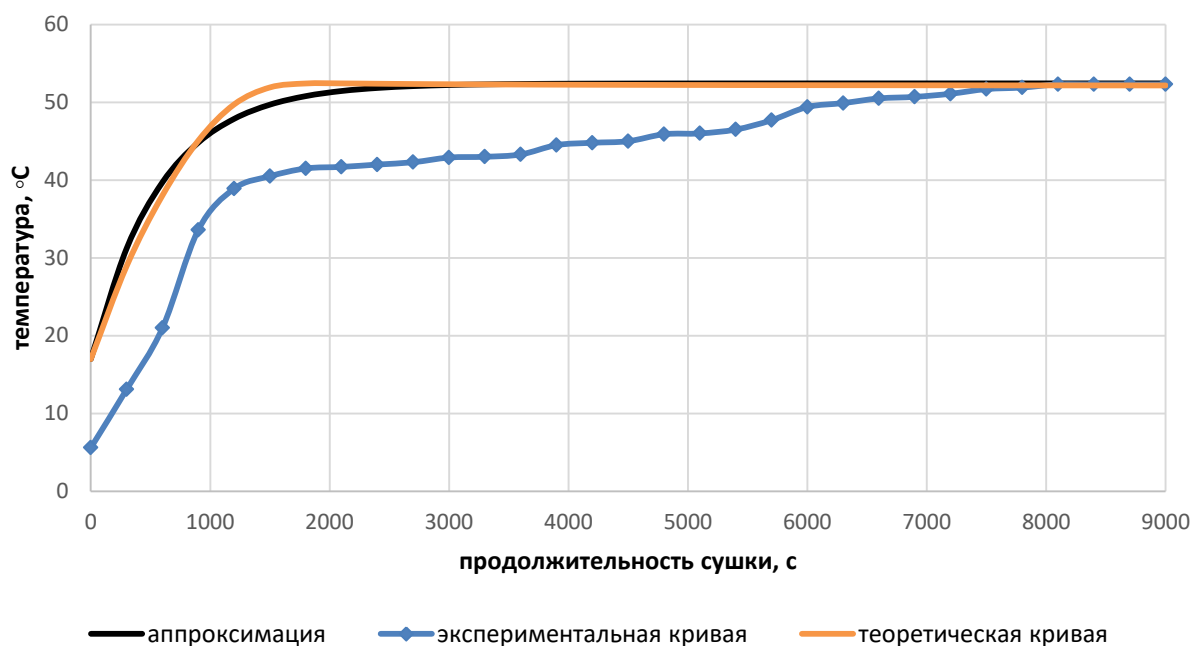


Рисунок 4.22 – Теоретическая и экспериментальная зависимости изменения температуры сушильного агента в процессе сушки зерна

Анализ рис. 4.22 показывает, что на момент окончания процесса сушки значение температуры сушильного агента на основании теоретической и экспериментальной кривой практически совпадают.

Низкая в эксперименте начальная температура сушильного агента $5,6^{\circ}\text{C}$, связана с тем, находящийся в сушильной камере основного модуля воздух, а также внутренняя обшивка камеры за счет ее хорошей теплоизоляции не успели прогреться до температуры окружающей среды 17°C к началу испытаний.

Поэтому фактический рост температуры сушильного агента имеет отставание от теоретической зависимости. Тем не менее, при фактической температуре сушильного агента $52,34^{\circ}\text{C}$ в конце процесса сушки и расчетной температуре $52,16^{\circ}\text{C}$ предложенные теоретические зависимости позволили определить температуру сушильного агента в конце процесса сушки с точностью до 5% [93]. Это позволяет прогнозировать максимальную температуру нагрева зерна на основании регрессионной зависимости, полученной в результате

обработки экспериментальных данных по сушке зерна в модульной сушилке (рис. 4.23).

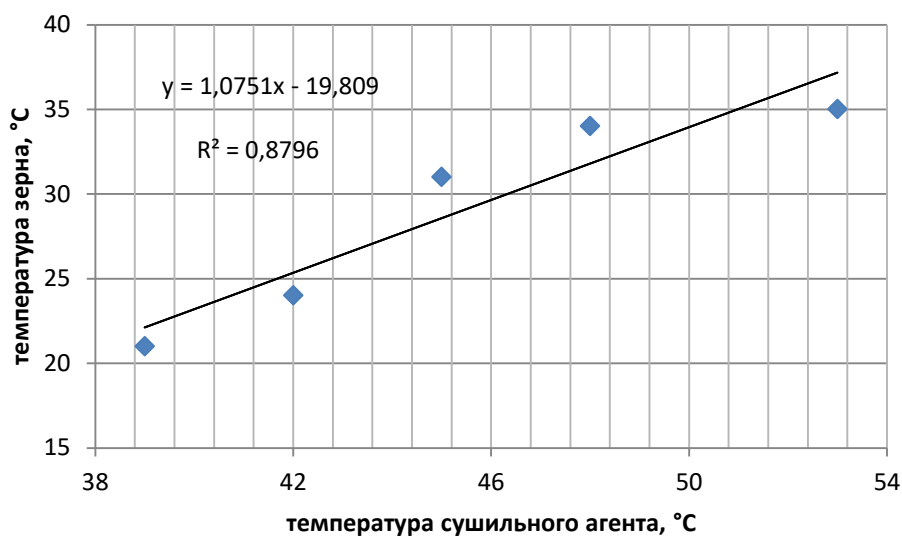


Рисунок 4.23 – Зависимость температуры зерна от температуры сушильного агента

Температура нагрева зерна составила 35 °C при температуре сушильного агента 52,34 °C, что с погрешностью до 4% рассчитывается на основании регрессионной зависимости рис. 4.23.

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет с высокой точностью прогнозировать максимальную температуру нагрева сушильного агента. Более точное прогнозирование температуры сушильного агента на протяжении всего процесса сушки можно ожидать в случае использования модели для специализированной зерносушилки аэродинамического нагрева. Однако и в рассматриваемом случае достаточно точное определение максимальной температуры нагрева сушильного агента позволяет определить максимальную температуру нагрева зерна, которая определяет его дальнейшие технологические качества.

На рис. 4.24 представлено изменение коэффициента рециркуляции сушильного агента, рассчитанное по выражению (2.88).

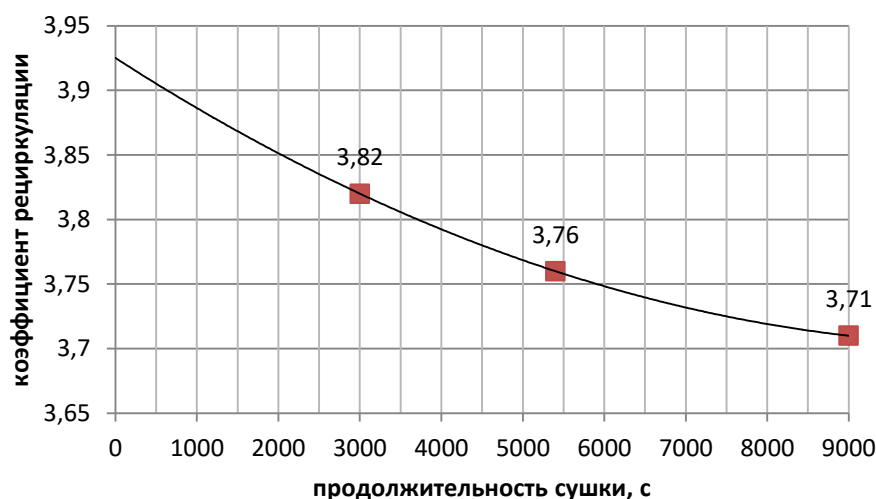


Рисунок 4.24 – Изменение коэффициента рециркуляции сушильного агента в процессе сушки

Коэффициент рециркуляции в процессе сушки меняется незначительно, имея тенденцию некоторого уменьшения к концу процесса. Баланс воздушных потоков в сушилке (без учета внутреннего канала рециркуляции) представлен на рис. 4.25.

Расход в сушильную шахту L_3 , 0,489 м ³ /с, 79,0%	Общий расход сушильного агента 0,619 м ³ /с, 100%	Расход отработанного сушильного агента по внешнему каналу рециркуляции L_4 0,202 м ³ /с, 33,0%	Расход через приоткрытую дверь $L_{\text{под1}}$, 0,314 м ³ /с, 51,0%
Расход в пневмотранспортер $L_{\text{пт}}$, 0,130 м ³ /с, 21,0%		Расход через верхний подсасывающий патрубок $L_{\text{пв}}$, 0,023 м ³ /с, нижний подсасывающий патрубок $L_{\text{пн}}$, 0,010 м ³ /с, всего 0,033 м ³ /с, 5%	Расход через дополнительный подсос $L_{\text{под2}}$, 0,070 м ³ /с, 11%

Рисунок 4.25 – Баланс воздушных потоков в сушилке (без учета внутреннего канала рециркуляции)

Расход воздуха по внутреннему каналу рециркуляции составляет 1,5 м³/с.

Кривая сушки и температурная кривая исследуемого процесса сушки зерна представлены на рис. 4.26.

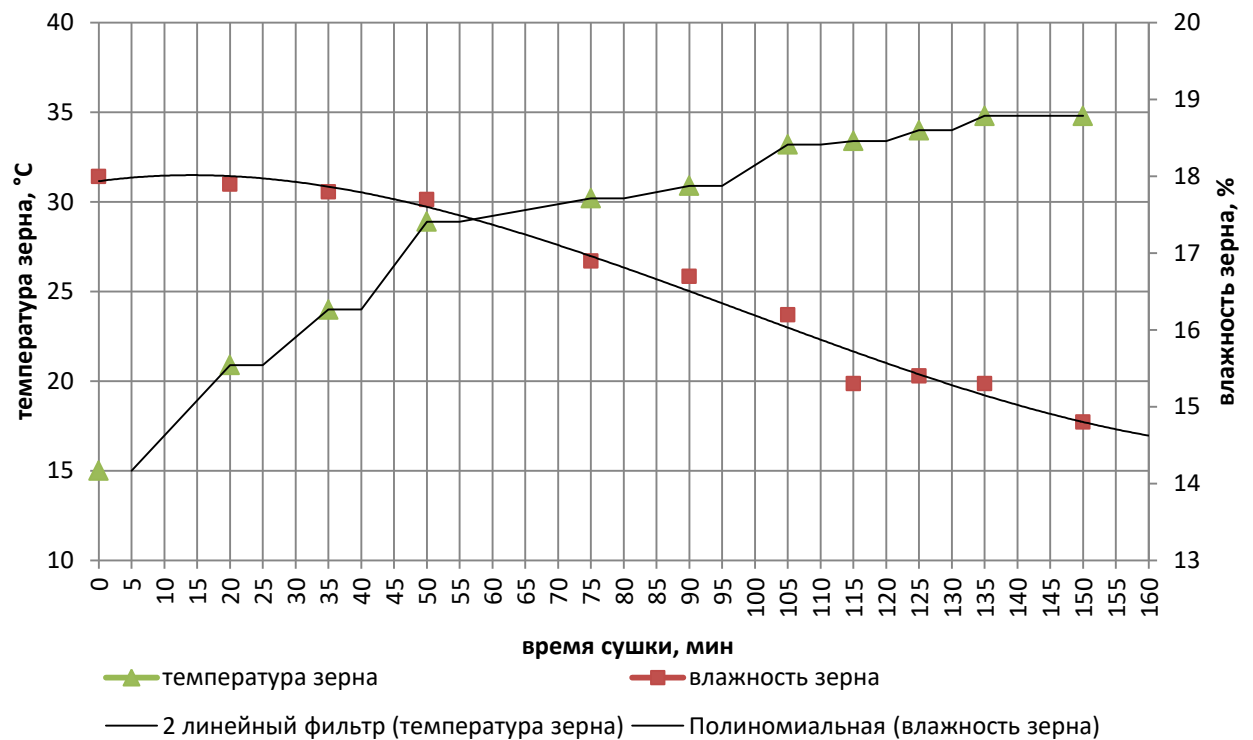


Рисунок 4.26 – Кривая сушки и температурная кривая

Форма кривых характерна для капиллярнопористых коллоидных тел, к которым относится зерно. Процесс сушки продолжался 2,5 часа до достижения влажности зерна 14,5 %. При этом температура зерна достигла 35 °C.

На рис. 4.27 представлена кривая скорости сушки.

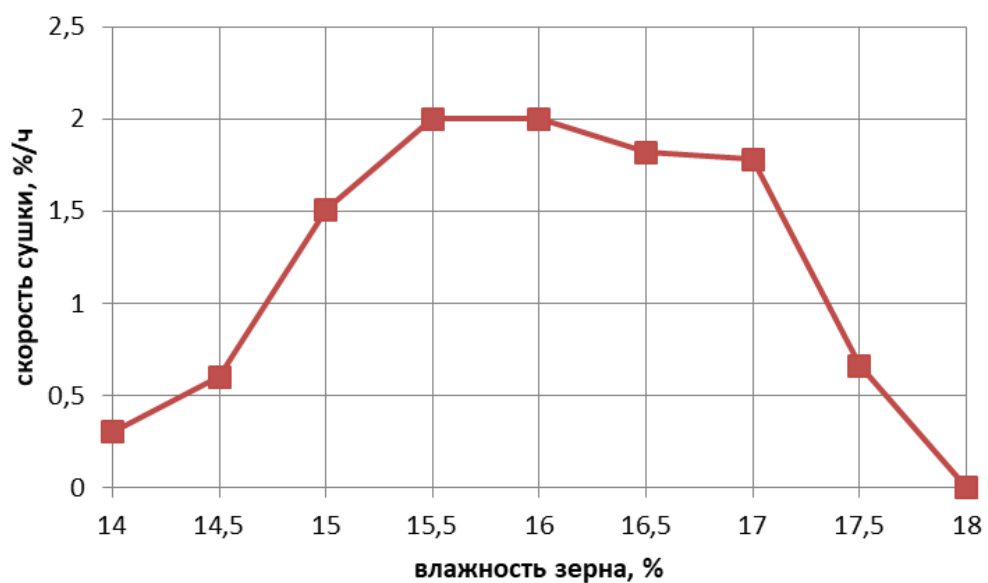


Рисунок 4.27 – Кривая скорости сушки

Максимальная скорость сушки составила 2 %/ч. После выгрузки зерна его влажность составила 13,5...13,8 %, что соответствует требованиям.

Ранее проведенные испытания сушилки показали, что при выгрузке зерна из сушильной камеры пневмотранспортером дополнительное снижение влажности зерна может достигать до 1,0%.

Согласно ГОСТ 28293-89, температура сухого зерна на выходе из шахтной сушилки не должна превышать температуру окружающего воздуха более чем на 10 °С. Т.к. температура нагрева зерна в модульной сушилке достигает 35...40°C, то в процессе его сушки непрерывная выгрузка без охлаждения высушенного зерна возможна только при температуре окружающей среды не ниже 25...30°C.

Такой режим возможен в модульной сушилке за счет установки зерновыми заслонками в выпускном устройстве сушильной шахты соответствующего расхода зерна в пневмотранспортер и обеспечением за счет частотного преобразователя такой же подачи загрузочного транспортера.

Дополнительная секция охлаждения зерна может отсутствовать и при более низких температурах окружающей среды, за счет охлаждения зерна в процессе его пневмотранспортирования в разгрузочную емкость отдельным вентилятором с подачей в материалопровод атмосферного воздуха [78].

Однако в данном случае, вследствие более низкой температуры окружающей среды и использования сушильного агента для работы пневмотранспортера, рекомендуемым режимом работы модульной сушилки является сушка зерна в камерном режиме с его постоянной рециркуляцией пневмотранспортером [78].

Это связано также с тем, что определение производительности загрузочного транспортера ТСШ-10 в зависимости от частоты питающего тока показало, что даже при частоте тока 20 Гц производительность на загрузке зерна составляет 1,773 т/ч (рис. 4.28), что превышает производительность пневмотранспортера и, в целом, производительность сушилки.

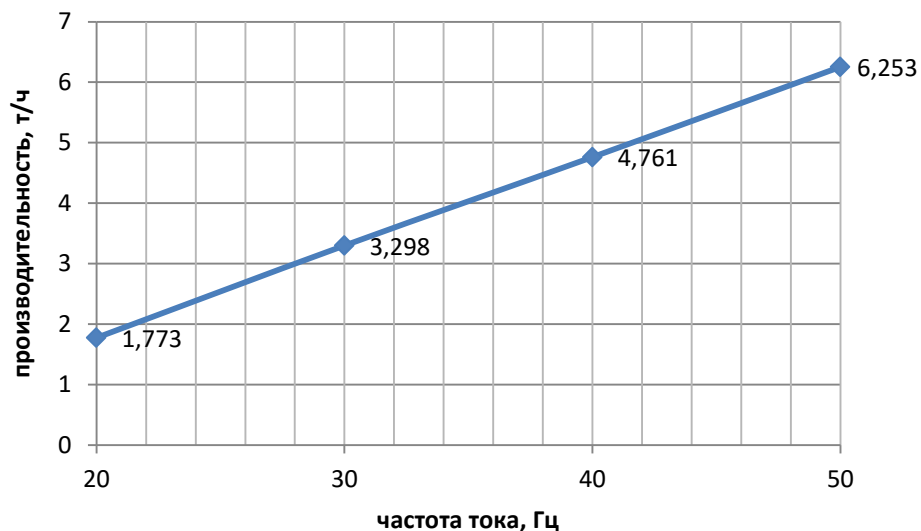


Рисунок 4.28 – Зависимость производительности загрузочного транспортера от частоты тока

Как вариант возможно периодическое включение загрузочного транспортера при работе сушилки в режиме непрерывной выгрузки высушенного зерна. Однако в этом случае подача зерна в пневмотранспортер будет невысокая, и он фактически будет сбрасывать значительное количество сушильного агента в атмосферу.

Скорость воздушного потока на входе в пневмотранспортер составила 17,8...18,8 м/с, что соответствует расходу воздуха до 0,13 м³/с или 467 м³/ч.

Замеры статического давления в материалопроводе при работе пневмотранспортера показали, что на входе оно составляет 450...570 Па.

При максимальном открытии зерновых заслонок производительность пневмотранспортера в режиме рециркуляции зерна в сушильной шахте составила 432 кг/ч. Производительность пневмотранспортера в режиме выгрузки зерна в циклон составила 405 кг/ч. Выгрузка зерна производилась в мешки, подвешиваемые под разгрузочным циклоном.

При разгрузке сушильной шахты необходима максимальная производительность пневмотранспортера для сокращения времени процесса. Для ее достижения внутренний канал рециркуляции на границе с камерой ротора-

нагревателя закрывается соответствующими заслонками и открывается максимальная подача приточного атмосферного воздуха на вход ротора-нагревателя, который обеспечивает охлаждение высушенного зерна до необходимых пределов. При этом производительность пневмотранспортера составляет порядка 450 кг/ч.

Увеличение сечения материалопровода пневмотранспортера для достижения бóльшей производительности нецелесообразно, т.к. в этом случае увеличивается расход сбрасываемого сушильного агента, и его температура будет ниже. Для компенсации этого снижения придется увеличить мощность и диаметр ротора-нагревателя либо повысить его частоту вращения.

Решением этой проблемы может быть использование отдельного нагнетателя для пневмотранспортера. При этом вместо пассивного вибратора рекомендуется использовать защитную вставку в выпуске (рис. 4.29) [19].



Рисунок 4.29 – Работа пневмотранспортера с защитной вставкой в выпуске

«Использование защитной вставки в выпуске является перспективным направлением повышения производительности пневмотранспортера при условии повышения начальной скорости воздушного потока на его входе» [19].

В качестве материалопровода пневмотранспортера сушилки использованы выпускаемые промышленностью пластмассовые прямоугольные воздуховоды размером 120х60 мм, что за минусом толщины стенок воздуховодов соответствует площади поперечного сечения 68 см².

Требуемый расход воздуха при производительности пневмотранспортера 450 кг/ч и массовой концентрации транспортируемой смеси 0,9 кг/кг составляет 388 м³/ч.

Динамическое давление воздушного потока в материалопроводе при скорости воздушного потока 15,5 м/с и скорости движения зерновки 3 м/с составляет 160,2 Па.

Длина горизонтального участка материалопровода равна 2,07 м; высота вертикального участка материалопровода равна 2,05 м; приведенный внутренний диаметр материалопровода равен 0,09 м; сумма коэффициентов местных сопротивлений равна 7,26. При разгрузке в циклон коэффициент его местного сопротивления принят равным 5,3.

Статическое давление составляет 2440,7 Па, а полное давление равно 2600,9 Па в режиме рециркуляции зерна. Мощность, затрачиваемая на работу пневмотранспортера, в этом случае, составит 0,40 кВт. Потребляемая мощность на привод ротора-нагревателя в режиме прогрева сушилki составила 20,0 кВт, при разгрузке сушильной шахты в конце процесса сушки с максимальной подачей воздушного потока на вход ротора-нагревателя – 13,7 кВт.

При разгрузке зерна в циклон статическое давление составляет 4833,5 Па, а полное давление равно 4993,7 Па. Мощность, затрачиваемая на работу пневмотранспортера при разгрузке зерна в этом случае, составит 0,76 кВт.

Сушильная шахта была полностью разгружена, пневмоожижение зерна в зоне выпуска не создало проблемы с удалением последних порций зерна из нижнего бункера выпускного устройства. Фартук-отбойник зерна с фильтрующим ограждением также обеспечили работу в расчетном режиме.

В ходе производственной проверки установили, что двухконтурная организация рециркулирования сушильного агента в основном и дополнительном модулях сушилki обеспечивает его нагрев до рабочих температур и высушивание зерна до кондиционной влажности. Повышение температуры нагрева сушильного агента возможно и до более высоких значений при изготовлении специализированной зерносушилki аэродинамического нагрева с

соответствующей конструкцией внутреннего контура рециркуляции сушильного агента. Однако в этом случае необходимо использовать материалопровод пневмотранспортера из более термостойкого материала, т.к. при температуре сушильного агента 80°C наблюдались случаи коробления стенок материалопровода при сушке яблок в основном модуле сушилки.

«Бесприводное выпускное устройство, представляющее собой последовательно установленную комбинацию бесприводного выпускного устройства механического типа, однетрубного пневмотранспортера низкого давления нагнетающего типа с разомкнутым циклом воздуха, приемником типа «Тройник» с пассивным вибратором в виде подпружиненной пластины и отбором воздуха из рабочей камеры ротора-нагревателя сушилки, материалопровода прямоугольного сечения, разгрузителей в виде центробежного циклона для высушенного зерна и резинового зерно-отбойного фартука для рециркулирующего зерна» [99] обеспечивает работу модульной сушилки аэродинамического нагрева на требуемых режимах сушки зерна (рис. 4.30).



Рисунок 4.30 – Работа зерно-отбойного фартука с фильтрующим ограждением

Забивания выпускного устройства механического типа и пневмотранспортера зерна дополнительного модуля в виде сушильной шахты не наблюдалось. Поломок модульной сушилки также не выявлено.

Выводы по главе 4

1. Установлено, что при однократном проходе сушильного агента в сушилке его температура нагрева составляет порядка 37 °С. При этом, температура нагрева зерна составила 25 °С. Потребляемая мощность на привод ротора-нагревателя – 7 кВт. Для повышения температуры нагрева необходима рециркуляция отработанного сушильного агента.

2. При организации двухконтурной рециркуляции отработанного сушильного агента температура его нагрева достигает 53...60 °С. Коэффициент рециркуляции в процессе сушки меняется незначительно, имея тенденцию некоторого уменьшения к концу процесса, и составляет в среднем 3,8. При этом, максимальная температура нагрева зерна составляет 35...40°С. Максимальная скорость сушки составляет 2%/ч.

3. В результате реализации плана многофакторного эксперимента получена регрессионная зависимость продолжительности сушки зерна от его влажности и температуры сушильного агента. Наибольшее влияние на продолжительность сушки оказывает влажность зерна. Предложенные теоретические зависимости позволяют определить температуру сушильного агента в конце процесса сушки с погрешностью до 5%, что позволяет прогнозировать максимальную температуру нагрева зерна [93].

4. Для повышения температуры нагрева сушильного агента необходимо изготовление специализированной зерносушилки аэродинамического нагрева с соответствующей конструкцией внутреннего контура рециркуляции сушильного агента.

5. Исследования в производственных условиях показали, что применение двухконтурной рециркуляции сушильного агента обеспечивает работу модульной сушилки аэродинамического нагрева на требуемых режимах сушки зерна. Рекомендующим режимом работы модульной сушилки является сушка зерна в камерном режиме с его постоянной рециркуляцией пневмотранспортером.

ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МОДУЛЬНОЙ СУШИЛКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА

«В соответствие с методикой» [99] [27] «оценку эффективности применения» [99] «модульной сушилки аэродинамического нагрева проведем по снижению прямых эксплуатационных затрат в сравнении с использованием» [99] мобильной зерносушилки АТМ-10 (рис.5.1).



Рисунок 5.1 – Мобильная зерносушилка АТМ-10 [105]

«Эксплуатационные затраты на работу» [99] «модульной сушилки» [99]:

$$C_{\text{э}} = C_{\text{а}} + C_{\text{то}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{эл}} + C_{\text{т}}, \text{ руб./т,} \quad (5.1)$$

«где $C_{\text{а}}$ - амортизационные затраты, связанные с реновацией» [99] сушилки, машин и оборудования, обеспечивающих ее функционирование;

$C_{\text{то}}$ – «затраты на ТО и ремонт» [99] сушилки, машин и оборудования, обеспечивающих ее функционирование;

$C_{\text{зп}}$ – «затраты на зарплату обслуживающего персонала» [99] сушилки, машин и оборудования, обеспечивающих ее функционирование;

$C_{\text{эл}}$ - «затраты на электрическую энергию» [99];

$C_{\text{т}}$ – затраты на топливо.

«Амортизационные затраты на реновацию» [99] сушилки, машин и оборудования, обеспечивающих ее функционирование:

$$C_a = \frac{K_m \cdot H_a \cdot C_o}{100 \cdot T_3 \cdot W_c}, \quad (5.2)$$

«где K_m - коэффициент, учитывающий затраты на монтаж» [99];

« H_a – норма амортизационных отчислений на реновацию» [99], %;

« C_o – общая стоимость» [99] сушилки, машин и оборудования, обеспечивающих ее функционирование, руб.;

« T_3 - сезонная» [99] или годовая загрузка сушилки, машин и оборудования, обеспечивающих ее функционирование, ч;

W_c - производительность сушилки, т/ч.

«Общую стоимость» [99] модульной сушилки «представим в виде» [99]:

$$C_o = 0,5 C_b + C_d + C_{\pi}, \quad (5.3)$$

где C_b – стоимость базового модуля с коэффициентом 0,5, т.к. принимаем, что 50% стоимости будет переноситься на процесс сушки яблок;

C_d - стоимость дополнительного модуля, руб.;

C_{π} – «стоимость пневмотранспортера с разгрузочным циклоном» [99], руб.

Стоимость базового модуля примем по стоимости двухроторной сушилки аэродинамического нагрева РНУ-50, имеющей примерно равные технические характеристики и схожее конструктивное исполнение, равной 815000 руб. (см. рис. 1.14) [100].

Стоимость дополнительного модуля, изготовленного по договору с ООО «ОКБ по теплогенераторам», составила 361666 руб.

«Стоимость пневмотранспортера будет складываться из стоимости профильной трубы материалопровода и фасонных соединительных частей. Стоимость профильной трубы общей длиной 3,5 м составляет 1633 руб.

Требуемые фасонные части: переход с прямоугольного на круглый профиль трубы – 3 шт. (633 руб.); прямоугольный отвод 90° - 2 шт. (384 руб.); круглого профиля диаметром 100 мм отвод 45° - 2 шт. (422 руб.); труба круглого профиля диаметром 100 мм – 0,8 м (330 руб.), соединитель профиля – 3 шт. (282 руб.).

Разгрузочный циклон (принимаем по аналогии с циклоном ЦРк-350, рассчитанным на расход воздуха 277...554 м³/ч [106]) массой 22 кг, стоимостью 17805 руб.

Производительность» [99] сушилки примем равную 0,2 т/ч, полученную в результате испытаний в производственных условиях, «коэффициенты учитывающие затраты на монтаж» [99], для сушилок примем равным 1,03, «сезонную загрузку» [99] равной 400 ч, норму амортизационных отчислений на реновацию для модульной сушилки вследствие ее простоты конструкции и многолетнего опыта эксплуатации в Брянском ГАУ равной 2% [99].

Стоимость сушилки АТМ-10 по данным [107] составляет 4382170 руб. Норму амортизационных отчислений на реновацию для сушилки АТМ-10 примем равной 10%.

При работе модульной сушилки не требуется дополнительного использования машин и оборудования, обеспечивающих ее функционирование.

При работе сушилки АТМ-10 необходимо обеспечить ее ежедневную заправку дизельным топливом.

Примем, что топливо на АЗС хозяйства будет доставляться топливозаправщиком АТЗ-17 на шасси МАЗ 36312 вместимостью 17000 л, стоимостью 6500000 руб. (рис. 5.3) [108, 109].

С АЗС хозяйства ежедневный подвоз топлива к сушилке АТМ-10 будет осуществляться с помощью прицепного топливозаправщика фирмы ARTAZ (рис. 5.4) стоимостью 406960 руб. [110], агрегатируемого с трактором МТЗ-80.1 стоимостью 2370000 руб. [111].



Рисунок 5.3 – Топливозаправщик АТЗ-17 [109]



Рисунок 5.4 – Прицепной топливозаправщик [110]

«Коэффициенты, учитывающий затраты на монтаж для» [99] топливозаправщиков и трактора примем равным 1, норму амортизационных отчислений равной 13% [99], годовую загрузку топливозаправщика АТЗ-17 равной 1200 ч, прицепного топливозаправщика равной 400 ч, трактора МТЗ-80.1 равной 1095 ч. Суточная производительность сушилки АТМ-10 составляет 45 т/ч или при 10-ти часовой рабочей смене 4,5 т/ч.

Затраты на ТО и ремонт сушилки, машин и оборудования, обеспечивающих ее функционирование [99]

$$C_{\text{ТО}} = \frac{C_0 \cdot H_{\text{ТО}}}{100 \cdot T_3 \cdot W_c}, \quad (5.4)$$

«где $H_{\text{ТО}}$ – норма амортизационных отчислений на ТО и ремонт» [99], %.

Для сушиллки АТМ-10 и сопутствующего комплекса машин норма амортизационных отчислений на ТО и ремонт составит 6%.

Для модульной сушиллки норму «амортизационных отчислений на ТО и ремонт» [99] примем 0,5% в связи с высокой надежностью сушиллки.

«Затраты на зарплату» [99]

$$C_{\text{зп}} = \frac{C_{\text{т}} \cdot K_{\text{сл}} (1 + K_{\text{доп}}/100) \cdot N_{\text{ч}}}{W_{\text{с}}}, \quad (5.5)$$

«где $C_{\text{т}}$ – тарифная ставка обслуживающего персонала» [99], руб./ч;

« $K_{\text{сл}}$ – коэффициент сложности работ» [99];

« $K_{\text{доп}}$ – размер дополнительной оплаты труда» [99], %;

$N_{\text{ч}}$ – число обслуживающего персонала, чел.

Тарифная ставка рабочего, обслуживающего сушиллку, составляет 240 руб./ч, водителя топливозаправщика и тракториста 480 руб./ч.

Коэффициент сложности работ принимаем равным 1, коэффициент доплат для рабочего сушиллки 10%, для водителя и тракториста топливозаправщиков 25% для варианта на базе сушиллки АТМ-10,

Для рабочего модульной сушиллки принимаем коэффициент сложности работ равным 0,5, т.к. в течение 2,5 ч цикла сушки партии зерна рабочий практически не задействован, коэффициент доплат 10%.

Затраты на электрическую энергию

$$C_{\text{эл}} = N \cdot T_{\text{эл}} / W_{\text{с}}, \quad (5.6)$$

где N – мощность электропривода сушиллки, кВт;

$T_{\text{эл}}$ – стоимость 1 кВт·ч, 9 руб./кВт·ч.

Установленная мощность электродвигателей сушилки АТМ-10 составляет 37,6 кВт.

«Затраты на дизельное топливо при работе сушилки» [8] АТМ-10

$$C_T = q \cdot S_T / W_c, \quad (5.7)$$

«где q - средний расход дизельного топлива сушилкой, л/ч» [8];

S_T - «стоимость литра дизельного топлива» [8], 68 руб./л.

При работе сушилки АТМ-10 необходимо обеспечить ее ежедневную заправку дизельным топливом.

При среднем расходе дизельного топлива сушилкой АТМ-10 70 л/ч [105] и 10-ти часовой работе сушилки в сутки расход дизельного топлива составит 700 л/сутки.

При сезонной загрузке сушилки 400 ч сезонная потребность в топливе составит 28000 л.

Примем, что на АЗС хозяйства данное количество топлива будет доставляться в сезон двумя рейсами топливозаправщика АТЗ-17 со средним расходом топлива 30 л/100 км и плечом доставки 50 км.

Тогда, затраты на топливо, вносимые топливозаправщиком АТЗ-17 будут равны:

$$C_T = q_3 \cdot n \cdot l_3 \cdot S_T / (T_3 \cdot W_c), \quad (5.8)$$

где q_3 - расход дизельного топлива, л/100 км;

n - число рейсов топливозаправщика;

l_3 - плечо доставки, км.

Значение T_3 принимаем, в данном случае, равным сезонной загрузке сушилки.

С АЗС хозяйства ежедневный подвоз топлива к сушилке будет осуществляться с помощью прицепного топливозаправщика, агрегатируемого с трактором МТЗ-80.1 с часовым расходом топлива на транспортных операциях 10 кг/ч. Время подвоза и заправки сушилки примем 1 ч.

Тогда, затраты на топливо, вносимые трактором МТЗ-80.1 с прицепным топливозаправщиком будут равны:

$$C_T = q_T \cdot t_T \cdot S_T / (\rho_T \cdot W_{\text{сут}}), \quad (5.9)$$

где q_z - расход дизельного топлива трактором, кг/ч;

t_T - время подвоза топлива и заправки сушилки, ч/сутки;

ρ_T - плотность дизельного топлива, 860 кг/м³;

$W_{\text{сут}}$ - суточная производительность сушилки, 45 т/сутки.

«Тарифную ставку работников, коэффициенты сложности и доплат, коэффициенты учитывающие затраты на монтаж, ТО и ремонт, амортизационные отчисления,» [99] расход топлива, «а также сезонную загрузку сушилки» [99], машин и оборудования, обеспечивающих ее функционирование, «приняли согласно нормативным документам» [99] и фактическим данным.

Результаты расчета экономической эффективности сведем в таблицу 5.1.

Использование модульной сушилки в режиме сушки зерна снижает эксплуатационные затраты на 537 руб./т или 24 %. Капитальные вложения окупаются сушкой 727 т зерна.

Сравним расход энергии на сушку зерна рассматриваемых сушилок.

Для сушилки АТМ-10 при теплоте сгорания дизельного топлива 42,7 МДж/кг и расходе топлива 70 кг/ч количество выделяемой теплоты составит: $42,7 \cdot 70 = 2989,0$ МДж/ч. При производительности 4,5 т/ч в расчете на тонну зерна придется: $2989,0 / 4,5 = 664,2$ МДж/т.

«Таблица 5.1 – Результаты расчета экономической эффективности» [99]

№ п/п	Наименование показателя	Сушилка АТМ-10	Модульная сушилка	Изменение показателя, ± %
1	Стоимость сушилки C_o , руб.	4382170	1205556	- 73
2	Производительность сушилки W_c , т/ч	4,5	0,2	- 95
3	Амортизационные затраты на реновацию сушилки C_a , руб./т	251	206	- 59
	Амортизационные затраты на реновацию дополнительного комплекса машин C_a , руб./т	249	-	
4	Затраты на ТО и ремонт сушилки $C_{то}$, руб./т	147	50	- 81
	Затраты на ТО и ремонт дополнительного комплекса машин $C_{то}$, руб./т	113	-	
5	Затраты на зарплату $C_{зп}$, руб./т	59	660	+203
	Затраты на зарплату обслуживающего персонала дополнительного комплекса машин $C_{зп}$, руб./т	266	-	
6	Затраты на электрическую энергию $C_{эл}$, руб./т	76	787	+ 1035
7	Затраты на топливо C_t , руб./т	1079	-	-
8	Эксплуатационные затраты $C_э$, руб./т	2240	1703	- 24

С учетом соотношения $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,62 \text{ МДж}$ и мощности электродвигателей АТМ-10 равной 37,6 кВт. дополнительный расход энергии на тонну зерна от работы электродвигателей сушилки АТМ-10 составит $37,6/4,5 \cdot 3,62 = 30,2 \text{ МДж/т}$.

Тогда суммарный расход энергии на сушку тонны зерна в сушилке АТМ-10 составит: $664,2 + 30,2 = 694,4 \text{ МДж/т}$.

В модульной сушилке высушиваемая партия зерна составила 0,45 т. Тогда в сушилке АТМ-10 на сушку этого количества зерна было бы затрачено теплоты:

$$694,4 \cdot 0,45 = 312,5 \text{ МДж.}$$

В модульной сушилке при потребляемой мощности на привод ротора-нагревателя 17,5 кВт и времени сушки 2,5 ч расход теплоты составит: $17,5 \cdot 2,5 \cdot 3,62 = 158,4 \text{ МДж}$ или 352 МДж/т.

Таким образом, снижение расхода энергии на сушку зерна в модульной сушилке составит $(312,5 - 158,4) / 312,5 \cdot 100\% = 49,3\%$ по сравнению с сушилкой АТМ-10.

При этом дальнейшее совершенствование конструкции зерносушилки аэродинамического нагрева позволить еще больше повысить энергоэффективность процесса сушки.

Повышение производительности сушилки аэродинамического нагрева решается путем увеличения объема сушильной шахты и применения нескольких роторов-нагревателей с соответствующей мощностью приводных электродвигателей.

Выводы по главе 5

Технико-экономическая оценка «модульной сушилки аэродинамического нагрева по критерию прямых эксплуатационных затрат на процесс показала, что в сравнении с использованием» [99] сушилки АТМ-10 они снижаются на 537 руб./т или 24 % при использовании модульной сушилки. «Срок окупаемости капитальных вложений определяется временем сушки» [99] 727 т зерна в модульной сушилке [99].

Сравнительная оценка эффективности процесса сушки в модульной сушилке и мобильной зерносушилке АТМ-10 показала, что снижение расхода энергии на сушку зерна в модульной сушилке составляет 49,3%.

Применение дополнительного модуля обеспечивает расширение функциональных возможностей сушилки аэродинамического нагрева, увеличение ее годовой загрузки. Энергоемкость процесса сушки при снижении влажности зерна с 20 до 14 % составила 352 МДж/т при производительности по влажному зерну 0,2 т/ч.

Заключение

В результате решения поставленных задач предложена конструктивно-технологическая схема и обоснованы параметры модульной сушилки аэродинамического нагрева в режиме двухконтурной рециркуляции сушильного агента, обеспечивающей снижение энергоемкости и эксплуатационных затрат на процесс сушки зерна.

Общие выводы исследования:

1. Сушилка аэродинамического нагрева обеспечивает сушку зерна за счет дополнительного модуля в виде сушильной шахты при организации двухконтурной рециркуляции сушильного агента: внешний – воздуховодами, соединяющими дополнительный модуль с базовым; внутренний - замыкает вход и выход ротора-нагревателя каналами базового модуля. Сброс части отработанного сушильного агента обеспечивается за счет работы выпускного устройства сушильной шахты, представляющего собой комбинацию бесприводного выпускного устройства механического типа и пневмотранспортера с разгрузочным циклоном и зерно-отбойным фартуком с фильтрующим ограждением в загрузочном бункере сушильной шахты.

2. Разработана математическая модель зависимости температуры сушильного агента от параметров модульной сушилки, которая позволяет прогнозировать максимальную температуру нагрева сушильного агента с погрешностью до 5 %.

Определены основные параметры сушильной шахты: объем сушильной шахты без учета объема бесприводного выпускного устройства составляет 0,63 м³ при габаритных размерах шахты 0,7х0,6х1,5 м; в шахте предусмотрено 9 подводящих коробов, 8 отводящих полных коробов и 8 полукоробов.

3. При организации двухконтурной рециркуляции отработанного сушильного агента температура его нагрева достигает 60 °С. При этом, температура нагрева зерна составляет 35 °С, максимальная скорость сушки равна 2%/ч, производительность сушилки 0,2 т/ч при начальной влажности зерна 20%.

Требуемый расход воздуха при производительности пневмотранспортера 450 кг/ч и массовой концентрации транспортируемой смеси 0,9 кг/кг составляет 388 м³/ч. Мощность, затрачиваемая на работу пневмотранспортера, составляет 0,76 кВт.

Получены регрессионные зависимости продолжительности сушки зерна от его влажности и температуры сушильного агента, температуры нагрева зерна от максимальной температуры сушильного агента, что позволяет с погрешностью до 4% прогнозировать максимальную температуру нагрева зерна.

4. Исследование модульной сушилки в производственных условиях и ее технико-экономическая оценка по критерию прямых эксплуатационных затрат на процесс показали, что они снижаются на 537 руб./т или 24 % в сравнении с использованием сушилки АТМ-10. При снижении влажности зерна с 20 до 14 % энергоемкость процесса сушки составила 352 МДж/т, что также на 49,3% меньше. Срок окупаемости капитальных вложений определяется временем сушки 727 т зерна в модульной сушилке.

Рекомендации производству

Для повышения производительности модульной сушилки необходимо увеличить мощность приводного электродвигателя и диаметр ротора-нагревателя, использовать отдельный вентилятор для работы пневмотранспортера с двухрежимным забором воздуха – из камеры ротора-нагревателя и из атмосферы.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке сушилок аэродинамического нагрева для различного сельскохозяйственного сырья.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Исследование процесса сушки семян различных сельскохозяйственных культур в сушилке аэродинамического нагрева.

Список литературы

1. А.с. 2019777 РФ. Способ сушки продуктов и аэродинамическая сушильная установка / В.А. Ананьев, А.П. Басукинский, А.Г. Шапошников. Б.И. 1994. №16.
2. А.с. 2106586 РФ. Аэродинамическая сушильная установка / Е.М. Шестопапов. Б.И. 1998. №7.
3. А.с. 2077633 РФ. Установка нагрева затвердевающих и вязких материалов / К.И. Арютов. Б.И. 1997. №11.
4. А.с. 2053177 РФ. Цистерна НИЦА-3 для затвердевающих и вязких материалов / К.И. Арютов. Б.И. 1996. №3.
5. Акулич, П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П.В. Акулич. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.
6. Атаназевич, В.И. Сушка зерна. – М.: ДеЛи принт, 2007. – 480 с.
7. Белоус, Н.М., Евдокименко, С.Н. Результаты сотрудничества ученых Брянского ГАУ и Кокинского опорного пункта ВСТИСП по развитию садоводства // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. - 2018. - № 1 (65). - С. 15-22.
8. Байдаков Е.М. Разработка барабанной гелиосушилки зерна и обоснование ее конструктивно-технологических параметров : дисс....канд. техн. наук / Байдаков Евгений Михайлович : 05.20.01. – М., 2012. – 177 с.
9. Будников, Д.А., Васильев А.Н., Шарко А.А. Научные основы проектирования переносной СВЧ конвективной установки для сушки зерна при хранении насыпью / Электротехнологии и электрооборудование в АПК. - 2023. - Т. 70, №1(50). - С. 10-17.
10. Будников, Д.А. Моделирование и результаты предпосевной СВЧ и конвективной тепловой обработки семян / Д.А. Будников, А.А. Васильев, А.Н. Васильев и др. // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. - 2020. - Т. 67, №4 (41). - С. 35-43.

11. Будников, Д.А., Васильев А.Н., Шарко А.А. Научные основы проектирования переносной СВЧ-конвективной установки для сушки зерна при хранении насыпью / Электротехнологии и электрооборудование в АПК. - 2023. - Т. 70, № 1 (50). - С. 10-17.
12. Будников, Д.А. Система управления экспериментальной установкой электрофизического воздействия на зерно / Д.А. Будников // Вестник Казанского государственного аграрного университета. - 2022. - Т. 17, № 2 (66). - С. 59-67.
13. Бутаков, С.Е. Воздуховоды и вентиляторы. – М. – Свердловск: Машгиз, 1958. – 351 с.
14. Валге, А.М. Математическая модель обоснования типоразмерного ряда сушилок зерна / А.М. Валге, В.А. Смелик, А.Н. Перекопский // АгроЭкоИнженерия. - 2023. - № 2 (115). - С. 59-70.
15. Вендин, С.В. Конвейерная сушилка пророщенного зерна с применением конвективного и инфракрасного нагрева / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, Р.З.О. Байрамов // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. - 2023. - № 1 (37). - С. 19-26.
16. Вендин, С.В. Сушилка пророщенного зерна / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, А.Ф. Окунев // Техника и технологии в животноводстве. - 2021. - №1. - С. 71-75.
17. Вендин, С.В. Результаты экспериментальных исследований сушилки пророщенного зерна / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, Р.З.О. Байрамов // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. - 2022. - Т. 14, № 4. - С. 114-122.
18. Влияние коэффициента рециркуляции сушильного агента на его температуру в сушилке аэродинамического нагрева / В.Н. Ожерельев, А.И. Купреенко, Д.А. Безик, Х.М.О. Исаев, О.А. Купреенко // Тракторы и сельхозмашины. - 2025. - Т. 92, № 1. - С. 99-106.
19. Влияние конструктивных параметров приемного устройства пневмотранспортера сушилки аэродинамического нагрева на его производительность / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, А.Г. Ялоза, О.А. Купреенко, С.Х. Исаев // Агроинженерия. - 2025. - Том. 27, № 4. - С. 25-33.

20. Волженцев, А.В., Булавинцев, Р.А., Козлов, А.В., Звеков, А.В. Сушка зерна в режиме пневмотранспорта / Агротехника и энергообеспечение. – 2021. – № 1 (30) – С. 99 – 103.
21. Волхонов, М.С. Повышение эффективности функционирования зерносушилки аэрожелобного типа в энергосберегающем режиме ее работы путем автоматизации системы рециркуляции отработавшего агента сушки / М.С. Волхонов, И.Б. Зимин, И.А. Смирнов // Известия Великолукской ГСХА. – 2015. - №2. – С. 23-29.
22. Гемке, Р.Г. Неисправности электрических машин. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 176 с.
23. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
24. Горячкин, В.П. Собрание сочинений в трех томах. Изд. 2-е. Том 1. – М.: Изд-во «Колос», 1968. – 720 с.
25. ГОСТ 30046-93 Зерновые. Определение насыпной плотности зерна, называемой «масса гектолитра» (контрольный метод). – М.: Издательство стандартов, 1994. – 8 с.
26. ГОСТ Р 55262-2012. Сушильные машины и установки сельскохозяйственного назначения. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2012. – 5 с.
27. Драгайцев, В.И. Методика экономической оценки технологий и машин в сельском хозяйстве. – М.: ВНИИЭСХ, 2010. – 147 с.
28. Загоруйко, М.Г. Интенсификация теплообмена в каналах подачи агента сушки / М.Г. Загоруйко, И.А. Башмаков // Аграрный научный журнал. - 2024. - № 7. - С. 105-109.
29. Загоруйко, М.Г. Исследования кинетики ИК-сушки семян рапса / М.Г. Загоруйко., С.А. Павлов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2021. - № 3 (55). - С. 6-11.

30. Загоруйко, М.Г. Исследование процесса сушки растительных отходов в изотермической модели / М.Г. Загоруйко, И.А. Башмаков, К.А. Степанов // Сельскохозяйственные машины и технологии. - 2023. - Т. 17, № 4. - С. 49-54.

31. Загоруйко, М.Г. Исследования по охлаждению зерна кукурузы в насыпи / М.Г. Загоруйко, С.А. Павлов, И.А. Башмаков // Аграрный научный журнал. - 2023. - № 1. - С. 144-149.

32. Загоруйко, М.Г. Обоснование математических моделей переменного теплоподвода при сушке зерна / М.Г. Загоруйко, М.Е. Бельшкينا, Р.А. Марин, И.А. Башмаков // Аграрный научный журнал. - 2021. - № 11. - С. 87-92.

33. Загоруйко, М.Г. Повышение эффективности сушки семян в реверсивной зерносушилке / М.Г. Загоруйко, С.А. Павлов, И.А. Башмаков // Сельскохозяйственные машины и технологии. - 2023. - Т. 17, № 1. - С. 76-80.

34. Загоруйко, М.Г. Тепломассоперенос в зерновке при переменных режимах / М.Г. Загоруйко, Р.А. Марин // Аграрный научный журнал. - 2021. - № 7. - С. 84-87.

35. Загоруйко, М.Г. Тепломассоперенос при импульсной сушке зерна / М.Г. Загоруйко, С.А. Павлов, И.А. Башмаков и др. // Аграрный научный журнал. - 2023. - № 7. - С. 143-146.

36. Зверев, С.В., Зверева, Н.С. Физические свойства зерна и продуктов его переработки. – М.: ДеЛи принт, 2007. – 176 с.

37. Значение поискового эксперимента при создании контактной зерносушилки / П.С. Агеев, С.А. Сутягин, В.И. Курдюмов др. // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2021. - № 1 (53). - С. 6-12.

38. Исаев, С.Х. Повышение эффективности сушилки аэродинамического нагрева обоснованием параметров комбинированного теплообменника : дис. ...канд. техн. наук : 05.20.01 / Исаев Самир Хафизович. – М., 2021. – 147 с.

39. Использование осциллирующего режима контактной сушки сыпучих материалов / П.С. Агеев, В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин и др. // Наука в центральной России. - 2022. - № 6 (60). - С. 19-26.

40. Исследование установки с инфракрасным нагревом зерна / С.А. Сутягин, П.С. Агеев, Г.В. Карпенко и др. // Наука в центральной России. - 2023. - № 5 (65). - С. 78-85.
41. Исследование зерносушилки с планчато-шнековым транспортёром / С.А. Сутягин, П.С. Агеев, Г.В. Карпенко и др. // Пермский аграрный вестник. - 2022. - № 4 (40). - С. 4-9.
42. Карпенко, А.Н. Сельскохозяйственные машины / А.Н. Карпенко, В.М. Халанский. - М.: Колос, 1983. - 495 с.
43. Каширин, Д.Е. Исследование процесса вакуумной инфракрасной сушки перги / Д.Е. Каширин, С.С. Морозов, Б.А. Нефедов и др. // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. - 2017. - № 3. - С. 168-173.
44. К обоснованию конструктивных и технологических параметров пневмотранспортера зерносушилки / А.И. Купреенко, Х.М.О. Исаев, О.А. Купреенко, А.Г. Ялоза // В сборнике: Современные тенденции развития аграрной науки. Сборник научных трудов международной научно-практической конференции. Брянский государственный аграрный университет. - 2022. - С. 303-306.
45. К обоснованию конструкции приемного устройства пневмотранспортера сушилки аэродинамического нагрева / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, А.Г. Ялоза, О.А. Купреенко // Вестник Брянской ГСХА. - 2025. - № 1 (107). - С. 58-61.
46. Комиссаров, А.П. Повышение эффективности производства строганого шпона : дис. ...докт. техн. наук : 05.21.05 / Комиссаров Анатолий Петрович. – Брянск., 2002. – 278 с.
47. Конвейерная сушилка пророщенного зерна с применением инфракрасного нагрева / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, А.Ф. Окунев и др. // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. - 2022. - № 1 (33). - С. 60-70.
48. К определению продолжительности сушки яблок в сушилке аэродинамического подогрева / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, С.Х. Исаев, И.И.

Кулипатова, А. Куницы // Инновации и технологический прорыв в АПК : сб. науч. тр. межд. науч.-пр. конф. Ч. 2. – Брянск. - 2020. - С. 203-207.

49. К определению скорости истечения зерна из сушильной шахты в пневмотранспортер сушки / А.И. Купреенко, Х.М.О. Исаев, А.Г. Ялоза, О.А. Купреенко // В сборнике: Современные тенденции развития аграрной науки. Сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. – Брянск. - 2023. - С. 203-208.

50. Кузьмичев, А.В. Модель процесса конвективной сушки яблок / А.В. Кузьмичев, Д.А. Тихомиров, А.В. Хименко // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. - 2025. - Т. 72, № 2 (59). - С. 79-88.

51. Купреенко, А.И., Исаев Х.М., Исаев С.Х. Эффективность сушки аэродинамического подогрева с комбинированным теплообменником / Инновационная техника и технология. - 2020. - № 3 (24). - С. 29-36.

52. Купреенко, А.И., Исаев Х.М., Исаев С.Х. Сушки с аэродинамическим нагревом воздуха / Сельский механизатор. - 2021. - № 11. - С. 16-17.

53. Купреенко, А.И., Исаев Х.М., Исаев С.Х. Снижение энергоемкости сушки аэродинамического нагрева / Тракторы и сельхозмашины. - 2021. - № 1. - С. 81-88.

54. Купреенко, А.И. Тепловой баланс комбинированного теплообменника сушки аэродинамического подогрева / А.И. Купреенко, В.Ф. Комогорцев, Х.М. Исаев, С.Х. Исаев // Агроинженерия. - 2020. - № 6 (100). - С. 66-73. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-66-73

55. Курдюмов, В.И., Агеев П.С., Павлушин А.А. Математическое моделирование при оптимизации параметров сушильной установки контактного типа / Пермский аграрный вестник. - 2016. - № 2 (14). - С. 107-112.

56. Масалимов, И.Х., Аймурзин К.А. Исследование процесса сушки семян льна / В сборнике: Инновационные технологии как фактор развития. материалы международной научно-практической конференции в рамках XXXIV Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2024». – Уфа. - 2024. - С. 3-7.

57. Масалимов, И.Х. Разработка и обоснование параметров сушильной установки прерывистого действия для сушки семян ячменя / И.Х. Масалимов, Р.Ф. Насыров // В сборнике: Инновационные технологии как фактор развития. материалы международной научно-практической конференции в рамках XXXIV Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2024». – Уфа. - 2024. - С. 95-100.

58. Математические зависимости обоснования режимов сушки органических семян тимopheевки луговой / В.А. Смелик, А.Н. Перекопский, Р.А. Шушков и др. // АгроЭкоИнженерия. - 2024. - № 1 (118). - С. 82-96.

59. Моделирование движения зерна в пневмотранспортёре зерносушилки аэродинамического нагрева / А.И. Купреенко, Т.В. Панова, М.В. Панов, О.А. Купреенко и др. // В сборнике: Современные тенденции развития аграрной науки. Сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. – Брянск. - 2023. - С. 208-214.

60. Обоснование конструктивных параметров бесприводного выпускного устройства модульной сушилки аэродинамического нагрева / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, А.Г. Ялоза, О.А. Купреенко и др. // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. - 2025. - Т. 17, № 2. - С.101-109.

61. Обоснование конструктивных параметров приемного устройства пневмотранспортера / А.И. Купреенко, В.Н. Ожерельев, Х.М. Исаев, А.Г. Ялоза, О.А. Купреенко // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. Брянск: Изд-во БГАУ. - 2025. - № 1 (24). - С. 64-73.

62. Обоснование конструктивных параметров разгрузителей зерна модульной сушилки аэродинамического нагрева / А.И. Купреенко, В.Н. Ожерельев, Х.М. Исаев, А.Г. Ялоза, О.А. Купреенко // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. Брянск: Изд-во БГАУ. - 2025. - № 1(24). – С 73-81.

63. Обоснование теплоэнергетических параметров процесса контактной сушки зерна / П.С. Агеев, В.И. Долгов, В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2022. - № 1 (57). - С. 6-11.

64. Определение температуры диска при обжарке зерна в установке контактного типа / С.А. Сутягин, П.С. Агеев, А.А. Павлушин, В.И. Курдюмов, В.А. Семькин // Наука в центральной России. - 2023. - № 6 (66). - С. 71-79.

65. Особенности реализации температурного режима в установке контактного типа при сушке мелкосеменных культур / П.С. Агеев, С.А. Сутягин, В.И. Курдюмов и др. // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2021. - № 2 (54). - С. 6-12.

66. Особенности рабочего процесса модульной сушилки аэродинамического нагрева / Ожерельев В.Н., Купреенко А.И., Исаев Х.М., Никитин А.М., Купреенко О.А., Ялоза А.Г. // В сборнике: Современные тенденции развития аграрной науки. Сборник научных трудов III международной научно-практической конференции. – Брянск. - 2024. - С. 213-217.

67. Павлушин, А.А. Оптимизация режимов работы зерносушилки контактного типа / А.А. Павлушин, С.А. Сутягин, В.И., Курдюмов, П.С. Агеев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. - 2020. - Т. 13, № 2 (65). - С. 22-31.

68. Патент 2018074 РФ, МПК F26B17/26 Аэродинамическая зерносушилка / А.К. Бровцын - № 4889981/13; заявлено 10.12.90; опубликовано 15.08.94.

69. Патент на изобретение RU 2019777, Российская Федерация, F26B3/02, F26B9/06. Способ сушки продуктов и аэродинамическая сушильная установка / В.А. Ананьев, А.Л. Басукинский, А.Г. Шапошников, В.М. Петрушин - № 92010549/06; заявл. 08.12.1992; опубл. 15.09.1994.

70. Патент на полезную модель RU 196966, Российская Федерация, F26B 17/12; F26B 21/04 Сушилка / А.И. Купреенко, Т.В. Панова, М.В. Панов - № 2019143060; заявлено 18.12.19; опубликовано 23.03.20, Бюл. № 9.

71. Патент на полезную модель RU 207177 U1, Российская Федерация, F26B 9/06 Сушилка / А.И. Купреенко, Т.В. Панова, М.В. Панов - № 2021118952: заявлено 28.06.2021; опубликовано 15.10.21, Бюл. № 29.

72. Патент на полезную модель 216716 РФ, МПК F26B 9/06 Сушилка / А.И. Купреенко, В.Н. Ожерельев, Х.М. Исаев, С.М. Михайличенко, О.А. Купреенко, А.Г. Ялоза - № 2022119604; заявлено 18.07.22; опубликовано 22.02.23, Бюл. № 6.

73. Патент на полезную модель № 233989 РФ, МПК B65G 53/04 Приемник пневмотранспортера / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, О.А. Купреенко, А.Г. Ялоза, С.Х. Исаев - № 2024126281; заявлено 05.09.24; опубликовано 14.05.25, Бюл. № 14.

74. Патент на изобретение RU 2 345 300 C1 МПК F26B17/12 Зерносушилка / Н.В. Цугленок, С.К. Манасян, Н.В. Демский, В.М. Усольцев - № 2007122220/06; заявлено 13.06.07; опубликовано 27.01.09, Бюл. № 3.

75. Патент на полезную модель № 235987 РФ МПК F26B 17/12; F26B 21/04 Сушилка / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, Т.В. Панова, М.В. Панов, В.Н.Ожерельев, О.А. Купреенко - № 2024112127; заявлено 02.05.24; опубликовано 21.07.25, Бюл. № 21.

76. Потапов, Г.П. Погрузочно-транспортные машины для животноводства: Справочник. - М.: Агропромиздат. - 1990. - 239 с.

77. Распоряжение правительства Российской Федерации от 08.09.2022 г. № 2567-р об утверждении Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года. <http://static.government.ru/media/files/G3hzRyrGPbmFAfBFgmEhxTrec694MaHr.pdf> (дата обращения 22.02.2025 г.)

78. Результаты испытания опытного образца зерносушилки с генератором теплоты аэродинамического типа / В.Н. Ожерельев, Х.М. Исаев, Т.В. Панова, О.А. Купреенко, А.Г.Ялоза // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2023. - № 1 (99). - С. 129-136. doi: 10.37670/2073-0853-2023-99-1-129-136

79. Результаты испытания модульной сушилки аэродинамического нагрева / В.Н. Ожерельев, А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, О.А. Купреенко, А.Г.Ялоза //

Интеллектуальные системы в аграрном и строительном комплексе. Том 2.: сборник материалов Международной научно-практической конференции. – Орел: Изд-во Орловский ГАУ, 2024. – С. 199-204.

80. Результаты экспериментальных исследований по определению коэффициентов теплового излучения пророщенного зерна для ИК-нагрева / С.В. Вендин, Ю.В. Саенко, Ю.Н. Ульянов, Р.З. Байрамов // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. - 2022. - Т. 14, № 4. - С. 123-132.

81. Саенко, Ю.В. Обоснование сушилки пророщенного зерна / Ю.В. Саенко, Р.З. Байрамов // Материалы Национальной научно-практической конференции «Инновационные решения в агроинженерии в XXI веке». Решения проблем взаимодействия науки и бизнеса. - Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2021. – С. 159-160.

82. Саенко, Ю.В. Конвейерная сушилка пророщенного зерна / Ю.В. Саенко, Р.З. Байрамов // Цифровые и инженерные технологии в АПК 25 ноября 2021 года. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2022. – С. 164 - 166.

83. Саенко, Ю.В. Результаты оптимизации конструктивно-режимных параметров сушилки пророщенного зерна / Ю.В. Саенко, В.С. Смоляков, В.Ю. Страхов // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. - 2025. - № 2 (46). - С. 39-47.

84. Саенко, Ю.В., Байрамов Р.З. Установка для сушки пророщенного зерна / Техника и технологии в животноводстве. - 2023. - № 4 (52). - С. 91-96.

85. Соломахова, Т.С., Чебышева, К.В. Центробежные вентиляторы. – М. Машиностроение, 1980. – 176 с.

86. Сравнительная эффективность использования модульной сушилки аэродинамического нагрева / В.Н. Ожерельев, А.И. Купреенко, Х.М.О. Исаев, О.А. Купреенко // В сборнике: Современные тенденции развития аграрной науки. Сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. – Брянск. - 2023. - С. 199-203.

87. Сравнительные испытания пневмотранспортера сушилки аэродинамического нагрева / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, С.Х. Исаев, А.Г. Ялоза, О.А. Купреенко // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. Брянск: Изд-во БГАУ. - 2024. - № 1 (23). - С. 35-41.

88. Сутягин, С.А., Карпенко Г.В., Курдюмов В.И. Энергоэффективная установка для сушки зерна / Сельский механизатор. - 2017. - № 11. - С. 34-35.

89. Сутягин, С.А. Снижение удельных затрат энергии на сушку зерна в установке контактного типа / С.А. Сутягин, В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин и др. // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. - 2017. - № 2. - С. 39-45.

90. Сутягин, С.А. Повышение эффективности процесса сушки зерна при контактном подводе теплоты / С.А. Сутягин, П.С. Агеев, В.И. Курдюмов и др. // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. - 2019. - № 3 (47). - С. 12-17.

91. Сушилка аэродинамического нагрева модульного типа / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, С.М. Михайличенко, О.А. Купреенко, А.Г. Ялоза // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. - 2022. - № 1 (21). - С. 218-222.

92. Тевис, П.И., Ананьев, В.А., Шадек, Е.Г. Рециркуляционные установки аэродинамического нагрева / Под общей редакцией Е.Г. Шадека. - М.: Машиностроение. - 1986. - 208 с.

93. Температура сушильного агента при его рециркуляции в модульной сушилке аэродинамического нагрева / А.И. Купреенко, Д.А. Безик, Х.М. Исаев, Т.В. Панова, О.А. Купреенко, А.Г. Ялоза // Вестник Брянской ГСХА. - 2025. - № 3 (109). - С. 46-53.

94. Термическое оборудование. Печь аэродинамических потерь [Электронный ресурс] / Официальный разработчик ОАО «Электромеханика». Продукция. Электр. дан.: Ржев: ОАО «Электромеханика», 2012. Режим доступа: <http://www.el-mech.ru>.

95. Ториков, В.Е., Евдокименко, С.Н., Сазонов, Ф.Ф. Перспективы развития садоводства в Брянской области // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. - 2015. - № 5 (51). - С. 3-8.

96. Физическое моделирование процесса сушки с применением термоэлектрического теплового насоса / Д.А. Тихомиров, И.С. Яшин, А.В. Хименко и др. // Техника и оборудование для села. - 2023. - № 1 (307). - С. 40-45.

97. Ченин А.Н. Повышение эффективности сушки зерна в барабанной гелиосушилке : дис. ...канд. техн. наук / Ченин Алексей Николаевич : 05.20.01. – М., 2017. – 132 с.

98. Шубин, Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины / Г.С. Шубин. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 336 с.

99. Экономическая эффективность применения выпускного устройства модульной сушилки аэродинамического нагрева / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, С.Х. Исаев, А.Г. Ялоза, О.А. Купреенко // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. - Брянск. - 2025. - № 1 (24). - С. 81-87.

100. URL: <https://promportal.ru/goods/84339249/aerodinamicheskaya-sushilka-zerna-rnu-50.htm> (дата обращения 14.06.2025)

101. URL: <https://www.stankoff.ru/product/25260/aerodinamicheskii-sushilnyi-agregat-sa-600> (дата обращения 14.06.2025)

102. URL: <https://agropromex.ru/stati-i-publikaczii/nauchnyie-stati/osobennosti-raboty-zernosushilok-raznogo-ispolneniya.html> (дата обращения 14.06.2025)

103. URL: <https://sdexpert.ru/news/project/dostoinstva-i-nedostatki-tipov-zernosushilok/> (дата обращения 14.06.2025)

104. URL: <https://atm36.ru/catalog/colonkovye-zernosushilki> 17.06.2025 (дата обращения 17.06.2025)

105. URL: <https://miragro-nn.ru/catalog/мобильная-зерносушилка-атм-10/> (дата обращения 14.06.2025)

106. URL: <https://44kotel.ru/kupit-ciklony-dlya-zerna-muki-drobylok-melnic?ysclid=m9zi2mtjqt295530671> (дата обращения 14.06.2025)

107. URL:

https://perm.pulscen.ru/products/mobilnaya_zernosushilka_atm_10_159214076 (дата обращения 14.06.2025)

108. URL: <https://auto.drom.ru/spec/archive/maz/truck/fuel-tanker/used/all/> (дата обращения 14.06.2025)

109. URL: <https://centr-fuel.ru/benzovozy> (дата обращения 14.06.2025)

110. URL: <https://promportal.su/goods/79281920/mini-azs-na-pricepe-toplivozapravschik-ot-0-3-30-m3.htm> (дата обращения 14.06.2025)

111. URL: <https://mtraktor.ru/product-traktor-mtz-801-belarus-5895> (дата обращения 14.06.2025)

112. Allen I.R. Application of grain drying theory to the drying of maize and rice. - J. Agr. Engng Res., 2005. - V. 5. - № 4.

113. Hukill W.V. Basic principles in drying corn and grain sorghum. Agr. Engng, 1997. - V. 28. - № 8.

114. Krokida M.K., et al. Drying kinetics of some vegetables // Journal of Food Engineering. 2003. -V. 59. -P. 391–403.

115. Meisamiasl E., Rafiee S., Mathematical Modeling of Kinetics of Thin-layer Drying of Apple (var. Golab) // Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript 1185. Vol. XI. September, 2009; http://www.pomics.com/meisami_3_3_2010_103_108.pdf

116. Renewable Energy in India. Business Opportunities. Ministry of Non Conventional Energy Sources, 2001. P. 111.

117. Tiwari A. A Review on Solar Drying of Agricultural Produce. Journal of Food Processing and Technology. 2016. Vol. 7:623. DOI: 10.4172/2157-7110.1000623

ПРИЛОЖЕНИЯ

Документы, подтверждающие новизну технических решений

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

216 716⁽¹³⁾ U1

(51) МПК

F26B 9/06 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

F26B 9/06 (2022.08)

(21)(22) Заявка: 2022119604, 18.07.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
18.07.2022Дата регистрации:
22.02.2023

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 18.07.2022

(45) Опубликовано: 22.02.2023 Бюл. № 6

Адрес для переписки:

243365, Брянская обл., Выгоничский р-н, с.
Кокино, ул. Советская, 2а, ФГБОУ ВО БГАУ

(72) Автор(ы):

Купреенко Алексей Иванович (RU),
Ожерельев Виктор Николаевич (RU),
Исаев Хафиз Мубариз-оглы (RU),
Михайличенко Станислав Михайлович (RU),
Купреенко Олег Алексеевич (RU),
Ялоза Андрей Григорьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Брянский государственный
аграрный университет" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 196966 U1, 23.03.2020. RU 207177
U1, 15.10.2021. RU 2463537 C1, 10.10.2012. RU
84520 U1, 10.07.2009. CN 108106338 A, 01.06.2018.
US 20120066924 A1, 22.03.2012.

RU 216716 U1

RU 216716 U1

(54) СУШИЛКА

(57) Реферат:

Полезная модель предназначена для сушки продовольственного, фуражного и семенного зерна колосовых, крупяных, других зерновых культур.

Техническим результатом полезной модели является снижение металлоемкости и упрощение конструкции сушилки.

Поставленный технический результат достигается тем, что в воздухопровод между нагревательным ротором и сушильной шахтой выведена воздухозаборная труба пневмотранспортера, а в зерновом бункере напротив обреза выгрузной трубы пневмотранспортера расположены ряды резиновых фартуков, нарезанных на полоски.

Сушилка работает следующим образом. Зерно загрузочным шнековым транспортером подается в зерновой бункер и далее поступает в сушильную шахту. Нагревательный ротор нагревает предварительно подогретый сушильный агент,

поступающий из теплообменного аппарата, и подает его в воздухопровод. Привод заслонок в зависимости от сигнала датчика температуры регулирует количество подсаживаемого к сушильному агенту атмосферного воздуха. Далее сушильный агент нагревает зерно в сушильной шахте, насыщается испаряемой из зерна влагой и удаляется в теплообменный аппарат, где отдает свою теплоту поступающему туда атмосферному воздуху, используемому в качестве сушильного агента.

Вysушенное зерно поступает в пневмотранспортер. Часть воздушного потока, поступающего от нагревательного ротора в воздухопровод, отбирается воздухозаборной трубой пневмотранспортера для транспортировки зерна в зерновой бункер или в разгрузочный циклон. При сушке в режиме рециркуляции зерно, транспортируемое воздушным потоком, в зерновом бункере на выходе из

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11)

235 987⁽¹³⁾ **U1**

(51) МПК
F26B 17/12 (2006.01)
F26B 21/04 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
F26B 17/12 (2024.08); F26B 21/04 (2024.08)

(21)(22) Заявка: 2024112127, 02.05.2024
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.05.2024
Дата регистрации:
21.07.2025
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 02.05.2024
(45) Опубликовано: 21.07.2025 Бюл. № 21
Адрес для переписки:
243365, Брянская обл., Выгоничский р-н, с.
Кокино, ул. Советская, 2а, ФГБОУ ВО
Брянский ГАУ

(72) Автор(ы):
Купреенко Алексей Иванович (RU),
Исаев Хафиз Мубариз-оглы (RU),
Панова Татьяна Васильевна (RU),
Панов Максим Владимирович (RU),
Ожерельев Виктор Николаевич (RU),
Купреенко Олег Алексеевич (RU)
(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Брянский государственный
аграрный университет" (RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 196966 U1, 23.03.2020. RU 207177
U1, 15.10.2021. RU 2679336 C1, 07.02.2019. CN
105104521 A, 02.12.2015.

RU 235987 U1

(54) СУШИЛКА

(57) Реферат:
Полезная модель предназначена для сушки
продовольственного, фуражного и семенного
зерна колосовых, крупяных, других зерновых
культур. Сушилка содержит сушильную шахту,
пневмотранспортер, центробежный вентилятор
с нагревательным ротором, теплообменный
аппарат с дополнительным нагревательным
ротором. Причём воздуховод отвода
отработанного сушильного агента из сушильной
шахты соединен через каналы теплообменного
аппарата со всасывающим каналом
нагревательного ротора, нагнетательный канал
нагревательного ротора через выбросное окно с
жалюзи для удаления части отработанного
сушильного агента имеет сообщение с
дополнительным теплообменным аппаратом
подогрева свежего сушильного агента, патрубок
отвода подогретого свежего сушильного агента
из дополнительного теплообменного аппарата
соединен со всасывающим каналом

нагревательного ротора, а циркуляционный
контур дополнительного нагревательного ротора
полностью замкнут. Теплопроизводительность
нагревательных роторов, а также количество
сбрасываемого отработанного сушильного агента
и, соответственно, количество поступающего
свежего сушильного агента регулируются с
помощью жалюзи. Рециркуляция отработанного
сушильного агента по замкнутому
циркуляционному контуру нагревательного
ротора с частичным его сбросом через
дополнительный теплообменный аппарат, а
также работа дополнительного нагревательного
ротора по замкнутому циркуляционному контуру
через теплообменный аппарат обеспечивают
стабильную подачу в сушильную шахту
сушильного агента, его более высокий нагрев и,
соответственно, повышение производительности
сушилки. 2 ил.

RU 235987 U1

Расчет коэффициентов уравнения (2.63)

Кол-во удаляем. влаги W_v , кг	20,93	Масса шахты и камеры б.м. $M_{ст}$, кг	650	K0	1,8531065
Уд. теплоем. воды C_v , кДж/(кг·К)	4,19	Теплоем. стенок шахты $C_{ст}$, кДж/(кг·К)	0,46	K1	11,153738
Начал. темпер. зерна $t_{з.н.}$, град.	17	Регр. коэф. темп. окруж. воздуха b_1	-0,21	K2	15,75
Масса зерна M_z , кг	450	Регр. коэф. темп. окруж. воздуха a_1	1,16	K3	362,1618
Уд.тепл.влаж.зерна $C_{з.н.}$, кДж/(кг·К)	2,078	Регр. коэф. темпер. отраб. агента b_2	1	K4	-0,2808
Мощн.двиг.ротора-нагрев. N , кВт	17,5	Регр. коэф. темпер. отраб. агента a_2	0,63	K5	239,2
КПД ротора-нагревателя	0,1	Начальная влажность зерна, %	18	K6	27,393709
Расх. пневмотрансп. $L_{пн}$, кг/с	0,13	Конечная влажность зерна, %	14	K7	601,3618
Расход атмосфер.возд. $L_{под}$, кг/с	0,32	Масса высушенного зерна, кг	429	K8	0,1409191
Темпер. атмосфер. воздуха t_0	17	Регресс. коэф. удал. влаги, ас	0,0027	K9	89,242174
Теплота парообраз. r_0 , кДж/кг	2493	Регресс. коэф. удал. влаги, бс	0,1	K10	0,0705203
Расход подсос верхний $L_{п.в.}$, кг/с	0,023	Расход подсос нижний $L_{п.н.}$, кг/с	0,01	$M_z/W_{в-1}$	20,5
Уд. теп. сух. зерна $C_{з.к.}$, кДж/(кг·К)	1,34	qp	0,0541	к11	510,75
Темпер. сухого зерна $t_{з.к.}$, град.	40	qз	512,32	к12	17,3061
Коэф. теплоот. ограж. K , кВт/(м ² ·°С)	0,002	дельта	-441,1	к13	0,0333216
Площадь огражд. шахты F , м ²	5,2	hз	107,58	к14	-0,139838
Регр. коэф. темпер. огражд. $b_{ст}$	-10			к15	0,63648
Регр. коэф. темп. отр. агента b_5		к30	0,0073	к16	1967,5341
Регр. коэф. темп. отр. агента a_5		к31	2,0571	к17	18,8427
Уд. теплоем. пара C_p , кДж/(кг·К)	1,97	к32	0,2646	к18	-0,776318
Уд. тепл. сух. возд. C_0 , кДж/(кг·К)	1,01	к33	60,34	к19	-0,2222
Регр. коэф. темп. отра. суш. аг. a_4	0,78	к34	31,475	к20	686,47826
Регр. коэф. темпер. огражд. аст	0,8	к35	2080	к21	0,0242681
Коэф. рец. отраб. суш. аг. K_p , кг/кг	0,38	к36	-1146	к22	0,5424638
Регр. коэф. темп. отра. суш. аг. b_4	-7,47	к37	87,625	к23	0,2942037
Влагосод. атмосфер. возд. d_0 , кг/кг	0,007	к38	76571	к24	0,0005665
Влагосод. сушил. агента d_1 , кг/кг	0,017	к39	3225,3	к25	0,0131974
				к26	-29,57282
				к27	1281,0558
				к28	19,385164
				к29	-0,540672

Расчет температуры сушильного агента

коэффициенты уравнения

k30=	k31=	k32=	k33=	k34=	k35=	k36=	k37=	k38=	k39=
0,0072	2,0571	0,2646	60,3398	31,4752	2080,021	1145,74	87,625	76570,956	3225,284
метод Эйлера первого порядка				расчет	аппроксимация			опыт	
t, с	f=dT/dt			T, °C		T _{ап}	(T-T _{ап}) ²		T _{оп}
0	0,039864			17		17	0		5,6
300	0,030276			28,95924		31,21437	5,085607		13,1
600	0,023439			38,04201		39,72599	2,835784		21
900	0,015516	T _{max}		45,07363		44,82278	0,062925		33,6
1200	0,007279	35,43		49,72844		47,87477	3,436101		38,9
1500	0,001698	τ		51,91214		49,70231	4,883354		40,5
1800	2,91E-05	585		52,42163		50,79665	2,640571		41,5
2100	-0,00014			52,43035		51,45194	0,95728		41,7
2400	-0,00012			52,38828		51,84433	0,295876		42
2700	-9,5E-05			52,352		52,0793	0,074363		42,3
3000	-7,6E-05			52,32336		52,22	0,010683		42,9
3300	-6,2E-05			52,30043		52,30425	1,46E-05		43
3600	-5,2E-05			52,28169		52,3547	0,005331		43,3
3900	-4,4E-05			52,26608		52,38491	0,01412		44,5
4200	-3,8E-05			52,25289		52,403	0,022534		44,8
4500	-3,3E-05			52,24158		52,41383	0,029669		45
4800	-2,9E-05			52,2318		52,42032	0,035541		45,9
5100	-2,5E-05			52,22323		52,4242	0,040388		46
5400	-2,2E-05			52,21568		52,42653	0,044456		46,5
5700	-2E-05			52,20897		52,42792	0,047938		47,7
6000	-1,8E-05			52,20297		52,42876	0,050977		49,4
6300	-1,6E-05			52,19757		52,42925	0,053676		49,9
6600	-1,5E-05			52,19269		52,42955	0,056104		50,5
6900	-1,4E-05			52,18825		52,42973	0,058313		50,7
7200	-1,2E-05			52,1842		52,42984	0,060338		51,1
7500	-1,1E-05			52,18049		52,4299	0,062208		51,7
7800	-1,1E-05			52,17707		52,42994	0,063943		51,9
8100	-9,7E-06			52,17392		52,42997	0,065559		52,3
8400	-9E-06			52,171		52,42998	0,067069		52,3
8700	-8,4E-06			52,16829		52,42999	0,068484		52,3
9000	-7,8E-06			52,16577		52,42999	<u>0,069813</u>		52,3
							21,19902		

Акт производственной проверки модульной сушилки**АКТ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРОВЕРКИ МОДУЛЬНОЙ СУШИЛКИ
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА С БЕСПРИВОДНЫМ ВЫПУСКНЫМ
УСТРОЙСТВОМ****1. Краткая характеристика проблемы и необходимость использования модульной сушилки аэродинамического нагрева**

Для расширения функциональных возможностей сушилки, увеличения ее годовой загрузки предложена концепция модульной сушилки аэродинамического нагрева, обеспечивающей как режим камерной сушки, так и непрерывный режим сушки за счет использования дополнительного модуля в виде сушильной шахты для зерна. Однако необходимо решить вопрос совместной работы сушильной шахты и ее бесприводного выпускного устройства с отбором воздушного потока из рабочей камеры ротора-нагревателя сушилки для обеспечения работы пневмотранспортера. При этом конструктивное решение дополнительного модуля в виде сушильной шахты для зерна не должно повлиять на режим работы базового модуля сушилки – сушильной камеры для плодово-ягодного сырья.

2. Цель испытаний

Целью испытаний является проверка работоспособности дополнительного модуля в виде сушильной шахты с бесприводным выпускным устройством модульной сушилки аэродинамического нагрева при сушке зерна пшеницы.

3. Объект испытаний

Объектом производственных испытаний является дополнительный модуль в виде сушильной шахты с бесприводным выпускным устройством модульной сушилки аэродинамического нагрева.

4. Методика проведения испытаний

Производственные испытания проводились в августе 2024 г. в учхозе Брянского ГАУ Выгоничского района Брянской области.

Техническая характеристика модульной сушилки представлена в табл.

Таблица – Техническая характеристика модульной сушилки

№ п/п	Наименование параметров	Единицы измерения	Численные значения
1	Способ нагрева сушильного агента		роторный
2	Способ нагрева высушиваемого зерна		конвективный
3	Мощность привода ротора-нагревателя	кВт	17,5
4	Вместимость сушильной шахты	т	0,450
5	Производительность выпускного устройства	т/ч	0,432
6	Производительность сушилки по зерну влажностью 18 %	т/ч	0,225

Влажное зерно загружалось в сушильную шахту шнековым транспортом ТСШ-10, оборудованным частотным преобразователем для регулирования производительности транспортера (рис.).



Рисунок – Общий вид модульной сушилки с загрузочным транспортером

Для испытаний использовалось зерно пшеницы «Московская – 39» влажностью 18 %.

Скорость воздушного потока измерялась метеометром МЭС-200 и составила на входе в пневмотранспортер составила 17,8...18,8 м/с, что соответствует расходу воздуха до 0,13 м³/с или 467 м³/ч.

Замеры статического давления в материалопроводе при работе пневмотранспортера без подачи зерна показали, что на входе оно составляет 450 Па, приемное устройство создает падение давления на 3 Па, в середине вертикального канала давление 168 Па, в верхнем горизонтальном канале разрежение 180 Па.

При максимальном открытии зерновых заслонок производительность пневмотранспортера в режиме рециркуляции зерна в сушильной шахте составила 432 кг/ч.

Производительность пневмотранспортера в режиме выгрузки зерна в циклон составила 405 кг/ч. Сушильная шахта была полностью разгружена, пневмоожижение зерна в зоне выпуска не создало проблемы с удалением последних порций зерна из нижнего бункера выпускного устройства вследствие увеличения живого сечения выпуска после его очистки от уплотнений.

Фартук-отбойник зерна с фильтрующим ограждением также обеспечили работу в расчетном режиме

5. Результаты

В ходе производственной проверки установили:

1. Двухконтурная организация циркулирования сушильного агента в основном и дополнительном модулях сушилки обеспечивает его нагрев до рабочих температур и высушивание зерна до кондиционной влажности.

2. Беспроводное выпускное устройство, представляющее собой последовательно установленную комбинацию бесприводного выпускного устройства механического типа, однетрубного пневмотранспортера низкого давления нагнетающего типа с разомкнутым циклом воздуха, модернизированным приемником типа «Тройник» и отбором воздуха из рабочей камеры ротора-нагревателя сушилки, материалопровода прямоугольного сечения, разгрузителей в виде центробежного циклона для высушенного зерна и резинового фартука-зерноотбойника для рециркулирующего зерна обеспечивает работу модульной сушилки аэродинамического нагрева на требуемых режимах сушки зерна.

3. Составили настоящий акт в том, что рассмотрев материалы производственных испытаний бесприводного выпускного устройства модульной сушилки аэродинамического подогрева, установили эффективность его применения для модуля в виде сушильной шахты для сушки зерна пшеницы. Конструкция бесприводного выпускного устройства зернового модуля в виде пневмотранспортера с материалопроводом прямоугольного сечения 50x108 мм, отбором воздуха из камеры ротора-нагревателя модульной сушилки обеспечивает его надежную работу, как в режиме рециркуляции зерна, так и при его выгрузке с производительностью до 0,45 т/ч. Наличие пассивного вибратора в виде подпружиненной пластины под выгрузными зерновыми заслонками обеспечивает повышение производительности пневмотранспортера на 5%, массовой концентрации смеси на 0,02 кг/кг с.в., снижает опасность завала. Фильтрующий колпак с отбойником зерна в виде фартука из резиновых полос в загрузочном бункере зернового модуля сушилки обеспечивает надежное разделение зерновоздушной смеси.

6. Заключение

В результате производственных испытаний установили, что предложенная модульная сушилка аэродинамического нагрева с бесприводным выпускным устройством выполняет технологический процесс сушки зерна. Начальная влажность зерна составила 17...18 %, после сушки влажность зерна составила 13,5...13,8 %, что соответствует требованиям. Забивания выпускного устройства механического типа и пневмотранспортера зерна дополнительного модуля в виде сушильной шахты не наблюдалось.

За время производственных испытаний поломок модульной сушилки не установлено.

Состав комиссии:

Директор учхоза Брянского ГАУ  А.В. Прокопенков

Зав. кафедрой технологического оборудования в животноводстве и перерабатывающих производств, к.э.н., доцент  Х.М. Исаев

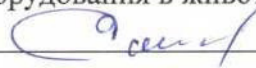
Зав. кафедрой технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве, к.т.н., доцент  И.П. Адылин

Профессор кафедры технологического оборудования в животноводстве и перерабатывающих производств, д.т.н.  А.И. Купреенко

Профессор кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве, д.с.-х.н.  В.Н. Ожерельев

Исполнители:

Аспирант кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве  О.А. Купреенко

Соискатель кафедры технологического оборудования в животноводстве и перерабатывающих производств  А.Г. Ялоза

Акт внедрения результатов НИР

 «УТВЕРЖДАЮ»
 ООО «ОКБ по теплогенераторам»
 Директор Л.И. Беленькая

 «СОГЛАСОВАНО»
 Ректор Брянского ГАУ
 профессор С.М. Сычёв

АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской работы Ожерельева В.Н., Купреенко О.А. «Обоснование конструктивных параметров и режимов работы модульной сушилки аэродинамического нагрева»

Мы, нижеподписавшиеся, представитель ООО «ОКБ по теплогенераторам» – зам. директора Золотуха Е.М. и представители ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет» - зав. кафедрой технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве, к.т.н. Адылин И.П., профессор кафедры д.с.х.н. Ожерельев В.Н. и аспирант кафедры Купреенко О.А. составили настоящий акт в том, что рассмотрев материалы производственных испытаний модульной сушилки аэродинамического нагрева, установили эффективность применения ее модуля в виде сушильной шахты для сушки зерна пшеницы. Применение данного модуля обеспечивает расширение функциональных возможностей сушилки аэродинамического нагрева, увеличение ее годовой загрузки. Энергоемкость процесса сушки при снижении влажности зерна с 20 до 14 % составила 339,4 МДж/т при производительности по влажному зерну 186 кг/ч. Мягкий режим сушки с температурой сушильного агента в пределах 55...65 °С и отсутствие компонентов в сушильном агенте, загрязняющих зерно, позволяет максимально сохранить биологически активные вещества исходного зерна при минимальных капиталовложениях и эксплуатационных затратах. Такая сушилка, в первую очередь, может использоваться для сушки семенного зерна.

С учетом вышеизложенного считаем целесообразным представленные материалы использовать в ООО «ОКБ по теплогенераторам» при проектировании сушильных установок.

Заместитель директора
 ООО «ОКБ по теплогенераторам»
Е.М. Золотуха

17.10.2024г.

Зав. кафедрой ТСвАПБиДС
 к.т.н., доцент И.П. Адылин
 Профессор кафедры ТСвАПБиДС
 д.с.х.н. В.Н. Ожерельев
 Аспирант
О.А. Купреенко