

В.Н. Тепляшин, Л.И. Ченцова, В.Н. Невзоров

**ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СУШКИ  
РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ**



Красноярск 2019

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

**В.Н. Тепляшин, Л.И. Ченцова, В.Н. Невзоров**

**ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СУШКИ  
РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ**

*Рекомендовано учебно-методическим советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет» для внутривузовского использования в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 19.03.02 «Продукты питания из растительного сырья», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование»*

*Электронное издание*

Красноярск 2019

ББК 40.728.6

Т 34

*Рецензенты:*

В.Н. Холопов, д-р техн. наук, профессор кафедры  
автомобилей и транспортно-технологических машин  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки  
и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

А.А. Лепешев, д-р техн. наук, профессор, заведующий Центром  
ЮНЕСКО ФГНАУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Т 34 **Тепляшин, В.Н.**

**Технологии и оборудование для сушки растительного сырья**

[Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.Н. Тепляшин, Л.И. Ченцова,  
В.Н. Невзоров; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2019. – 173 с.

В учебном пособии представлена характеристика дикорастущего растительного сырья Сибири с возможностью его дальнейшего использования в пищевом производстве, даны технологические методы консервирования пищевого растительного сырья. Рассмотрены теоретические основы и способы тепловой сушки трав, ягод и грибов Сибири, конструктивные типы сушилок, методы их расчета, а также приведены примеры расчета конвективных, контактных и сублимационных сушилок. Разработаны технические предложения по новому запатентованному оборудованию для сушки растительного сырья.

Предназначено для выполнения курсового проекта по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств» направления подготовки 19.03.02 «Продукты питания из растительного сырья», а также для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Прогрессивное оборудование для сушки сырья» направления подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» всех форм обучения.

ББК 40.728.6

*Пособие выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 17-12-24004.*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Классификация растительного сырья.....	6
1.1. Травы, корни и ягоды, используемые в приготовлении пищи....	6
1.2. Грибы, используемые в приготовлении пищи.....	18
Глава 2. Теоретические основы сушки растительного сырья.....	21
2.1. Методы консервирования растительного сырья.....	21
2.2. Формы связи влаги с материалом.....	22
2.3. Методы тепловой сушки.....	23
2.3.1. Периоды и скорости сушки.....	24
2.3.2. Классификация сушильных установок.....	30
2.4. Механизм сублимационной сушки растительного сырья.....	33
Глава 3. Технологии сушки растительного сырья.....	37
3.1. Особенности технологии тепловой сушки растительного сырья....	37
3.2. Технологические схемы переработки растительного сырья.....	45
Глава 4. Оборудование для сушки растительного сырья.....	52
4.1. Классификация сушилок.....	52
4.2. Контактные сушилки.....	56
4.3. Конвективные сушилки.....	69
4.4. Сублимационная, радиационная, высокочастотная сушилки.....	80
4.5. Сушильные установки с применением теплового насоса.....	85
Глава 5. Расчет технических параметров установок для сушки растительного сырья.....	91
5.1. Расчет контактных сушилок.....	92
5.2. Расчет конвективных сушилок.....	103
5.3. Расчет сублимационных сушилок.....	142
Глава 6. Технические предложения по новому технологическому оборудованию для сушки растительного сырья.....	150
Заключение.....	166
Литература.....	167
Приложение.....	168

## ВВЕДЕНИЕ

В учебном пособии дана характеристика дикорастущего растительного сырья, возможность его использования в пищевом производстве.

Планируемый объем потребления дикорастущего растительного сырья в Красноярском крае составляет 9 тыс. тонн грибов и кедрового ореха, 7,5 тыс. тонн дикорастущих ягод, 1,2 тыс. тонн заготовленных лекарственных трав.

Из-за труднодоступности региона и сезонного характера произрастания эти ценные природные продукты требуют больших усилий для сохранения и различных технологий переработки, по возможности в местах сбора.

Применяемые технологии должны в максимальной степени сохранить биологически ценные компоненты собранного сырья.

Наиболее распространенным способом консервирования плодово-ягодной продукции являются конвективная и контактная сушки при атмосферном давлении и сублимационная сушка при пониженном давлении.

Данные методы обезвоживания позволяют получить продукт, сохраняющий витаминный состав, характеризующийся длительным сроком хранения, хорошей способностью к дегидратации (поглощению воды).

Высокоэффективные технологии сушки растительных продуктов (ягод, грибов) связаны с созданием прогрессивной технологии и оборудования для его обеспечения.

Для снижения энергоемкости сушки большое значение имеет высокая интенсивность сушильного процесса.

Целью сушки растительного сырья является уменьшение массы, что позволяет снижать затраты на транспортировку; увеличение сро-

ка хранения и повышение качества сырья; подготовка к дальнейшей переработке, а именно получение порошков.

Обезвоженное растительное сырье может использоваться для приготовления готовых блюд, напитков и получения биологически активных добавок к пище.

В пособии изложены возможные пути переработки и сушки ягод, грибов, травы, используемых в приготовлении пищи.

## Глава 1. КЛАССИФИКАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

В сибирских лесах и тундре в больших количествах произрастают дикорастущие растения, которые можно использовать в пищу. В деревнях с давних пор для приготовления пищи и в лекарственных целях используют щавель, крапиву, лебеду, корневища для приготовления чая (иван-чай, мелисса), добавляют в муку для выпечки хлеба клевер. Из дикорастущих ягод (брусника, клюква, черника, смородина, жимолость) делают соки, варят варенье, замораживают и т.д.

Более трехсот видов дикорастущих растений, возможных для использования в пищу, распространено на территории Сибири, включая Арктическую зону.

Наряду с зелеными растениями, ягодами заготавливают большое количество пищевых грибов (грузди, маслята, белые). Грибы содержат белки, жиры, углеводы, все витамины и минеральные вещества.

Основная проблема в процессе переработки растительного сырья заключается в том, что все это богатство надо собрать, переработать по месту их сбора (засолить, высушить) и в готовом виде доставить потребителю.

### 1.1. Травы, корни и ягоды, используемые в приготовлении пищи

Классификация дикорастущего сырья составлена на основе научной работы В.Я. Черепнина «Пищевые растения Сибири», в которой дано наименование растений, основное применение и дополнительное применение как лекарственного средства [11].

Имеющаяся классификация пищевого дикорастущего сырья Сибири и Арктической зоны представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Классификация пищевого дикорастущего сырья Сибири и Арктической зоны

Номер поз.	Используемые части растительного сырья	Применение растительного сырья	Примечание
1	2	3	4
1.1	Аир обыкновенный:		Лекарственное средство
	- листья	Как ароматическое средство	
	- листовая розетка	На производство варенья	
	- корневища	Как ароматическое средство и на производство цукат	

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4
1.2	Бадан толстолистный:		-
	- листья	На производство чая	
1.3	Бедренец камнеломковый:		-
	- свежие и сушеные листья	Для добавления в салаты, винегреты и различные супы	
	- свежие и сушеные корни	Используются как припра- ва	
1.4	Береза:		Лекарственное
	- сок	Используется как напиток и при производстве сахар- ного сиропа	
	- листья	При производстве вита- минного напитка	
1.5	Горец горный:		Лекарственное
	- молодые стебли и листья	Для добавления в салат и щи, при производстве пюре, используется как на- чинка для пирогов и пель- меней	
1.6	Горец живородящий:		-
	- луковички соцветия	Используются в сыром ви- де, в сушеном виде для до- бавки в супы, каши, а так- же печеные	
	- клубеньки корневища	Используются в сыром ви- де, для производства каш и чая	
1.7	Гравилат городской, гравилат речной:		-
	- молодые листья, а также побеги	Добавляют в салаты и раз- личные супы	
	- корни	Применяют для ароматиза- ции блюд и различных на- питков (заменитель гвозди- ки)	
1.8	Гречиха татарская:		-
	- плоды гречихи	Для приготовления каш	

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4
1.9	Девясил высокий:		Лекарственное сырье
	- корневища и корни	Используют для производства сахара, при производстве повидла и напитков, корневища сырья добавляют как в первые, так и вторые блюда	
1.10	Дудник лесной:		Медоносное сырье
	- молодые стебли	Добавляют в салат	
	- черешки листьев, побеги	Добавляют в щи, супы	
	- цветочные почки	Применяют при производстве цукат и жаркого	
1.11	Дурнишник сибирский:		-
	- молодые листья	Добавляют в супы и похлебки	
	- семена	Используют при производстве масла	
1.12	Дягиль аптечный:		Данное сырье рекомендуется в культуру, лекарственное сырье, необходима охрана культуры
	- молодые стебли	Используются как приправа к различным блюдам	
	- семена	Используются как пряно-ароматическое сырье	
	- корневища	Используются при производстве цукат, варенья и как пряно-ароматическое средство	
1.13	Ежевика сизая:		Медоносное сырье
	- ягоды	Используются в свежем виде, при производстве варенья, желе, киселей, сиропов и напитков	
	- молодые листья	Для приготовления чая	
1.14	Зопник клубненосный:		-
	- клубни	Применяются в печеном виде, добавляются в супы, используются при производстве пюре и каш	

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4
1.15	Камыш озерный, камыш тебернемонтана:		-
	- основание стеблей	Используется в сыром виде и как мука для производства хлеба	
	- корневища	Применяются как мука при производстве хлеба, используются при приготовлении сиропов	
1.16	Катран татарский:		-
	- молодые листья и стебли	Применяются в сыром и вареном виде капусты	
	- корневища	Применяются при приготовлении отвара	
1.17	Кедр сибирский, кедровый стланик:		Данное растительное сырье рекомендуется в культуру (кедр сибирский), лекарственное сырье
	- семена (орехи)	Используются в сыром виде, при производстве масла, получают кедровое молоко и сливки, а также жмых для производства халвы и тортов	
	- хвоя	Применяют при производстве для витаминного напитка	
1.18	Кислица обыкновенная:		-
	- листья	Используются в салатах, различных супах и при производстве напитков	
1.19	Кладония оленья:		-
	- таллом (вегетативное тело)	Используются при производстве хлеба как добавка к зерновой культуре	
1.20	Клевер гибридный, клевер луговой, клевер ползучий:		-
	- молодые листья и стебли	Используются при приготовлении салатов, как мука при производстве хлеба, как добавка к зерновой культуре, а также в квашеном и маринованном виде	

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4
	- цветочные головки	Используются при производстве хлеба как добавка к зерновой культуре	
1.21	Конопля посевная, конопля сорная:		-
	- семена	Используются при производстве масла	
1.22	Крапива двудомная, жгучая и коноплевая:		Лекарственное растительное сырье (крапива двудомная)
	- молодые побеги и листья	В супы, щи, как шпинат, муку – для хлеба (смешанная с зерновой)	
1.23	Кровохлебка лекарственная:		Лекарственное
	- молодые листья	В салаты	
	- корневища	В вареном виде	
1.24	Лабазник вязолистный:		-
	- молодые побеги, корни	В отваренном виде	
	- листья	Витаминное средство	
	- цветки	Для чая	
1.25	Лабазник шестилепестный:		-
	- клубеньки	В отваренном виде и сырые	
	- листья	Витаминное	
1.26	Лебеда копьевидная:		-
	- молодые листья и всходы	В салат, на пюре	
	- зрелые семена	В супы, для каш	
1.27	Лебеда отклоненная, раскидистая, прибрежная, сорная и садовая:		-
	- молодые листья и всходы	В салаты, в вареном виде	
1.28	Лен сибирский:		-
	- семена	Получают масло	
1.29	Лещина разнолистная:		Рекомендуется в культуру

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4
	- орехи	Получают масло, в сыром и поджаренном виде, в кондитерском производстве	
1.30	Лилии:		Требуется охрана
	- луковицы	В сыром и вареном виде, высушенные – на муку для различных блюд	
1.31	Липа сердцевидная и липа сибирская:		Требуется охрана, медоносы
	- семена	Как орехи лещины	
	- молодые листья	В салаты, из высушенных получают муку, которая добавляется в зерновую	
1.32	Лиственница сибирская, Гмелина и лиственница Каяндера:		Лекарственное
	- хвоя	Для витаминного напитка	
1.33	Ложечница арктическая:		Рекомендуется в культуру
	- надземные части	В салаты, в соленом виде, как пряность, витаминное	
1.34	Лопух войлочный, лопух гладкий:		Лекарственное
	- молодые стебли и листья	В салаты, супы	
	- корни	В сыром виде, в супы (вместо картофеля), во вторые блюда, на повидло, для кофе	
1.35	Лук алтайский:		Рекомендуется в культуру, требуется охрана
	- луковицы и листья	Как огородный лук	
1.36	Лук линейный:		-
	- листья	Как приправа, витаминное	
1.37	Лук победный (черемша):		-
	- молодые побеги	В свежем, соленом, квашеном виде и как приправа, витаминное	

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4
1.38	Манжетка обыкновенная:		-
	- молодые листья и побеги	В салаты, супы, готовят на зиму в сушеном и со- леном виде	
1.39	Медуница лекарственная:		Лекарственное
	- молодые листья и побеги	В салаты, супы	
1.40	Мелисса лекарственная:		Высушенной травой натирают новые ульи, ме- донос, лекарст- венное
	- листья и побеги	Как эфирно-масличное, приправа к первым и вто- рым блюдам, для напит- ков	
1.41	Одуванчик лекарственный:		Рекомендуется в культуру, лекарственное
	- листья	В салаты, на пюре, в квашеном виде	
	- соцветия	На варенье, в салаты	
	- корни	Для кофе	
1.42	Окопник лекарственный:		Лекарственное
	- листья	В салаты, супы	
1.43	Орляк обыкновенный:		Антисептик
	- побеги	В свежем, соленом, жареном виде	
	- корневища	Из муки пекут хлеб	
1.44	Очиток пурпурный:		Рекомендуется в культуру
	- молодые листья и побеги	В салаты, винегреты, щи, похлебки, в квашеном виде	
1.45	Пастернак посевной:		В прошлом заме- нял картофель, лекарственное
	- корни	В винегреты, супы, буль- оны	
	- листья, цветки	Как петрушка	
1.46	Пастушья сумка обыкновенная:		Рекомендуется в культуру, лекарственное
	- молодые листья	В салаты, щи, бульоны, жаренные с мясом, сушат и солят впрок	

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4
1.47	Пион уклоняющийся:		Требуется охрана, лекарственное
	- корни	Сушеные отваривают с мясом	
1.48	Подорожник большой:		Лекарственное
	- молодые листья	В салаты, супы, котлеты, на пюре	
	- семена	Как приправа	
1.49	Пырей ползучий:		Лекарственное
	- корневища	В салаты, супы, на гарниры, из муки – вкусный и питательный хлеб	
1.50	Ревень волнистый:		Требуется охрана, рекомендуется в культуру северных районов, лекарственное
	- черешки листьев	На варенье, компоты, кисели, квас, мармелад, цукаты, в свежем виде	
1.51	Ревень компактный:		Требуется охрана, рекомендуется в культуру северных районов, лекарственное
	- черешки листьев, стебли с нераспустившимися соцветиями	В сыром виде, в борщ, на кисели, варенье, компоты, для начинки пирогов	
1.52	Рогоз широколистный и рогоз узколистный:		Требуется охрана
	- корневища	Печеные, жареные, из муки выпекают хлеб, бисквиты и другие кондитерские изделия, на кисели	
	- проростки	В сыром и отваренном виде	
	- молодые цветоносные стебли	Маринуют	
1.53	Роза иглистая, роза коричная и роза даурская:		Лекарственное
	- плоды	В свежем виде, на кисели, компоты, варенье, перемолотые – для начинки пирогов, на повидло, добавляют в зерновую муку, для чая, витаминное	
	- лепестки	На варенье, для чая	

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4
1.54	Рыжик посевной:		-
	- семена	Получают масло	
1.55	Солодка голая и солодка уральская:		Лекарственное, охрана (солодка голая)
	- корни	Получают сахар	
1.56	Сосна обыкновенная:		Лекарственное
	- хвоя	Для витаминного напитка	
1.57	Спаржа обыкновенная:		-
	- белые стеблевые побеги	Отваренные с маслом и другими приправами, для консервирования	
	- семена	Для кофе	
1.58	Сурепка дуговидная и сурепка прямая:		Медонос
	- молодые листья	В салаты, супы, на пюре, гарниры. Витаминное	
1.59	Тмин обыкновенный:		Лекарственное
	- молодые листья и стебли	В салаты	
	- семена	Как пряность	
1.60	Толокнянка обыкновенная:		-
	- ягоды	В свежем виде	
1.61	Хамерион узколист- ный (иван-чай):		Хороший медонос
	- молодые листья и побеги	В салаты, на пюре, для чая	
	- корневища	Мука в смеси с зерновой – для хлебных изделий	
	- корневые отпрыски	В похлебки, во вторые блюда	
1.62	Хвощ полевой и хвощ лесной:		Лекарственное (хвощ полевой)
	- молодые споронос- ные стебли	В сыром виде, на супы, за- пеканки, для начинки пи- рогов, в соленом виде	
	- клубни	В вареном виде	

## Окончание табл. 1.1

1	2	3	4
1.63	Хмель обыкновенный:		Лекарственное
	- верхушки побегов и отпрыски	В вареном виде	
	- молодые листья	Квашенные для щей	
	- женские шишки	Для дрожжей	
1.64	Хрен гулявниковый:		Рекомендуется в культуру
	- корни	Как хрен культурный	
	- листья	Как приправа в салаты, супы, соленья	
1.65	Цикорий обыкновенный:		Лекарственное
	- корень	Для кофе	
	- молодые прикорневые листья	В салаты	
1.66	Чина клубневая:		-
	- клубни	В сыром и вареном виде	
1.67	Щавель курчавый:		-
	- листья	В салаты, супы	
1.68	Щавель обыкновенный, щавель пирамидальный:		Рекомендуется в культуру, особенно на севере
	- листья и молодые стебли	В салаты, супы, на пюре, для начинки пирогов, сушат, солят, заквашивают впрок	
1.69	Ятрышник шлемоносный:		Лекарственное, требуется охрана
	- клубни	В супы, на желе, мука – для хлеба	

Имеющаяся классификация дикорастущих ягод Сибири и Арктической зоны представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Классификация дикорастущих ягод

Номер поз.	Ягоды (используемые части)	Применение	Примечание
1	2	3	4
1.1	Боярышник алтайский:		Лекарственное
	- корневища	Как корнеплоды	
	- ягоды	В свежем виде, на повидло, кисель, желе, для напитков, кофе, чая	
1.2	Брусника:		-
	- ягоды	В свежем и засахаренном виде, на варенье, джем, кисель, сок	
1.3	Вишня кустарниковая:		Рекомендуется в качестве подвоя
	- плоды	В свежем виде, на варенье, компоты, кисели, лимонады, квас	
1.4	Голубика:		Рекомендуется в культуру
	- ягоды	В сыром виде, на варенье, кисель, желе, компоты, для напитков, начинки для пирогов	
1.5	Жимолость алтайская синяя, жимолость Палласа, жимолость Турчанинова и жимолость съедобная:		Рекомендуется в культуру, лекарственное
	- ягоды	В свежем виде, на варенье, кисели, для напитков	
1.6	Земляника зеленая, земляника лесная и земляника восточная:		Лекарственное (земляника лесная)
	- ягоды	В свежем виде, на варенье, повидло, мармелад, для начинки пирогов, конфет	
1.7	Калина обыкновенная:		Лекарственное, требуется охрана
	- ягоды	На повидло, кисели, уксус	

Продолжение табл. 1.2

1	2	3	4
1.8	Кизильник одноцветковый и кизильник черноплодный:		Подвой для груш (кизильник черноплодный)
	- ягоды	В сыром виде (вкусовые достоинства низкие)	
1.9	Клюква болотная:		Лекарственное
	- ягоды	Для начинки конфет, на варенье, кисели, для напитков	
1.10	Княженика:		-
	- ягоды	В свежем виде, для морса	
1.11	Костяника:		-
	- ягоды	В сыром виде, на варенье, маринады, для напитков	
1.12	Крыжовник игольчатый:		-
	- ягоды	В сыром, засахаренном и сушеном виде, на варенье, компоты, сиропы, желе	
1.13	Малина обыкновенная и малина сахалинская:		Медонос, лекарственное
	- ягоды	В свежем и сушеном виде, на варенье, сироп, кисель, пастилу	
1.14	Морошка приземистая:		-
	- ягоды	В сыром, моченом, пареном виде, на варенье	
1.15	Облепиха крушиновидная:		-
	- ягоды	В свежем виде, на варенье, желе, для сока	
1.16	Паслен черный:		Лекарственное
	- ягоды	В сыром виде, как начинка для пирогов	
	- молодые листья	Как шпинат	
1.17	Рябина сибирская:		Лекарственное
	- ягоды	На варенье, повидло, пастилу, квас, уксус, муку – для начинки пирогов, витаминное	
	- семена	Получают масло	

1	2	3	4
1.18	Смородина:		Для селекции, лекарственное (смородина черная)
	- ягоды	В сыром виде, на варенье, желе, кисели, для сиропов	
	- листья	Для чая	
1.19	Черемуха обыкновенная и черемуха азиатская:		Требуется охрана, лекарственное
	- ягоды	В свежем виде, на желе, напитки, смолотые для пирогов, тортов, киселей	
1.20	Черника:		Медонос, лекарственное
	- ягоды	В свежем виде, на варенье, кисели, сиропы	
1.21	Яблоня Палласа (ранетка):		Требуется охрана
	- плоды	На варенье	

## 1.2. Грибы, используемые в приготовлении пищи

Грибы обладают рядом ценных свойств, их собирают, солят, маринуют, сушат. Грибы используют для приготовления грибных супов, подливки для мясных блюд, жарки. Они содержат много полезных веществ: белки, жиры, углеводы, витамины, минеральные вещества, пищевые волокна, нутриент.

В таблице 1.3 дан перечень основных съедобных грибов, растущих в Сибири, а также основные способы их использования в питании человека.

Таблица 1.3 – Классификация дикорастущих грибов

Номер поз.	Грибы	Применение	Примечание
1	2	3	4
1.1	Белые	Сушить, жарить, варить, замораживать	Съедобны
1.2	Подберезовики	Сушить, жарить, варить	Съедобны

1	2	3	4
1.3	Грузди	Вымачивать и солить	Съедобны
1.4	Лисички	Отваривать, жарить, замораживать	Съедобны
1.5	Маслята	Жарить, мариновать	Съедобны
1.6	Опята	Сушить, варить супы, мариновать	Съедобны
1.7	Подосиновики	Жарить, отваривать, замораживать	Съедобны
1.8	Рыжики	Солить	Съедобны
1.9	Сыроежки	Отваривать, потом жарить	Съедобны
1.10	Сморчки	Вымачивать, потом жарить	Условно съедобны

Лучший способ сохранения физико-химических свойств грибов – это сушка при определенных температурных условиях (40-60 °С), из-за пористой структуры грибов этот процесс длителен по времени.

Сушеные грибы хранят в вакуумной упаковке, часть сушеных грибов используется в пищевом производстве в измельченном виде (порошки), которые хранят также в вакуумной упаковке.

На рисунке 1.1 дан общий химический состав грибов, а в таблице 1.4 химический состав и пищевая ценность определенных видов грибов.

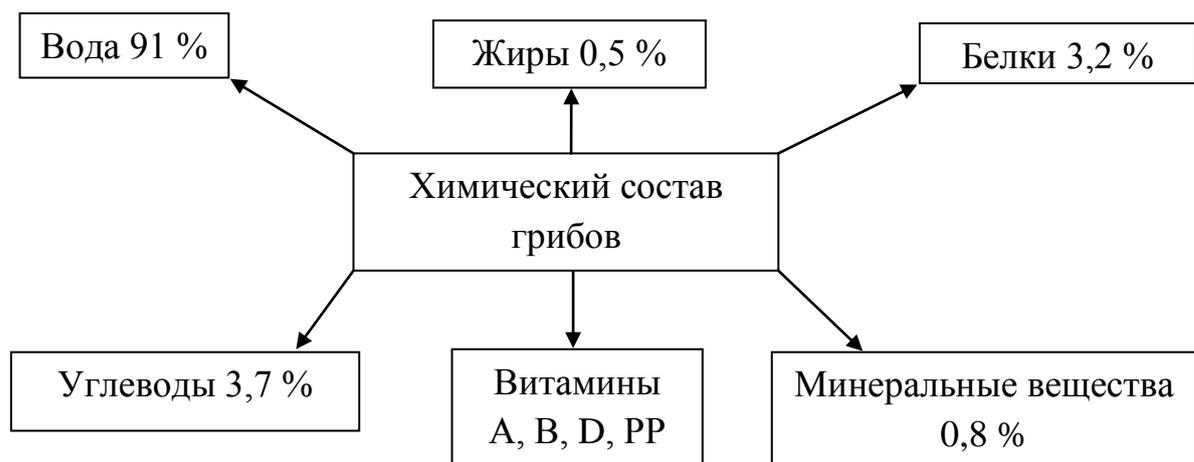


Рисунок 1.1 – Химический состав грибов

Таблица 1.4 – Химический состав грибов

Грибы	Химический состав съедобной части грибов, %						Энергетическая ценность 100 г, ккал
	Вода	Белки	Жиры	Углеводы	Клетчатка	Минеральные вещества	
Грибы свежие							
Белые	87,0	5,5	0,5	3,1	3,0	0,9	167
Грузди	90,7	1,9	0,2	5,5	1,1	0,6	32,2
Подосиновики	88,0	4,6	0,8	2,2	3,0	0,9	150
Маслята	92,0	2,0	0,3	3,5	3,5	0,9	146
Подберезовики	88,0	5,0	0,6	2,5	1,6	0,6	104
Лисички	91,0	2,6	0,4	3,8	1,0	0,8	125
Опята	90,0	2,0	0,5	4,0	2,7	0,8	121
Рыжики	90,0	3,0	0,7	2,4	3,2	0,7	121
Сморчки	90,0	3,7	0,5	4,0	0,8	1,0	150
Сыроежки	91,0	2,5	0,5	1,7	3,5	0,8	92
Грибы сушеные							
Белые	13,0	36,0	4,0	23,5	17,0	6,5	1174
Подберезовики	13,0	38,0	5,0	21,5	15,0	7,5	1212

### *Контрольные вопросы*

1. Сколько дикорастущих растений, используемых в питании человека, произрастает на территории Сибири, включая Арктическую зону?
2. Какие части растений используются в приготовлении пищи?
3. Что изготавливают из дикорастущих ягод?
4. Что входит в химический состав грибов?
5. Для чего используются грибы?

## **Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ**

### **2.1. Методы консервирования растительного сырья**

Обезвоживание растительного сырья в основном производится двумя способами: тепловой сушкой и механическим путем. Сущность метода технического обезвоживания растительного сырья заключается в удалении влаги с преодолением гидравлического сопротивления скелета сырья и имеющейся механической связи между жидкой и твердой фазой растительного сырья.

К механическим методам обезвоживания растительного сырья относятся отжим и прессование. Этот метод обезвоживания является более дешёвым, поэтому его используют при значительной влажности сырья. Однако в растительном сырье содержится не чистая вода, а сок, содержащий растворенные биологически активные вещества. Поэтому механическое удаление жидкости из растительного сырья не рекомендуется.

Наиболее распространенное применение имеет тепловая сушка, при которой влага растительного сырья за счет сообщенной ей тепловой энергии переходит в парообразное состояние и в виде паров выводится из сырья в среду сушильного аппарата. Тепловая сушка растительного сырья осуществляется путем испарения влаги [1, 8].

Сушкой называют процесс удаления из материала любой жидкости, в результате чего увеличивается относительное содержание сухой части. При сушке растительных материалов удаляют главным образом воду, поэтому под сушкой понимают процесс обезвоживания (консервирование) продуктов.

Сушка является нестационарным процессом, в ходе которого влажность изменяется во времени и в объеме материала, приближаясь к равновесной. Интенсивность удаления влаги зависит от кинетики её переноса, от физико-химических свойств материала и движущей силы [6].

Тепловой способ сушки связан с затратой тепла на фазовое превращение влаги. Эта теплота сообщается материалу несколькими способами: кондукцией, конвекцией, радиацией при прогреве материала от поверхности внутрь и за счет энергии электрического поля токов высокой частоты при прогреве материалов в массе.

Во время тепловой сушки испарение жидкости из растительного сырья в начале технологического процесса происходит с поверхности

подвергаемого сушке сырья, а при уменьшении влаги испарения внутрь сырья переходит тепло (капиллярно-пористой поверхности). При сушке растительного сырья в электрическом поле токов высокой частоты происходит удаление влаги в массе сырья.

При прогреве растительного материала (ягод) в электрическом поле высокой частоты, когда температура растительного сырья возрастает до точки кипения, происходит процесс выпаривания внутри сырья. В этот момент времени кинетическая энергия всех молекул внутри растительного материала достигает величины, обеспечивающей преодоление связи внутри сырья, а также сопротивление внешней среды, куда отводится выпаренная влага из сырья. Из сушильной камеры аппарата влага отводится с воздухом или в чистом виде и поступает в конденсатор. В некоторых случаях влагу материала можно предварительно заморозить, затем за счет энергии, подводимой извне, при вакууме превратить в газ, минуя жидкое состояние.

Во время сушки влажного растительного сырья с значительным вакуумом без подвода тепловой энергии извне необходимая теплота для удаления жидкости отнимается от высушиваемого сырья, температура становится ниже тройной точки, и оставшаяся в материале жидкость самовымораживается. В последующем при подводе тепла извне происходит испарение льда, его сублимация.

Применение методов консервирования–обезвоживания и сушки зависит от свойств материала и целевого назначения продукта [3].

## **2.2. Формы связи влаги с материалом**

При тепловой сушке процесс извлечения влаги из материала складывается из двух стадий – перемещения молекул воды изнутри твердой фазы к ее поверхности и перехода с этой поверхности в омывающий газовый поток. Следует сказать, что если оптимальные условия проведения второй стадии сравнительно просто достигаются созданием требуемой гидродинамической обстановки в потоке газа, то повлиять на скорость переноса внутри сушеного образца очень сложно, так как она зависит от структуры материала, метода и режима сушки, формы связи влаги со скелетом, причем обычно находящаяся внутри твердой фазы жидкость неоднородна, так как удерживается различными силами. По величине энергии, затрачиваемой на отрыв влаги, различают химическую, физико-химическую и физико-механическую связи.

Химической, наиболее прочной связью в материале удерживается строго определенное количество влаги. Удаление ее возможно либо при химической реакции, либо нагреванием до высоких температур. При сушке этот вид связи сохраняется.

Физико-химически связанной называется влага, удерживаемая в материале адсорбционно и осмотически.

Адсорбционно связанная влага удерживается силовым полем на поверхности пор преимущественно в виде молекулярного слоя. Ее отрыв возможен лишь при соответствующей затрате энергии.

Осмотически связанная влага обычно располагается в замкнутых ячейках структуры, волокнах. По своим свойствам она аналогична обычной воде и удаляется из материала значительно проще сравнительно с адсорбционно связанной влагой.

Физико-механически связанная влага – это влага макро- и микрокапилляров. К первым относятся поры со средним радиусом больше  $10^{-5}$  см, ко вторым – с меньшим средним радиусом.

Физико-механически связанная влага связана с материалом наиболее слабо.

В инженерной практике всю находящуюся в материале жидкость делят обычно на свободную и связанную, понимая под свободной ту, скорость испарения которой с поверхности твердого тела равна скорости испарения с поверхности жидкости. Если же испарение влаги происходит медленнее, чем с поверхности зеркала, то такая влага называется связанной.

### **2.3. Методы тепловой сушки**

В настоящее время в пищевой промышленности большое применение нашел конвективный метод сушки.

В качестве теплоносителя используется нагретый воздух или топочные газы, которые одновременно принимают тепло и поглощают влагу. Механизм удаления влаги имеет два периода. Вначале испарение влаги происходит на открытой поверхности, затем зона испарения влаги углубляется внутрь материала. Перенос влаги внутри материала происходит за счет влагопроводности и термовлагопроводности как в виде жидкости, так и в виде пара.

В зависимости от свойств сырья и продуктов подбирается температурный режим сушки и теплоноситель.

Во время кондуктивной сушки тепло передается растительному сырью путем теплопроводности – молекулярный перенос теплоты

посредством теплового движения микрочастиц в сплошной среде материала, обусловленной наличием градиента температуры между нагретой поверхностью сушильного аппарата (плитой) и прижатым к ней высушиваемым сырьем. При низких температурах греющей поверхности сушильного аппарата испарение зачастую идет на открытой поверхности сырья. При высоких температурах греющей поверхности сушильного аппарата (от 85 до 110 °С) происходит интенсивное испарение внутри растительного сырья, и молекулярный перенос образовавшегося пара к открытой поверхности идет посредством градиента давления  $\Delta P$ . Появление градиента давления сопровождается тем, что скорость образования появившегося пара в контактном слое высушиваемого материала больше, чем скорость переноса пара с поверхности сырья.

Кондуктивная сушка растительных материалов характеризуется высокой интенсивностью процесса сушки – на 1-2 порядка выше, чем при проведении конвективной сушки [6].

Сушка растительного сырья с использованием радиации (термоизлучение) происходит посредством переноса энергии от источника радиации с температурой от 1000 до 2500 К к высушиваемому растительному сырью коротковолновыми инфракрасными лучами в толщу материала и отдачи тепла от поверхности растительного сырья в окружающую его среду, а перенос влаги к поверхности происходит за счет температурного градиента (20-50 град/см) внутри материала. Используется для сушки тонко нарезанных овощей, хлеба.

При сушке в глубоком вакууме продукты можно сушить в замороженном состоянии, при этом происходит возгонка льда (сублимация). Продукт сохраняет все витамины, высушенный продукт сохраняет первоначальный объем и свою пористую структуру. Тепло подводится в количестве, необходимом только для возгонки льда. Этим методом можно сушить лекарственное и растительное сырье, грибы, ягоды.

### **2.3.1. Периоды и скорости сушки**

Скорость удаления влаги при сушке зависит от ряда параметров: природы и влажности материала, способа перемешивания в сушильной камере, метода сушки, температуры сушильного агента и многих других факторов. Поэтому определение продолжительности сушки становится сложной задачей.

Характер изменения влажности материала и скорости (под которой понимают изменения влажности за бесконечно малый промежуток времени) в ходе технологического процесса сушки растительного сырья устанавливают на основе проведенных экспериментальных данных путем выведения кривых процесса сушки сырья  $u = f(\tau)$  и скорости сушки  $\frac{u}{\tau} = f(u)$ , где  $u$  – влажность растительного сырья, %;  $\tau$  – время сушки растительного сырья, кривая влажности растительного материала во времени представлена на рисунке 2.1.

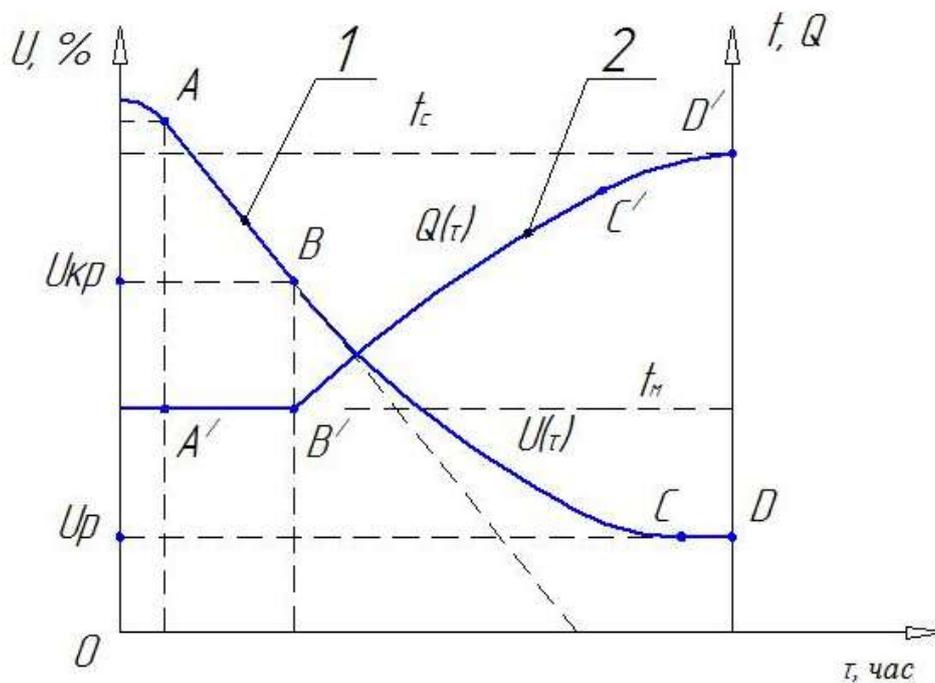


Рисунок 2.1 – Кривая сушки влажности растительного материала во времени: 1 – кривая изменения влажного материала; 2 – кривая изменения температуры в процессе сушки;  $u_{кр}$  – критическая влажность;  $u_p$  – равновесная влажность

В начале процесса до точки А материал нагревается, влажность его уменьшается незначительно. На участке АВ влажность материала уменьшается прямолинейно (период постоянной скорости сушки). На участке ВС влажность уменьшается криволинейно (период падающей скорости сушки). В конце периода (точка С) влажность достигает  $u_p$  и на участке СД не изменяется, наступает период динамического равновесия между влагой в растительном сырье и влагой в теплоносителе.

Кривая скорость сушки (рис. 2.2) строится путем графического дифференцирования кривой сушки  $u = f(\tau)$ . В первом периоде сушки от  $u$  до  $u_{кр}$  скорость сушки постоянна, и испарение влаги идет с по-

верхности, скорость сушки равна скорости испарения влаги с поверхности (AB) и зависит от температуры теплоносителя. Температура растительного сырья при этом равна температуре мокрого термометра (A'B'). Далее скорость сушки падает (BC), температура растительного материала повышается (B'C'), процесс сушки прекращается, когда сырье достигает  $u_p$  (равновесного состояния), температура растительного сырья становится равной температуре теплоносителя (D').

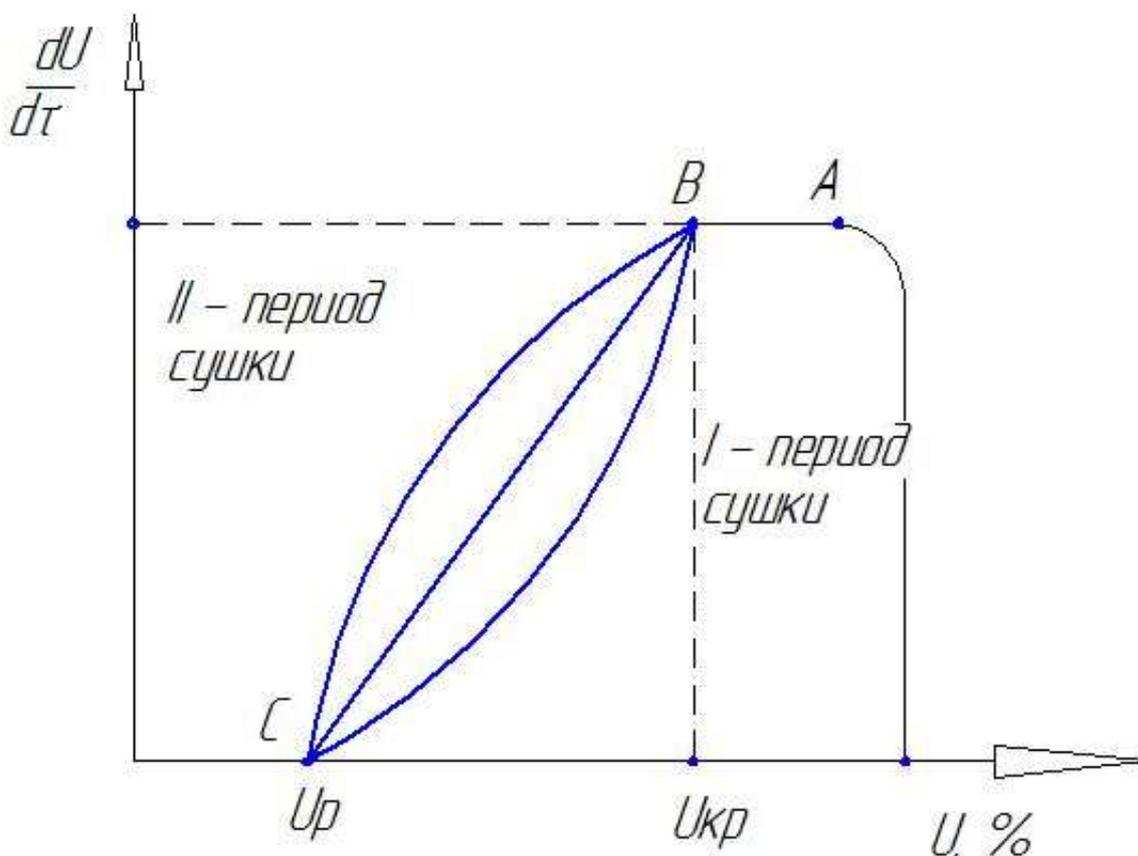


Рисунок 2.2 – Кривая скорости сушки

Начиная с  $u_{кр}$  до  $u_p$ , наступает период падающей скорости сушки, испарение влаги идет из глубоких слоев материала, скорость сушки подчиняется закону диффузии и определяется константой диффузии и длиной пробега молекул, равной половине толщины слоя растительного сырья, температура сырья повышается. Величина выпуклости или прогиба кривой скорости сушки в этом периоде зависит от свойств растительного сырья.

Перечень основных методов сушки растительного сырья, способов переноса тепла от различных источников тепла и аппаратов удаления влаги приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Классификация методов и способов тепловой сушки

Метод сушки	Способ сообщения энергии (тепла) материалу	Источник энергии (тепла)	Механизм удаления влаги	Характеристика влажных материалов	Область распространения и результаты применения метода
1	2	3	4	5	6
Конвективная сушка	Конвекция – перенос теплоты в среде с неоднородным распределением температуры, осуществляемый макроскопическими элементами среды при их перемещении	Нагретый газ (воздух, продукты сгорания топлива, газоздушная смесь, перегретый пар, инертный газ – азот), омывающий влажный материал в самых разнообразных условиях	Перенос влаги внутри материала за счет неизотермической массопроводности (влагопроводности и термовлагопроводности) как в виде жидкости, так и в виде пара. Термовлагопроводность обычно препятствует сушке. Испарение вначале происходит на открытой поверхности материала, а затем зона испарения углубляется внутрь материала	Твердый материал разнообразной формы, структуры и различных размеров, различные пасты и жидкости (растворы)	Сушка самых различных материалов (продуктов) при наиболее простом конструктивном оформлении сушильных камер; сушильный агент является одновременно теплопередачиком и влагопоглотителем

1	2	3	4	5	6
Кондуктивная сушка	Кондукция (теплопроводность) – молекулярный перенос теплоты посредством теплового движения микрочастиц в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температуры	Нагретые поверхности (плиты, вальцы, цилиндры и т.д.), к которым прижимается влажный материал	<p>А. При низких температурах греющих поверхностей <math>t_{гр}</math> испарение в основном происходит на открытой поверхности материала.</p> <p>Б. При высоких температурах <math>t = 85-110</math> °С интенсивное парообразование внутри материала (в контактном слое) и молярный перенос пара к открытой поверхности за счет градиента общего давления <math>\Delta_p</math>. Возникновение <math>\Delta_p</math> обусловлено тем, что скорость образования пара в контактном слое больше, чем скорость переноса пара. Величина <math>\Delta_p</math> поддерживается на определенном уровне за счет переноса жидкости в контактном слое</p>	Пастообразные материалы (овощные и фруктовые пюре и пасты) и жидкости (молоко, кормовые дрожжи и т.д.)	Сушка материалов характеризуется высокой интенсивностью на один-два порядка выше, чем при конвективной сушке

1	2	3	4	5	6
Сушка под воздействием энергетических полей: электромагнитное поле – терморadiационная сушка инфракрасными лучами (сушка термоизлучением)	Радиация (излучение) – перенос энергии от источника (генератора) излучения к объекту облучения путем электромагнитных колебаний через среду, прозрачную для теплового излучения	Излучатели, нагретые до высокой температуры: а) темные, $T_{изл} \approx 1000 \dots 1200$ К; б) светлые, $T_{изл} \approx 2200 \dots 2500$ К	В связи с проникновением коротковолновых инфракрасных лучей в толщу материала и отдачей тепла с поверхности материала в окружающую среду в нем создается аномальное распределение температуры: на некоторой глубине она выше, чем на поверхности материала, и значительно выше, чем внутри него. Поэтому в начале процесса за счет температурного градиента (25-50 град/см и более) влага перемещается	А. Тонкие материалы (тонко нарезанные овощи). Б. Толстые материалы (тесто, хлеб и др.)	Сушка материалов при значительных тепловых напряжениях поверхности облучаемого материала, превышающих в 30-70 раз и более напряжение при конвективной сушке, что значительно интенсифицирует сушку тонких материалов и ускоряет термическую обработку толстых материалов. Большой эффект дает прерывистое облучение
Сублимационный метод сушки	Конструкция – термоизлучение	-	Сублимация (возгонка) предусматривает переход вещества из твердой фазы в газообразную минуя жидкую фазу	-	Сушка лекарственного сырья, грибов и ягод

### 2.3.2. Классификация сушильных установок

1. По способу подвода тепла к растительному сырью различают следующие типы сушильных аппаратов:

а) конвективные, это когда количество тепла, необходимое для испарения жидкости из растительного сырья, передается от нагретого воздуха топочными газами или от перегретого пара сушимому сырью периодическим или непрерывным путем;

б) контактные, или кондукционные, сушильные аппараты, это когда полученное количество тепла, необходимое для испарения жидкости из растительного сырья, передается материалу от нагретой поверхности или от нагретой жидкости, контактирующей с растительным сырьем, с температурой выше 100 °С;

в) сушка в поле токов высокой частоты, это когда температура внутри растительного сырья повышается, вследствие чего жидкость из внутренних слоев сырья быстро перемещается к поверхности и в дальнейшем испаряется в окружающую материал среду.

Кроме того, применяются комбинированные способы сушки растительного сырья: конвективно-контактная сушка сырья, сушка материала токами высокой частоты в комбинации с конвективной сушкой и терморadiационной сушкой.

2. В зависимости от давления сушильного аппарата в рабочей камере различают атмосферные сушилки сырья, в которых высушивание растительного сырья идет при атмосферном или незначительно отличающемся от него давлении, и вакуумные сушильные аппараты, работающие при давлении в сушильной камере аппарата, значительно меньшем атмосферного.

3. По характеру работы различают сушильные аппараты периодического действия с периодической загрузкой и выгрузкой всего высушиваемого растительного сырья и непрерывного действия, в которых загрузка и выгрузка сырья происходят непрерывно (конвейерные, ленточные сушилки), или же через определенные промежутки времени с одной стороны загружается часть помещаемого в сушилку растительного сырья по мере выгрузки такой же части высушиваемого сырья с другой стороны аппарата – коридорные сушильные установки.

4. В зависимости от применяемого сушильного агента в сушильных аппаратах различают использующие воздух и топочные газы. Для растительного сырья, которое при сушке не должно соприкасаться

ся с кислородом сушильного агента, могут использоваться аппараты с применением в качестве сушильного агента перегретого пара или других инертных газов.

5. По движению сушильного агента в рабочей камере сушильного аппарата относительно высушиваемого растительного сырья различают сушилки, работающие по принципу прямотока, когда направления движения высушиваемого сырья и используемого сушильного агента совпадают; работающие по принципу противотока, когда направления эти противоположны; сушильные аппараты с перекрестным током, в этих аппаратах направления движения растительного сырья и используемого в аппарате сушильного агента перпендикулярны одно другому; сушильные аппараты с реверсивным током, когда направление движения применяемого сушильного агента относительно высушиваемого сырья переменное.

6. По принципу циркуляции используемого в сушильном аппарате сушильного агента различают машины с естественной циркуляцией агента, в которых движение сушильного агента внутри рабочей камеры аппарата идет вследствие разности плотностей газа в различных частях рабочей камеры, и с искусственной циркуляцией сушильного агента, в которых движение агента происходит при помощи струйных насосов-эжекторов, центробежных или осевых вентиляторов.

7. По способу нагрева сушильного агента в аппаратах различают установки с шаровым обогревом, в которых нагревание сушильного агента в аппарате осуществляется «в поверхностных подогревателях при помощи водяного пара с давлением от 3 до 10 атм, при этом сушильный агент (воздух) нагревается до 60-145 °С. Повышение температуры нагрева сушильного агента и, следовательно, необходимого давления греющего водяного пара удорожает сушильный аппарат. В последнее время ведутся научные работы по разработке новых высококипящих теплоносителей, которые могли бы осуществлять подогрев сушильного агента до высоких температур (300-400 °С) в применяемых поверхностных подогревателях, работающих при давлении не более 10 атм.

В случаях, когда необходимо подавать в сушильный аппарат чистый воздух с температурой 300-350 °С, применяют подогрев воздуха в газовых рекуперативных подогревателях (обычно в трубчатых). Греющим теплоносителем служат топочные газы от специальной топки сушильного аппарата.

Если допускаются незначительные загрязнения сушеного растительного сырья, то применяют сушку смесью топочных газов с воздухом. Аппараты с электрическим нагревом сушильного агента в настоящее время применяются только исключительно в лабораторных условиях.

8. Сушильный агент – воздух или другой газ – может подогреваться в самой сушильной камере аппарата или в выносных подогревателях до ввода его в сушильную установку. Если растительное сырье не выдерживает высоких начальных температур, применяется схема с промежуточным подогревом сушильного агента – между отдельными зонами сушильной установки.

9. По кратности использования сушильного агента в рабочей камере различают сушильные аппараты с однократным использованием сушильного агента и с рециркуляцией агента. В сушильных аппаратах с рециркуляцией сушильного агента осуществляется частичный возврат отработавшего агента в сушильную камеру аппарата для повторной циркуляции сушильного агента. При этом происходит частичный выхлоп влажного и присос свежего воздуха.

10. Сушильные аппараты, в которых имеется полная или частичная замена отработавшего влажного воздуха сухим, называются аппаратами с воздухообменом. Существуют сушильные аппараты, работающие без воздухообмена или, как говорят, с замкнутой циркуляцией сушильного агента. Постоянная влажность воздуха в этих сушильных аппаратах осуществляется непрерывной осушкой воздуха при помощи контактного или поверхностного теплообменника – конденсатора. Такие сушильные установки называются конденсационными.

Классификация сушильных аппаратов по конструктивным признакам представлена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Классификация сушильных аппаратов по конструктивным признакам

Признак классификации	Тип сушилок
1	2
Способы подвода тепла к растительному сырью	Конвективные, контактные (сушка на горячих поверхностях), радиационные (сушка инфракрасными лучами), электрические (сушка в электрическом поле)

1	2
Давление в рабочем пространстве	Атмосферные, вакуумные
Способ действия	Периодического или непрерывного действия
Сушильный агент	Воздух, топочные газы, смесь воздуха с топочными газами, перегретый пар и инертные газы
Направление движения сушильного агента относительно материала	С прямотоком, противотоком, перекрестным током и реверсивные
Характер циркуляции сушильного агента	С естественной и принудительной циркуляцией
Способ нагрева сушильного агента	С паровыми воздухоподогревателями, огневыми воздухоподогревателями, путем смешения с топочными газами, с электронагревом
Схема нагрева сушильного агента	С централизованным подогревом, с подогревом индивидуальными агрегатами и с промежуточным подогревом
Кратность использования сушильного агента	Однократные и с рециркуляцией
Способ удаления влаги из сушилки	С воздухообменом, конденсационные и с химическим поглощением влаги
Конструкция сушилки	Коридорная, камерная, шахтная, ленточная, конвейерная, барабанная, трубчатая и т.п.

#### 2.4. Механизм сублимационной сушки растительного сырья

За последние годы получил промышленное применение способ сушки ряда пищевых растительных веществ в замороженном состоянии в условиях вакуума (1,0-0,1 мм рт. ст.), этот способ сушки называется сублимацией, он позволяет сохранить основные биологические качества сушеного материала, что имеет важное значение для создания запасов и сохранения продуктов питания, так как высушенное таким способом растительное сырье может сохраняться значительное время.

Как известно, состояние воды может определяться тремя фазами: твердой, жидкой и газообразной, которые могут существовать как самостоятельно, так и совместно. Точка одновременного существования трех фаз называется тройной точкой. Для воды она характеризуется температурой 0,0098 °С и парциальным давлением водяного пара 4,58 мм рт. ст. Сублимация происходит при состоянии веществ ни-

же этой точки. Из приведенной на рисунке 2.3 диаграммы видно, что если нагревать растительное сырье (линия  $FD$ ) в твердом состоянии при постоянном давлении ниже давления тройной точки, то при достижении точки  $D$  произойдет испарение твердого тела, называемое возгонкой, или сублимацией. При обратном процессе ( $ED$ ) при достижении точки  $D$  будет происходить кристаллизация пара без перехода в жидкое состояние.

Сущность применения вакуума при сушке растительного сырья сублимацией состоит в том, что при этом соответственно падает и температура фазового перехода, что хорошо видно из таблицы 2.3, идет быстрое замораживание и испарение влаги сырья в начальный момент. Из этого следует также, что при подводе тепла в условиях значительного вакуума можно создать и большие разности температур между растительным сырьем и сушильным агентом по сравнению с обычной вакуумной сушкой, что представлено в таблице 2.3.

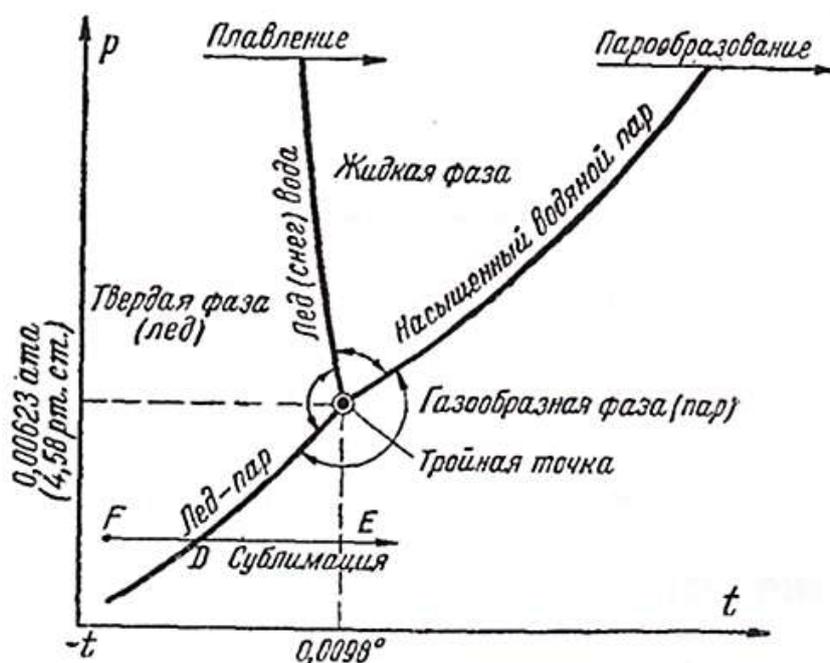


Рисунок 2.3 – Изменение состояния влаги в диаграмме  $pt$

Таблица 2.3 – Зависимость температуры сублимации льда от давления окружающей среды

Давление, мм рт. ст.	Температура сублимации, °С
4,6	0,0098
1,0	-17,50
0,1	-39,3
0,001	-57,6

При постоянной температуре среды интенсивность испарения, продолжительность сушки растительного сырья или скорость отвода паров испаряющегося льда возрастают с уменьшением давления.

Если рассмотреть график, характеризующий работу сублиматора, представленный на рисунке 2.4, показывающий изменение параметров влажного материала, то можно видеть, что весь процесс сушки можно довольно четко разделить на три периода.

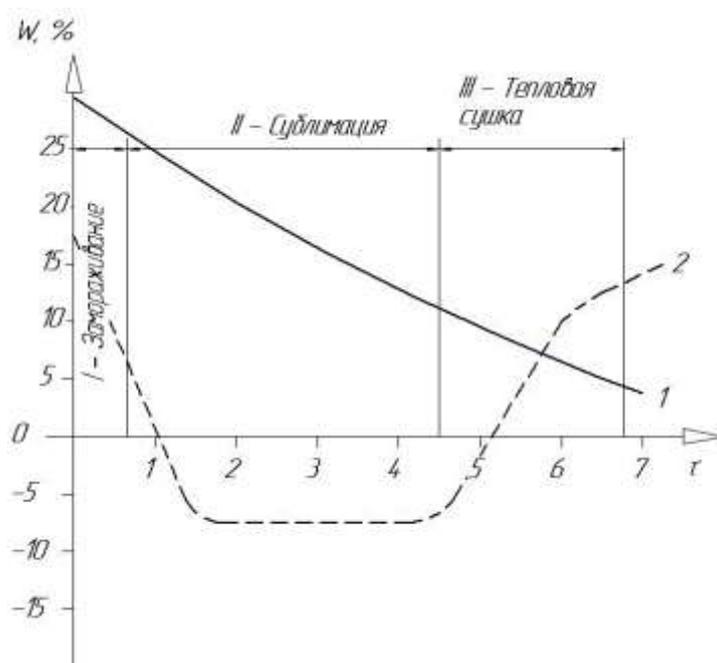


Рисунок 2.4 – Изменение температуры и влажности растительного сырья при сублимационной сушке:

1 – влажность растительного сырья; 2 – температура растительного сырья

I – период самозамораживания, когда в результате снижения давления в сушильной камере аппарата осуществляется замораживание влаги в растительном сырье; при этом резкое снижение давления ведет к интенсивному испарению влаги с поверхности сырья; при самозамораживании обычно испаряется до 10-15% всей удаляемой влаги из растительного сырья;

II – период сублимации, аналогичный периоду постоянной скорости процесса сушки;

III – период испарения остаточной влаги из растительного сырья.

Процесс переноса влаги в растительном сырье при сублимации существенно отличается от переноса влаги при обычных атмосферных способах сушки. При сублимации перенос пара от поверхности испарения происходит путем эффузии, т.е. при таком движении молекул пара, когда они не сталкиваются друг с другом. Достоинством

сублимационной сушки растительного сырья являются сохранение основных биологически активных веществ сушеного сырья, а также незначительный расход ( $q=500\div 550$  ккал/кг влаги) низкопотенциального тепла (при температуре 40-50 °С).

Схема установки для сублимационной сушки пищевых продуктов методом сублимации представлена на рисунке 2.5.

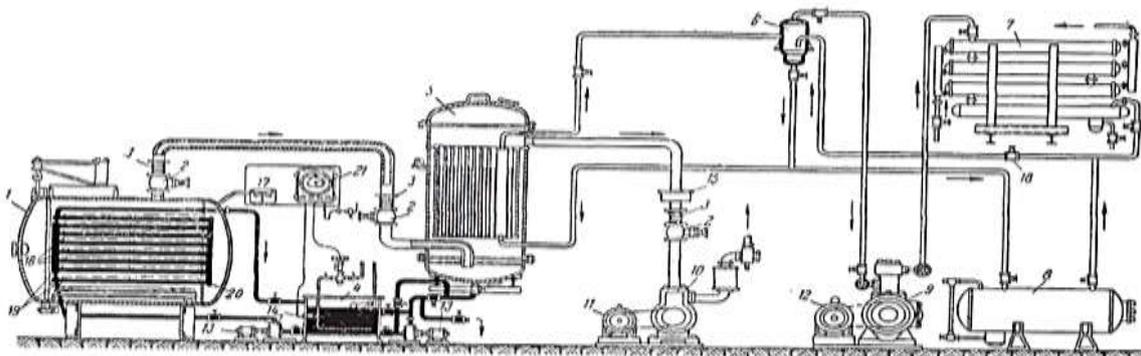


Рисунок 2.5 – Схема установки для сушки пищевых продуктов методом сублимации:

- 1 – сублиматор; 2 – сильфонный вентиль; 3 – сильфон; 4 – бак для горячей воды; 5 – конденсатор-вымораживатель; 6 – отделитель жидкости; 7 – элементный конденсатор; 8 – аммиачный ресивер; 9 – компрессор; 10 – вакуумный насос; 11, 12 и 13 – электродвигатели; 14 – центробежный насос; 15 – фильтр; 16 – греющие плиты; 17 – термовакуумметр; 18 – регулирующий вентиль; 19 – противни с продуктом; 20 – нижняя греющая плита; 21 – терморегулятор; 22 – баллон с капилляром; 23 – мембранный исполнительный механизм

Как видно из рисунка 2.5, установка для сушки пищевых продуктов методом сублимации имеет большую сложность в изготовлении и громоздкость, высокую металлоемкость и стоимость, вспомогательное оборудование (холодильная установка), что приводит к высоким производственным затратам, а соответственно, к высокой себестоимости продукции из растительного сырья.

### *Контрольные вопросы*

1. Какими способами производят обезвоживание растительного сырья?
2. Что называют процессом сушки?
3. Какие бывают формы связи влаги с материалом?
4. Какие бывают методы тепловой сушки и способы переноса тепла?
5. По каким признакам классифицируют сушильные установки?

## Глава 3. ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

### 3.1. Особенности технологии тепловой сушки растительного сырья

Сушка консервированием является одним из старейших способов сохранения пищевых продуктов.

Данный метод основан на том, что для нормальной жизнедеятельности микроорганизмов требуется определенное количество влаги, в частности для бактерий – не менее 30%, для развития плесеней – не менее 15% влаги.

Удаление влаги из продукта исключает возможность протекания микробиологических и биохимических процессов, обеспечивается сохранение пищевого сырья в течение длительного времени без порчи. В высушенном сырье вследствие значительного повышения концентрации клеточного сока все обменные процессы микроорганизмов нарушаются, микробы теряют способность использовать растворенные в соке сахара и другие вещества для поддержания своей жизнедеятельности.

Обезвоживание грибов и ягод проводят до остаточной влаги 10–25% в зависимости от вида сырья [1, 2]. Однако грибы и ягоды можно высушивать до влажности 4–5%, но такие высушенные продукты будут характеризоваться высокой гигроскопичностью и достаточно интенсивно поглощать влагу из окружающей среды. Поэтому высушенные до данной влажности продукты упаковывают в герметичную тару для предупреждения увлажнения продуктов из воздуха.

В настоящее время разработано большое количество различных способов обезвоживания растительного сырья (конвективный, кондуктивный, микроволновый, акустический, инфракрасный, вакуумный, сублимационный и т.д.) и используемых для этого сушильных установок.

Выбор конкретного метода обезвоживания должен основываться на технико-экономических показателях, требованиях к качеству конечного продукта: его органолептической оценке, структуре и консистенции, регидратируемости, срокам хранения, виду упаковки и т.д. При этом необходимо стремиться к минимизации изменений химического состава исходного сырья в процессе сушки.

Принцип действия конвективной сушки основан на передаче энергии к продукту путем омывания его сушильным агентом, в каче-

стве которого выступает нагретый воздух или парогазовая смесь. Влага, испаряющаяся с поверхности продукта, уносится сушильным агентом в окружающую среду. Обезвоживаемый продукт при этом может находиться в неподвижном состоянии, во взвешенном слое либо в распыленном состоянии, если это жидкий продукт. В последнем случае сырье диспергируется и обезвоживается в потоке газообразного теплоносителя. При этом продукт находится в контакте с теплоносителем относительно короткое время за счет большой степени диспергирования и достаточно высокой температуры теплоносителя. В распылительных сушилках возможно также смешивание двух и более продуктов в процессе сушки. Таким способом возможно обезвоживать соки для получения фруктовых и ягодных порошков.

Кондуктивная сушка осуществляется за счет передачи энергии высушиваемому продукту путем непосредственного соприкосновения его с нагретой поверхностью. Данный вид обезвоживания эффективен для сушки пастообразных материалов и вязких жидкостей, для цельного растительного сырья этот способ малоэффективен [6].

Сушка инфракрасными лучами является одним из современных и перспективных способов обезвоживания. В основу данного метода положена способность молекул воды поглощать инфракрасное излучение определенного спектра. При этом ткани обезвоживаемого продукта не поглощают излучение в данном диапазоне, поэтому сушка может осуществляться при относительно невысоких температурах – порядка 40-60 °С [6].

В качестве источника излучения выступают керамические или металлические поверхности, либо инфракрасные лампы. Инфракрасная сушка является энергетически эффективной, поскольку около 80% энергии, подводимой к лампам, переходит в энергию ИК-излучения и практически без потерь передается влаге высушиваемого продукта. Для обеспечения направленности потока ИК-излучения инфракрасные лампы снабжаются параболическими рефлекторами.

Главное достоинство данного вида сушки состоит в относительно высокой скорости удаления влаги из сырья. Это обусловлено тем, что инфракрасное излучение, попадая в капилляры высушиваемого продукта, многократно отражается от стенок и практически полностью поглощается влагой. Кроме того, при инфракрасной сушке коэффициент теплообмена больше, чем при кондуктивном или конвективном способе сушки.

Сохранность витаминов при данном виде обезвоживания составляет порядка 60-70%, что на 10-20% выше, чем при конвективной сушке [2]. Таким образом, инфракрасная сушка является эффективным методом для обезвоживания фруктов и ягод.

Способ сушки в электромагнитных полях основан на действии высоких и сверхвысоких частот на влагу обезвоживаемого продукта. При данном способе сушки происходит равномерное прогревание продукта по всему объему, глубина проникновения электромагнитных волн составляет 10 см. Области продукта с более высоким влажностью получают больше энергии СВЧ-излучения, в результате чего влажность продукта выравнивается на протяжении процесса сушки. Одной из отличительных черт обезвоживания электромагнитными волнами является тот факт, что в процессе сушки продукта скорость удаления влаги не снижается, поскольку теплопроводность в данном случае не играет ключевой роли [6].

Сушка в СВЧ-поле является губительной для кишечных палочек, стафилококков и других микроорганизмов. Причина тому – явление так называемого «теплового удара», когда происходит резкое повышение температуры продукта при одновременном диэлектрическом нагреве белков микроорганизмов. Поскольку сушка электромагнитным излучением проходит при относительно низких температурах – порядка 30-60°C, в высушенном продукте сохраняются витамины (особенно витамины С, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub> и В<sub>3</sub>), минеральные вещества, эфирные масла и другие биологически активные вещества.

Так же как и инфракрасная сушка, обезвоживание в СВЧ-поле является экологически безопасным, поскольку источником энергопотребления электромагнитных генераторов является только электроэнергия. При этом также отсутствуют потери тепла, так как источником тепла является сам высушиваемый продукт. Из недостатков стоит отметить достаточно низкий КПД (около 60%), в связи с чем данный метод сушки целесообразно проводить для продуктов с низкой влажностью. Кроме того, воздействие электромагнитных волн ведет к разрушению клеточных оболочек, выделению клеточного сока и разрушению термолабильных нутриентов растительного сырья. Однако, несмотря на недостатки, сушка в СВЧ-поле может с успехом применяться для обезвоживания ягод.

Акустический метод сушки заключается в удалении влаги из продукта путем воздействия на него ультразвукового излучения

большой интенсивности. В результате такого воздействия происходит экстрагирование влаги. Сушка осуществляется циклически: акустическая волна выбивает влагу на поверхности продукта, после чего оставшаяся влага равномерно распределяется по капиллярам, и процесс повторяется снова. Основными достоинствами такого вида сушки являются отсутствие повышения температуры в процессе обезвоживания, что исключает негативное действие высоких температур на термолабильные компоненты растительного сырья, а также достаточно высокие скорости сушки продукта [6].

Для совершенствования методов сушки вышеуказанными способами используют обезвоживание в условиях вакуума, что позволяет проводить процесс при более низкой температуре и получать продукт с большей степенью сохранности нативных свойств.

Вакуумная сушка представляет собой метод обезвоживания при давлении ниже атмосферного, но выше тройной точки воды. Источником тепла при этом могут служить инфракрасные лампы нагрева, греющие поверхности или СВЧ-генераторы. Процессы сушки в вакууме аналогичны процессам, протекающим при кондуктивной или инфракрасной сушке. При этом пониженное давление способствует увеличению интенсивности испарения влаги с продукта за счет повышения коэффициента массообмена, который в первом приближении обратно пропорционален давлению. Вакуумная сушка может с успехом использоваться для обезвоживания ягодного сырья. К недостаткам данного вида обезвоживания можно отнести достаточно большие энергозатраты и высокую стоимость оборудования [6].

Сублимационная сушка (лиофилизация) является одним из самых прогрессивных и эффективных методов сушки в пищевой промышленности и позволяет получить готовую продукцию, максимально приближенную по качественным показателям к натуральному растительному сырью. Сущность данного способа сушки заключается в удалении влаги из продукта при давлении ниже тройной точки воды (менее 611,6 Па). В основу сублимационной сушки положен тот факт, что при таком давлении влага в продукте может присутствовать только в двух агрегатных состояниях – твердом и газообразном. Влага в продукте при этом переходит в кристаллическую фазу и сублимирует в окружающую среду. Одна из специфических особенностей сублимационной сушки заключается в том, что сублимация влаги не вызывает заметных изменений в структуре продукта, что благоприятно сказывается на его качественных показателях. Кроме того, поскольку

большая часть влаги удаляется из сырья в замороженном состоянии, исключается негативное термическое воздействие на компоненты растительного сырья.

Сублимационная сушка позволяет в максимальной степени сохранить не только химический состав растительного сырья, но и его реологические свойства. Количественные изменения в химическом составе лиофилизированных продуктов носят минимальный характер. Так, потери витамина С составляют 10÷20%. В основном потери биологически активных веществ при сублимационной сушке происходят при обезвоживании смесей из различных плодов и ягод вследствие инактивации ферментов и снижения уровня рН. Из-за отсутствия условия развития микроорганизмов лиофилизированные продукты наименее подвержены микробиальной порче [6].

Стоит отметить, что качество лиофилизированных продуктов зависит от многих факторов: физико-химического состава самого растительного сырья, технологических режимов обезвоживания, вида упаковки и т.д. Технологические параметры сублимационной сушки для каждого вида растительного сырья подбираются экспериментальным путем. Получаемые в результате исследований данные позволяют разрабатывать математические модели, описывающие процессы сублимационной сушки и их влияние на качество лиофилизированного растительного сырья.

В отношении плодово-ягодного сырья сублимационная сушка является крайне перспективным методом обезвоживания для получения как цельных плодов и ягод, так и порошкообразных продуктов, характеризующихся высокими качественными показателями.

П.А. Ребиндером была предложена классификация форм связи влаги в коллоидных капиллярно-пористых телах, учитывающая как природу образования этих форм, так и энергию связи влаги в растительном сырье. Классификация П.А. Ребиндера широко признана в сфере сушильной технологии и предусматривает три группы форм связи влаги: химическую, физико-химическую и физико-механическую.

Химическая связь влаги характеризуется наибольшей прочностью связи с растительным сырьем. Химически связанная влага, как правило, не удаляется из растительного сырья путем тепловой сушки, такую влагу можно удалить только путем химических реакций либо интенсивным прокаливанием. Различают влагу, связанную в виде

гидроксильных ионов, и влагу молекулярных соединений типа кристаллогидратов, которая связана гораздо слабее первой [3].

Физико-химической форме связи соответствуют несколько видов связи влаги: адсорбционно-связанная и осмотически-связанная влага.

Адсорбционно-связанная влага удерживается молекулярным силовым полем по лиофильным группам у поверхности раздела мицелл (коллоидных частиц) с окружающей средой. Мицеллы характеризуются достаточной высокой дисперсностью частиц, условный радиус которых составляет порядка  $0,001 \div 0,1$  мкм. Такая высокая дисперсность обуславливает большую свободную поверхность коллоидных тел, а следовательно, и значительную свободную поверхностную энергию, которая принимает участие в адсорбционном связывании влаги.

Известно, что поверхностное натяжение является мерой свободной поверхностной энергии. Поэтому вся работа, затрачиваемая на образование  $1 \text{ см}^2$  поверхности из молекул тела, переходит в избыток свободной поверхностной энергии, характеризующейся поверхностным натяжением.

Внутри растительного сырья молекулы испытывают одинаковое притяжение со стороны других окружающих молекул, и равнодействующая притяжения равна нулю. Однако молекулы на поверхности тела в той или иной степени не уравновешены и обладают свободной энергией, за счет которой происходит притяжение молекул другой фазы, у которой межмолекулярная связь меньше, чем у данного тела.

Адсорбционная влага входит в общее количество влаги набухания. Данный вид связи называют еще иногда связанной влагой. При поглощении влаги коллоидным телом происходит выделение теплоты гидратации (набухания) и сжатие системы *вода – коллоидное тело*. Наибольшее количество теплоты выделяется при присоединении первого, наиболее прочно связанного мономолекулярного слоя. Термодинамическая аналогия процессов гидратации и растворения доказана С.М. Липатовым. Удаление из тела адсорбционно-связанной влаги связано с соответствующими затратами энергии. А.В. Лыковым приводятся сведения о том, что для удаления адсорбционно-связанной влаги она должна быть превращена в пар, после чего происходит ее перемещение к наружной поверхности тела.

К осмотически-связанной влаге относят влагу, содержащуюся в замкнутых ячейках, – как поглощенную осмотически сложно сфор-

мированной мицеллой, так и иммобилизационную – структурную влагу, захваченную при образовании геля (застудневание). Данной влаге соответствует относительно малая энергия связи. Осмотический вид связи влаги наиболее характерен в разбавленных растворах, где молекулярный вид связи определяется величиной энтропии.

Согласно С.М. Липатову, в высокомолекулярных соединениях различные фракции по-разному взаимодействуют с влагой – фракции с высокой молекулярной массой нерастворимы в воде, низкомолекулярные фракции – растворимы. При образовании геля формируется скелет, стенки которого состоят из высокомолекулярных нерастворимых фракций. Растворимые фракции частично находятся внутри клеток, частично – на их поверхности. Поскольку внутри клеток количество растворимых фракций выше, то влага проникает внутрь клеток через их стенку путем осмоса. Часть влаги проникает внутрь непосредственно при образовании геля. Причиной того, что осмотически связанная влага неспособна к растворению легко растворимых веществ (например, соли, сахара), является невозможность диффузии сухих веществ внутрь замкнутой клетки, в которой заключена влага.

Физико-механическая связь включает в себя влагу макро- и микрокапилляров.

Влага микрокапилляров находится в узких порах – капиллярах, средний радиус которых составляет менее  $10^{-4}$  мм. Влага заполняет микрокапилляры не только при непосредственном соприкосновении, но и за счет сорбции влажного воздуха. Влага микрокапилляров перемещается как в виде жидкости из центральных слоев до поверхности испарения, так и в виде пара от поверхности испарения в окружающую среду. Микрокапиллярная жидкость является свободной влагой в том понятии, что она характеризуется низкой энергией связи.

Влага макрокапилляров присутствует в капиллярах, средний радиус которых более  $10^{-4}$  мм. Давление пара над мениском макрокапилляров практически совпадает с давлением насыщенного пара над поверхностью чистой воды. В отличие от микрокапилляров, в макрокапилляры влага проникает только при непосредственном соприкосновении с ними [3].

Вследствие малого радиуса капилляров свободная влага, попадающая в них, принимает форму, обусловленную поверхностным натяжением и силой взаимодействия со стенками самих капилляров. Такой показатель, как лапласовское давление ( $P_{\sigma}$ , Па), учитывает силу поверхностного натяжения и кривизну поверхности мениска

$$P_{\sigma} = \frac{2\sigma}{r}, \quad (3.1)$$

где  $\sigma$  – величина поверхностного натяжения, Н/м;

$r$  – радиус мениска, м.

На основе исследований зависимости давления пара в микрокапиллярах от их радиуса А.В. Лыковым и Ю.Л. Кавказовым предлагается использовать в качестве главного критерия для классификации капилляров процесс переноса газообразного вещества в условиях нормального давления, при котором средняя величина длины свободного пробега молекул водяного пара составляет порядка  $10^{-7}$  м. Перенос газа при этом в макрокапиллярах осуществляется путем эффузии, в микрокапиллярах этот процесс осуществляется в виде диффузии [3].

Необходимо иметь в виду, что с повышением температуры возрастает интенсивность дыхания плодов и ягод, поэтому при хранении данного сырья необходимо исключить прямое попадание солнечных лучей. Следует также учитывать, что с понижением влажности окружающего воздуха усиливается усушка продуктов, так как при этом процесс испарения влаги протекает более интенсивно. Кроме того, одним из условий хранения данной продукции является поддержание газового состава, поскольку с накоплением углекислоты в окружающем воздухе нормальное дыхание плодов и ягод нарушается.

Биоз дает возможность сохранить свежее плодово-ягодное сырье в течение непродолжительного периода времени. В пищевой промышленности данный вид консервирования является не самостоятельным методом продления сроков хранения, а способом сохранения сырья на первом этапе технологической цепочки.

На принципе анабиоза основан ряд способов, среди которых: хранение при пониженных температурах, в замороженном состоянии и в атмосфере углекислого газа, увеличение концентрации сухих веществ путем сушки, добавление химических консервантов, подавляющих жизнедеятельность микроорганизмов.

Метод абиоза положен в основу многих способов консервирования: стерилизация нагревом, электрическим током, химическими веществами, ионизирующим излучением, ультразвуком, а также механическим удалением микроорганизмов из растительного сырья (стерилизующая фильтрация).

По характеру воздействия на продукт и происходящих в нем процессов все способы консервирования можно разделить на физиче-

ские, химические, биохимические, физико-химические и комбинированные.

### **3.2. Технологические схемы переработки растительного сырья**

Процесс замораживания плодов и ягод сопровождается не только разрушением клеток, но и снижением физиологической активности, причем оба этих процесса происходят совместно. Отрицательное влияние замораживания ягод проявляется в токсическом действии концентрирующегося водного раствора на живые клетки, дегидратации протоплазмы, которая наступает после льдообразования, а также в ряде других физико-химических изменений.

Сушка является одним из самых перспективных способов переработки и консервирования плодово-ягодного сырья, позволяющих в значительной степени продлить срок хранения без существенного снижения пищевой и биологической ценности. Изменения в плодах и ягодах в процессе сушки обусловлены прежде всего увеличением концентрации сухих веществ по мере удаления влаги, гидролизом высокомолекулярных соединений, а также ферментативными и неферментативными реакциями лабильных веществ.

В процессе обезвоживания происходит целый комплекс биохимических изменений. Прежде всего, наблюдается значительная усадка плодов и ягод – изменяется форма и объем ягод, этот процесс является необратимым. По мере концентрирования сухих веществ изменяется соотношение между отдельными фракциями углеводов, происходит частичная потеря летучих соединений и витаминов. При сушке наблюдается изменение цвета, что обусловлено разрушением каротиноидов (например, у рябины) и антоцианов (у темноокрашенных ягод). Изменение вкуса и аромата происходит из-за ферментативных и неферментативных реакций полифенолов, а также меланоидинообразования. На вкус ягод влияет также превращение флавоноидов в процессе обезвоживания. В случае, когда имеет место перегрев ягоды при сушке, происходит термическая дегградация лабильных веществ.

По мере удаления влаги из растительного сырья происходит концентрирование сухих веществ в клетке и повышение осмотического давления, что приводит к невозможности использовать питательные вещества микроорганизмами клетки.

Содержание сухих веществ при сушке плодов и ягод возрастает более чем в 5 раз. Концентрация углеводов в высушенных ягодах не совпадает с исходным значением в пересчете на абсолютное содержание сухих веществ. С повышением температуры сушки потери углеводов, в частности сахаров, возрастают.

Термическое воздействие процесса сушки ведет к значительным потерям биологически активных веществ растительного сырья вследствие термической деградации и окисления. Причем эти потери прямо пропорциональны температуре нагрева и продолжительности сушки. Особенно заметно разрушение витамина С, каротиноидов и катехинов. Потери витамина Р можно легко заметить по окраске плодов и ягод в коричневый цвет.

При сушке плодов и ягод испаряющаяся влага увлекает за собой летучие вещества, что приводит к потере естественного аромата плодов и ягод и появлению характерного запаха сухофруктов.

Степень сохранности пектиновых веществ при сушке ягод составляет порядка 93÷98% от начального содержания в свежем сырье. С повышением температуры сушки характерно усиление гидролиза протопектина.

В процессе обезвоживания плодов и ягод повышается концентрация органических кислот, что вызывает снижение активной кислотности.

Правильно подобранные режимы сушки плодов и ягод позволяют в максимально возможной степени сохранить биологически активные вещества и получить продукт с высокими органолептическими показателями.

Таким образом, в зависимости от способа переработки плодов и ягод наблюдаются различные физико-химические, органолептические и микробиологические превращения, которые следует учитывать при разработке соответствующих технологий. Все эти изменения играют существенную роль и влияют на качество вырабатываемого продукта.

В современных условиях быстрого роста цен на энергоносители актуальным вопросом становится разработка энергосберегающих систем в производственных условиях пищевой промышленности. Сушка является одним из самых энергоемких процессов переработки продуктов, в частности грибов и ягод. Особое значение данный процесс приобретает в условиях, когда необходимо в максимальной степени сохранить качество продукта и одновременно по возможности максимально снизить продолжительность обезвоживания и удельную себестоимость на удаление 1 кг влаги. Даже при высоких издержках

процесса сушки далеко не всегда удается сохранить требуемое качество плодов и ягод, поскольку на предприятиях пищевой промышленности зачастую используются устаревшие конструкции сушильных установок, в то время как в условиях рыночной конкуренции предприятиям следует особое внимание уделять качественным характеристикам готового продукта.

Сушка с применением теплового насоса является одной из технологий, позволяющей снизить энергетические затраты на обезвоживание и получить сухое растительное сырье высокого качества.

Тепловой насос представляет собой устройство, в котором реализован обратный термодинамический цикл: перенос тепла с источника низкопотенциальной теплоты на более высокий температурный уровень. Такими источниками может являться атмосферный воздух.

Энергосберегающий эффект использования тепловых насосов обусловлен тем фактом, что за исключением потерь количество получаемой тепловой энергии соответствует сумме тепловой энергии низкопотенциального и высокопотенциального источника тепла. Таким образом, тепловые насосы являются не только экологически безопасным, но и экономически выгодным технологическим решением обезвоживания растительного сырья [9].

Наибольшее распространение получили парокомпрессионные тепловые насосы с электроприводом компрессора для организации процесса сушки ввиду простоты системы.

При сушке растительного сырья, в частности такого, в котором не допускается механическое воздействие, основной задачей является интенсификация тепломассообмена между сушильным агентом и продуктом. В ОАО «ГТКБ Пластмаш» разработали метод конвективной сушки с циклическим чередованием создания вакуума и повышенного давления в камере сушки.

Сублимационная сушка (лиофилизация) по сравнению с вакуумным обезвоживанием позволяет получить растительное сырье более высокого качества, но при этом стоимость такой технологии выше, что обусловлено более высокими энергетическими затратами на привод вакуумного насоса. Фактически сублимационную сушку можно считать одной из наиболее эффективных в плане сохранения нативных характеристик высушиваемого растительного сырья. В силу этого лиофилизация нашла широкое применение не только в пищевой промышленности, но и в фармакологии и отраслях прикладной биотехнологии, когда предъявляются высокие требования к качеству растительного сырья.

Сублимационная сушка может осуществляться с применением самозамораживания при понижении давления в камере ниже тройной точки воды либо с предварительным замораживанием в скороморозильных аппаратах. Первый способ обычно применяется для жидкого сырья, второй – для твердого растительного сырья. Степень сохранности качественных показателей сырья определяется как параметрами лиофилизации, так и условиями замораживания. При этом роль последнего фактора является определяющей.

Теплообмен, наблюдающийся на границе *замораживаемый продукт – теплоотводящая среда* в скороморозильных аппаратах, является высокоинтенсивным, что обуславливает быстрое изменение температурных полей и движения фронта кристаллической фазы. В продукте при этом образуется мелкокристаллическая структура льда и равномерное распределение по объему всех его компонентов. Таким образом, при использовании предварительного замораживания лучше сохраняется структура растительного сырья и соответственно качество высушенного материала.

Процесс сублимационной сушки можно охарактеризовать 2 этапами: на первом этапе в условиях температуры и давления ниже криогидратной точки происходит сублимация кристаллизованной влаги в окружающую среду, при этом из растительного сырья удаляется большая часть влаги – порядка 80÷90%. На втором этапе к растительному сырью подводят тепло (как правило, до температуры 40÷60 °С), удаляя тем самым оставшуюся часть влаги.

Одним из препятствий к широкому внедрению сублимационной сушки в технологиях продовольственного питания является высокая стоимость. Для решения этой проблемы существует несколько подходов: использование теплоты фазового перехода между сублимируемым и замороженным растительным сырьем, применение энерго-сберегающего оборудования.

Одним из основных факторов, оказывающих влияние на технико-экономические показатели сублимационной сушки, является продолжительность обезвоживания. Для определения данного показателя в настоящее время разработано несколько методик расчета.

Продолжительность сублимационной сушки кускового растительного сырья размером 10 мм составляет в среднем 8 часов. Для цельных плодов и ягод это время может составлять более 15 часов. Существуют непрерывные установки для сублимационной сушки тонкого слоя, которые позволяют получить сухой продукт за 1-2 часа. Таким

образом, более целесообразно сушить мелкоизмельченные плоды и ягоды с целью сокращения продолжительности обезвоживания.

Технологическая схема производства сушеных ягод представлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Технологическая схема производства сушеных ягод

Технологическая схема производства сушеных ягод включает в себя следующие этапы:

- заготовка и первичное хранение сырья;
- транспортировка сырья;
- инспекция;
- сортировка, калибровка;
- удаление плодоножек;
- мойка и удаление воды на поверхности сырья;
- сушка;
- упаковка;
- хранение.

Сбор и первичная упаковка ягод осуществляются на заготовительных пунктах и предприятиях сельскохозяйственной промышленности. Зона выращивания и сбора сырья должна располагаться в радиусе нескольких километров от заготовительного пункта. Сбор ягод предпочтительнее осуществлять в сухую погоду для исключения попадания влаги на продукт, что может привести к его порче. Исключения составляют случаи, когда имеется возможность доставлять собранное сырье непосредственно на перерабатывающее предприятие в течение нескольких часов после сбора.

Транспортировку дикорастущего сырья осуществляют в специальной воздухопроницаемой таре стандартных размеров. Для транспортировки заготовленных ягод применяют деревянные ящики, корзины, решета, плетеные коробки вместимостью от 4 до 6 кг. Транспортировка заготовленных ягод должна производиться в закрытых

фургонах с системой охлаждения. Перед помещением заготовленных ягод в перевозящий транспорт тару дезинфицируют 0,1%-м раствором хлорной извести. Поступающее на перерабатывающее предприятие растительное сырье необходимо сразу направлять на переработку. В случае, если запасы растительного сырья превышают производственную мощность используемого технологического оборудования, его подвергают хранению. Условия и продолжительность хранения растительного сырья представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Условия и продолжительность хранения ягод

Вид ягоды	Продолжительность хранения, суток	
	16-18°C	0-2 °C
Черная смородина	Не более 2	Не более 7
Облепиха	Не более 2,5	Не более 8
Жимолость	Не более 2	Не более 8
Ирга	Не более 3	Не более 9
Брусника	Не более 2	Не более 8

В местах переработки растительное сырье подвергают инспекции на ленточном конвейере, в ходе которой отбраковывают ягоды, у которых наблюдаются механические повреждения, признаки поражения болезнями и вредителями, наличие посторонних примесей и другие признаки, не соответствующие требованиям производства.

После инспекции растительное сырье поступает на сортировку и калибровку, которая осуществляется на решетчатых вибрационных столах с диаметром ячеек для соответствующих размеров ягод. В процессе калибровки осуществляется разделение ягод по размеру. Удаление плодоножек у растительного сырья осуществляется в машинах барабанного типа либо на решетчатых вибрационных столах.

Ягоды подвергают процессу мойки в моечной машине с вертикальным шнековым элеватором и ополаскивающим устройстве или в вибромойке, далее происходит удаление воды с сырья в вентиляторных машинах.

Затем ягоды направляются на сушку: конвективную, вакуумную либо сублимационную.

В случае конвективной сушки ягоды находятся на сетчатой решетке, через которую продувается воздух со скоростью 4 м/с и температурой 50 °C. Нагрев воздуха осуществляется путем работы теплонасосной установки. Продолжительность конвективной сушки со-

ставляет: для жимолости – 11 ч, для ирги – 8, для брусники – 9, для черной смородины – 20, для облепихи – 14 ч.

В случае вакуумной сушки растительное сырье обезвоживается на специальных поддонах. Остаточное давление при этом должно составлять 6-7 кПа, температура нагрева для жимолости, брусники и черной смородины должна составлять 50 °С, а для ирги и облепихи – 40 °С. При этом плотность теплового потока рекомендуется устанавливать в следующих значениях: для жимолости, ирги и облепихи – 7,5 кВт/м<sup>2</sup>, для брусники и черной смородины – 5,5 кВт/м<sup>2</sup>. Время вакуумной сушки ягод составляет 7-9 ч.

В случае, если используется сублимационная сушка, то ягоды после мойки и удаления воды на поверхности направляются на замораживание во флюидизационный скороморозильный аппарат при температуре воздуха минус 60 °С. После замораживания ягоды направляются на сублимационную сушку. При этом лампы нагрева должны включаться через 3-5 часов после начала процесса обезвоживания. Рекомендуемая температура нагрева составляет 40 °С. Время сублимационной сушки для ягод 6-8 часов.

После обезвоживания ягоды упаковываются в потребительскую тару, в качестве которой выступают полиэтиленовые мешки или коробки. Сухая ягода может также направляться на дальнейшую переработку (например, растирание в порошок) в случае, если она будет использоваться в качестве добавок к другим продуктам.

Хранение сухих ягод осуществляется в воздухонепроницаемой таре при температуре 18 °С вдали от источников сильного нагрева или охлаждения. Допускаются колебания температуры в пределах ±5 °С.

Срок хранения сухих ягод при температуре 18±5 °С и относительной влажности воздуха не более 75% – не более 14 мес. со дня выработки.

### *Контрольные вопросы*

1. На чем основан метод сушки консервированием?
2. Чем объясняется выбор конкретного метода обезвоживания растительного сырья?
3. Во сколько раз возрастает содержание сухих веществ при сушке плодов и ягод?
4. В чем заключается преимущество сушки с применением теплового насоса?
5. Какие этапы включает в себя технологический процесс производства сушеных ягод?

## Глава 4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

### 4.1. Классификация сушилок

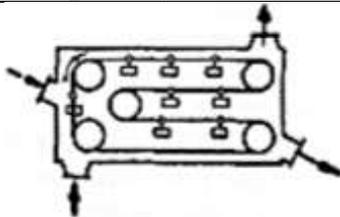
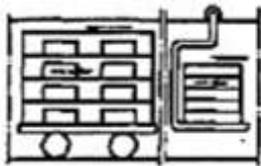
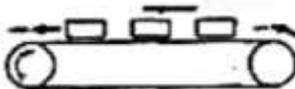
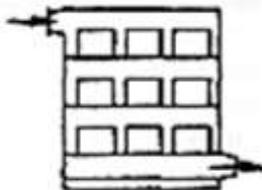
В пищевой промышленности нашли широкое применение разнообразные сушильные установки, так же, как и разнообразное растительное сырье, которые подвергаются процессу сушки. Классификация сушильных установок произведена на основе различных конструктивных признаков и представлена в таблице 4.1.

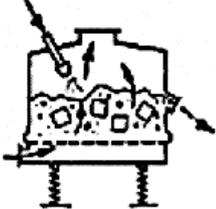
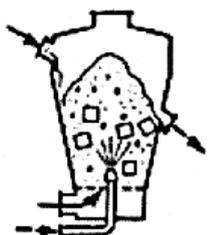
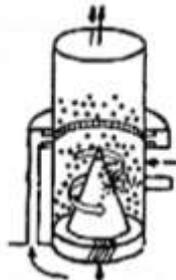
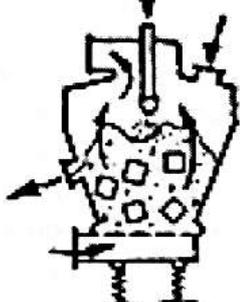
Таблица 4.1 – Классификация сушильных установок

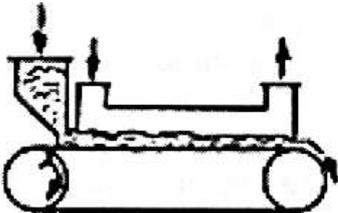
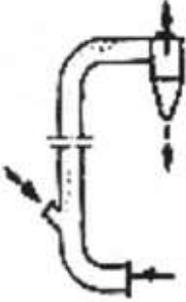
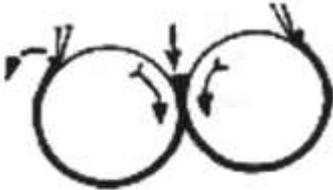
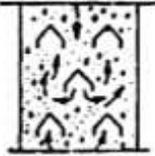
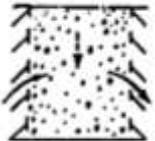
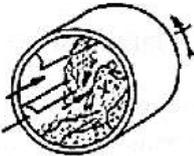
Классифицирующий признак сушилок	Тип сушильных установок
1. Режим работы	Периодического и непрерывного действия
2. Способ подвода тепла	Кондуктивные, радиационные, конвективные и высокочастотные
3. Род сушильного агента	Воздушные, с применением топочных газов и перегретого пара
4. Давление в сушильной камере	Атмосферные, вакуумные, глубоковакуумные
5. Вариант сушильного процесса	С нормальным процессом, с подогревом внутри камеры и промежуточным подогревом
6. Циркуляция сушильного агента	С естественной и принудительной циркуляцией
7. Конструкция	Камерные, шахтные, ленточные, барабанные, трубчатые, коридорные, распылительные и др.
8. Направление потока материала и сушильного агента	Противоточные, прямоточные, с перекрестным потоком

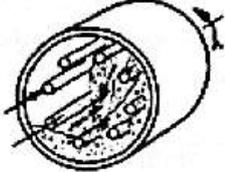
В таблице 4.2 представлены конструкции сушильных установок для сушки пищевых продуктов с визуальным изображением.

Таблица 4.2 – Конструкции сушильных установок с визуальным изображением

Сушильные установки		Изображение
1		2
Установки для сушки кускового и зернистого сырья в плотном и разрыхленном слое (кусковое (штучное) сырье; сушка в плотном слое)		
Туннельные	Конвейерные	
	Вагонеточные (с передвижными вагонетками)	
	Ленточные	
Камерные	Шкафные	
	Вагонеточные (с передвижными вагонетками)	
Установки для сушки жидкого сырья (суспензий, растворов и паст)		
С центробежными дисковыми или форсуночными распылителями		
С пневматическими форсунками		

1	2
<p>С виброаэрокипящим слоем (сушка на слое высушенного или инертного сырья). Сушка может сочетаться с гранулированием</p>	
<p>С кипящим слоем (сушка на слое высушенного или инертного сырья)</p>	
<p>Конические с фонтанирующим слоем (сушка на высушенном сырье или инертном носителе)</p>	
<p>Вихревые (сушка на высушенном сырье или инертном носителе)</p>	
<p>Сушилки со встречно-закрученными потоками (сушка на высушенном сырье или инертном носителе)</p>	
<p>С виброаэрофонтанирующим слоем (сушка на высушенном сырье или инертном носителе)</p>	

1	2
Со вспененным слоем (вспенивание производится газом в питателе)	
Пневмосушка	
Пневмотрубы	
Вальцевые	
Сыпучее зернистое сырье. Сушка в плотном (движущемся) слое	
Шахтные	
Жалюзийные	
Шахтные с поворотными жалюзьями	
Сушка в разрыхленном слое	
Барабанные	

1	2
Шнековые	
Трубчатые	

#### 4.2. Контактные сушилки

Контактные сушильные установки подразделяются на периодически и непрерывно действующие аппараты. Из периодически действующих сушильных установок получили наибольшее распространение вакуум-сушильные шкафы и гребковые вакуум-сушилки, а из непрерывно-действующих – двухвальцовые атмосферные и вакуумные сушильные аппараты, а также одновальцовые формующие сушильные установки (одновальцовые формующие сушильные установки являются первой ступенью вальцово-ленточных сушильных установок).

Высушивание растительного сырья при пониженном (по сравнению с атмосферным) давлении в замкнутом пространстве (под вакуумом) используется в тех случаях, когда сырье чувствительно к высоким температурным режимам или подвергается окислению; применяется оно также для увеличения скорости процесса сушки растительного сырья. При сушке сырья под вакуумом возможна рекуперация летучих растворителей путем конденсации их паров и последующего использования конденсата в технологическом процессе сушки.

*Вакуум-сушильные шкафы.* Такие сушильные аппараты используются давно, однако в последнее время вытесняются более высокопроизводительными сушильными установками непрерывного действия и сохранились только в малотоннажных технологических процессах сушки растительного сырья.

Вакуум-сушильный шкаф состоит из герметично закрывающейся сушильной камеры цилиндрической или прямоугольной формы, снабженной рядом горизонтальных полых греющих плит, внутрь ко-

торых подводится пар или горячая вода. Противни с высушиваемым сырьем помещают на греющие плиты сушильной камеры. Пары влаги (из растительного сырья) и воздух, поступающий через неплотности, отводятся из сушильной камеры в конденсатор, из которого воздух откачивается вакуум-насосом.

В сушильных аппаратах с барометрическим конденсатором греющий водяной пар подается в верхнюю часть сушильного шкафа, конденсат стекает через конденсатоотводчик и направляется в сборник, откуда по мере заполнения перекачивается в котельную, где используется для питания паровых котлов. Испарившаяся из растительного сырья влага частично конденсируется внутри сушильного шкафа, конденсат стекает по внутренним стенкам и отводится после окончания процесса сушки сырья. Основное количество паров направляется в барометрический конденсатор, в верхнюю часть которого подается охлаждающая вода. Конденсат вместе с охлаждающей водой стекает по барометрической трубе в сборник и оттуда в канализацию. Несконденсировавшиеся газы (воздух) проходят брызгоуловитель, спускная линия от которого подведена к барометрической трубе, а освобожденный от брызг воздух откачивается вакуум-насосом.

Вакуум-сушильный шкаф сушильной установки для сушки растительного сырья показан на рисунке 4.1. Чугунный цилиндрический корпус 1 состоит из двух половин, скрепленных между собой болтами. Внутри сушильного шкафа установлены четыре вертикальные паровые коллектора, два из которых 2, расположенные с одной стороны сушильного шкафа, служат для подачи греющего водяного пара, а два других 3, помещающиеся на другой стороне сушильного шкафа, предназначены для отвода конденсата греющего водяного пара. Полые греющие плиты 4 имеют внутри ряд перегородок. Греющий водяной пар проходит внутри плит длинный извилистый путь, что способствует равномерному обогреву. Плиты поддерживаются вертикальными стойками 5. Пары влаги уходят через штуцер 6, а конденсат стекает через штуцер 7. С торцов сушильный шкаф оборудован крышками 8. Для сообщения с атмосферой служит кран 9. Крышки шкафа закрываются откидными болтами, которые входят в специальные вырезы, имеющиеся в крышке сушильной установки, и прижимают ее к наружным фланцам сушильного шкафа посредством резиновых прокладок. Для уменьшения потерь теплоты в окружаю-

щее пространство корпус и крышки сушильного шкафа покрывают слоем изоляции толщиной от 40 до 50 мм.

Перед загрузкой сушильного шкафа необходимо щеткой тщательно очистить поверхность греющих плит. Через каждые 8-10 операций сушки, а также при переходе с одного растительного сырья на другой, плиты моют горячей водой. Водяной пар в греющие плиты надо пускать постепенно, отводя сначала образовавшийся конденсат через обводную линию конденсатоотводчика (при быстром пуске водяного пара может быть разорвана греющая плита). После спуска всего конденсата из греющих плит сушильного шкафа (что осуществляется при помощи контрольного вентиля у конденсатоотводчика) открывают полностью паровой регулирующий вентиль, закрывают вентиль на обводной линии конденсатоотводчика и начинают загружать влажное растительное сырье. В первую очередь загружают верхние плиты сушильного шкафа. Перед тем как закрыть сушильный шкаф, смазывают резиновую прокладку графитовым маслом. Закрыв сушильный шкаф и повернув крышки к корпусу болтами, закрывают воздушный кран на крышке, открывают задвижку на вакуумной линии и по показаниям вакуумметра наблюдают за увеличением разрежения в камере сушильного шкафа. Когда разрежение установится на заданном уровне (не ниже 66,6 кПа, т.е. 500 мм рт. ст.), пуск сушильной установки можно считать законченным.

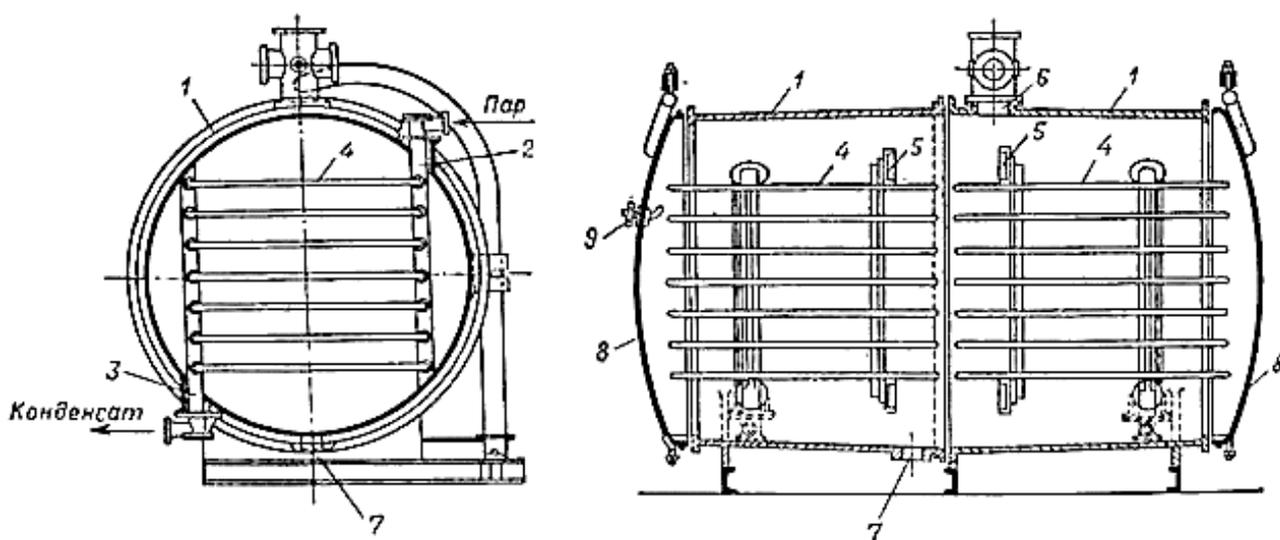


Рисунок 4.1 – Вакуум-сушильный шкаф:

- 1 – корпус; 2, 3 – паровые коллекторы; 4 – греющие плиты;  
5 – стойки; 6, 7 – штуцеры; 8 – крышка; 9 – воздушный кран

В течение процесса сушки растительного сырья необходимо следить за тем, чтобы температура греющих плит не превышала заданного параметра, установленного для загруженного сырья. Регулирование температуры достигается изменением давления греющего водяного пара, подаваемого в плиты сушильного шкафа. Во избежание разрыва плит давление греющего пара не должно превышать 0,3 МПа, т.е. 3 кгс/см<sup>2</sup> (по манометру).

Разрежение в сушильном шкафу должно быть как можно выше, так как с его увеличением скорость процесса сушки растительного сырья возрастает. В случае падения разрежения необходимо тщательно проверить герметичность сушильного шкафа и вакуумной линии и принять меры к устранению неплотностей сушильной установки.

Температура воды в барометрической трубе находится в пределах от 30 до 40 °С. При повышении или понижении температуры необходимо отрегулировать подачу воды в конденсатор при помощи вентиля на водопроводной линии.

Необходимо следить за состоянием высушиваемого растительного сырья во время процесса сушки, чтобы оно не подгорало. Для этого сушильный шкаф периодически открывают. Если на высушиваемом сырье образуется плотная корка, то для ускорения процесса сушки его надо перемешивать или переворачивать на противнях.

Конец процесса сушки обычно устанавливают, определяя влажность сырья на ощупь. Наиболее точным и удобным способом определения конца сушки материала в вакуум-сушильном шкафу является наблюдение за температурой самого растительного сырья при помощи небольшой термодпары, введенной в слой высушиваемого сырья, и сравнение этой температуры с температурой водяного пара в плитах (по давлению греющего водяного пара). К концу процесса сушки температура сушеного сырья приближается к температуре водяного пара, а при полном его высушивании остается постоянной.

По окончании процесса сушки растительного сырья закрывают вентиль на линии, подводящей греющий водяной пар к плитам, отключают сушильный шкаф от вакуумной линии и впускают в него воздух через кран в крышке, открывают крышку и отводят ее в сторону. Противни с сырьем выгружают из сушильного шкафа вручную, начиная с нижней плиты, и укладывают на имеющуюся вагонетку. После охлаждения ссыпают высушенное растительное сырье в тару для сухого сырья.

Процесс сушки в вакуум-сушильных шкафах продолжается десятки часов. Тепловой КПД в среднем равен 80% (теплота, расходуемая на подогрев растительного сырья и оборудования, считается полезно затраченной на данный процесс). Количество влаги, удаляемое с 1 м<sup>2</sup> греющей поверхности (напряжение сушилки по выпаренной влаге в сырье), в зависимости от физико-химических свойств растительного сырья составляет от 0,5 до 1,5 кг/ч.

Сушильные установки с поверхностным конденсатором применяются преимущественно при высушивании от летучих растворителей с целью их последующего возвращения в производство. Преимущества вакуум-сушильных шкафов по сравнению с другими типами сушильных установок: 1) возможность одновременной сушки нескольких видов растительного сырья, причем количество каждого сырья может быть весьма небольшим; 2) небольшой унос высушиваемого сырья с отходящими из сушильной установки влагой и воздухом; 3) сравнительная легкость чистки рабочей камеры сушильной установки при переходе с одного вида сырья на другой.

К недостаткам вакуум-сушильных шкафов можно отнести следующие:

- 1) периодичность работы и в связи с этим большую затрату времени на загрузку и выгрузку растительного сырья;
- 2) низкую производительность сушильной установки;
- 3) необходимость применения ручного труда для обслуживания аппарата.

*Гребковая вакуум-сушилка.* Сушилка (рис. 4.2) имеет стальной барабан 1 (толщина стенок 16 мм), снабженный паровой рубашкой (толщина стальных стенок 9 мм). Расстояние между стенками барабана и рубашки 20 мм. Снаружи паровая рубашка покрыта слоем изоляции толщиной 40 мм. Греющий водяной пар поступает в рубашку сверху через штуцеры 5. Конденсат удаляется снизу через штуцеры 6. Для выпуска воздуха из рубашки при прогреве ее паром служат два отверстия с кранами.

В торцевых стенках барабана устроены лазы с крышками, через которые можно попасть в сушильную установку во время технического обслуживания и ремонта, а также подвесить на цепях вал мешалки при разборке сушильного аппарата.

Высушиваемое растительное сырье загружают в рабочую камеру сушильной установки через верхний люк 4 и плотно закрывают ее крышкой, висящей на кронштейне. Пары влаги удаляются по трубе,

подведенной сбоку к загрузочному штуцеру. Высушенное растительное сырье выгружают через нижний люк 8, который закрывают специальным клапаном 7, расположенным заподлицо с внутренней поверхностью барабана.

Торцевые стенки барабана имеют один или два смотровых люка.

Вал 2 пропущен сквозь отверстия с сальниками в торцевых стенках барабана. Со стороны привода вал вращается в подшипнике, расположенном на стойке. С противоположной стороны барабана подшипник устанавливается в торцевой стенке. На валу насажены 42-43 чугунные лопасти 3. Частота вращения вала 8 об/мин. Вращение вала передается от электродвигателя через червячную передачу и две цилиндрические шестерни. Между лопастями мешалки свободно положены четыре стальные трубы (скалки), закрытые с концов. Трубы при вращении мешалки свободно перекатываются, способствуя лучшему перемешиванию и измельчению высушиваемого растительного сырья.

Лопастями расположены с некоторым наклоном по отношению к оси вала. В результате, при вращении вала в одну сторону, высушиваемое растительное сырье передвигается в барабане от середины к торцевым стенкам, а при вращении в другую сторону – в обратном направлении, что целесообразно как в процессе сушки, так и при разгрузке высушенного сырья.

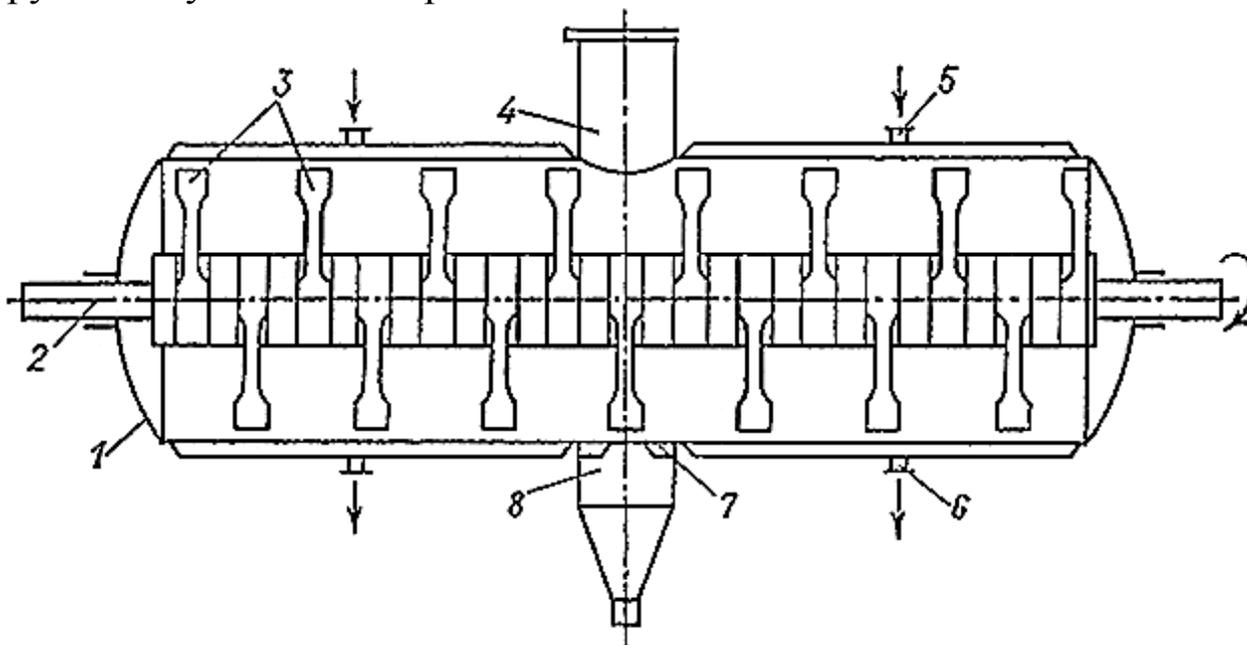


Рисунок 4.2 – Гребковая вакуум-сушильная установка:

- 1 – барабан с рубашкой; 2 – вал; 3 – лопасти; 4 – загрузочный люк;
- 5 – штуцеры для подачи греющего пара; 6 – штуцеры для стока конденсата;
- 7 – клапан; 8 – выгрузочный люк

Продолжительность вращения вала в одну сторону устанавливается автоматически с помощью пускового прибора. Вал вращается в течение 5 мин, затем следует остановка 20-25 с, после чего вал в течение 5 мин вращается в противоположную сторону, вновь останавливается и т.д.

Перед пуском сушильного аппарата, после длительного простоя, необходимо проверить герметичность всех частей данного аппарата. Для этого соединяют его с вакуумной линией и наблюдают по вакуумметру за разрежением, которое должно быть не менее 80 кПа, т.е. 600 мм рт.ст. Плотность отдельных соединений (фланцев, лазов и т.д.) проверяют на слух по отсутствию в них свиста воздуха. После проверки герметичности сушильного аппарата и устранения неплотностей начинают прогрев установки. Сначала спускают вакуум, закрыв вентиль на вакуумной линии, и с помощью воздушного крана соединяют установку с атмосферой. Далее открывают крышку загрузочного люка и крышки на трубках для выпуска воздуха из паровой рубашки, а также вентиль на обводной линии конденсатоотводчика. Затем постепенно открывают вентиль на паровой линии, ведущей в рубашку барабана, при открытых воздушках на рубашке. Воздушки надо закрыть, когда из них покажется водяной пар. Если при открывании пробного вентиля на обводной линии покажется водяной пар, вентиль закрывают и включают в работу конденсатоотводчик. Прогрев аппарата нужно вести при неподвижной мешалке, так как в холодном состоянии лопасти слишком близко подходят к стенкам барабана и могут их задеть. После прогрева барабана пускают мешалку и начинают загрузку растительного сырья, следя за тем, чтобы материал не попадал на резиновую прокладку загрузочного люка. Во время загрузки паровой вентиль должен быть немного открыт. По окончании загрузки люк закрывают и включают вакуум, предварительно пустив охлаждающую воду на конденсатор и открыв задвижку на линии от сушильной установки к мокрой ловушке. Вакуум достаточен, если стрелка вакуумметра показывает от 650 до 700 мм рт. ст. (86,6-93,3 кПа). При вакууме менее 66,6 кПа, т.е. 500 мм рт. ст., необходимо найти и устранить неплотности.

После включения вакуума давление водяного пара в рубашке доводят до заданного, и этот момент считают началом процесса сушки. В начале сушки в барабане слышится глухой звук от удара скалками по мягкой пасте. Постепенно при процессе сушки образуются комки. По мере их измельчения и дальнейшей сушки растительного

сырья звук от падения скалок становится более звонким, и по характеру этого звука можно судить об окончании сушильного процесса сырья.

В период образования комков двигатель сушильной установки работает с максимальной нагрузкой, поэтому во избежание перегорания предохранительных пробок следует на небольшое время выключить мешалку. Температура выходящей из барометрического конденсатора воды должна быть равна 30-35 °С. Воду в мокрую ловушку надо наливать на 2-3 см выше дырчатого днища, по мере насыщения пылью спускать в отстойник и заменять свежей.

Во время процесса сушки может произойти поломка лопастей. Чаще всего это происходит вследствие попадания в установку посторонних металлических предметов (болтов, гаек и т.д.) вместе с высушиваемым растительным сырьем. Посторонние предметы заклиниваются между стенкой барабана и лопастью, и хрупкая чугунная лопасть, несмотря на наличие предохранительных шпилек в приводе, иногда ломается. В этом случае надо остановить мешалку, выключить водяной пар, разгрузить сушильную камеру и поставить ее на ремонт.

К концу сушки отбирают пробу высушенного растительного сырья. С этой целью останавливают мешалку аппарата, спускают вакуум и открывают загрузочный люк. Влажность пробы определяют в производственной лаборатории.

Для выгрузки высушенного растительного сырья необходимо открыть загрузочный люк и плотно прикрепить к нему воронку с рукавом, через который сырье будет сыпаться в тару. По окончании выгрузки выключают мешалку, снимают воронку, щеткой очищают от пыли отверстие люка, закрывают внутренний клапан и приворачивают нижнюю наружную крышку.

При переходе с одного растительного сырья на другое его необходимо тщательно удалить из сушилки и трубопроводов, а также из мокрой ловушки удалить остатки сушеного сырья. Последнее достигается при продувании водяным паром линии, идущей из сушилки к мокрой ловушке. Осевшее в трубопроводе сушеное сырье при этом увлажняется и сползает по стенкам трубы в сушильную камеру установки. Затем сушильный аппарат тщательно моют, промывают трубопроводы и ловушку. Промывные воды необходимо вернуть в производство.

На рисунке 4.3 представлена вакуумная сушильная установка для обезвоживания растительного сырья [9].

Нагревательные плиты заполняются высушиваемым продуктом и размещаются в стеллажной тележке, установленной в сушильной камере. Далее включают кабельные нагревательные элементы и контрольно-измерительный комплекс. Для достижения установленного режима сушки последовательно включают водяной насос, который обеспечивает циркуляцию воды через охладитель, конденсатор, вакуумный насос с охлаждением и вентиляторы. Нагревательные плиты обеспечивают равномерный нагрев продукта за счет системы регулирования напряжения кабельных нагревательных элементов. Образующаяся на конденсаторе влага сливается в сборник конденсата через вакуумный шланг.

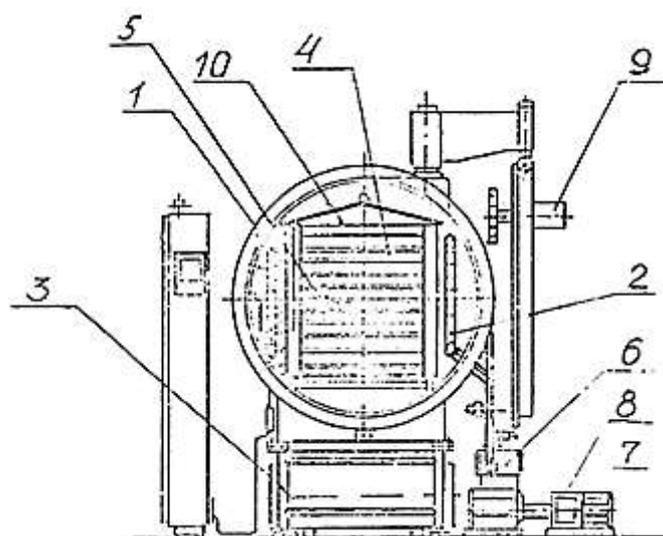


Рисунок 4.3 – Вакуумная сушильная установка для обезвоживания растительного сырья:

- 1 – сушильная камера; 2 – конденсатор; 3 – сборник конденсата;
- 4 – нагревательные плиты; 5 – кабельные нагревательные элементы;
- 6 – вакуумный насос; 7 – водяной насос; 8 – охладитель; 9 – вентилятор;
- 10 – стеллажная тележка

Известен способ вакуумной сушки ягод, который заключается в том, что сушку осуществляют в 2 этапа: вначале обезвоживание измельченных ягод осуществляется при давлении в камере  $8\div 12$  кПа и температуре  $60\div 65$  °С, затем давление понижают до  $3\div 4$  кПа, а температуру повышают до  $70\div 80$  °С. Величину тепловой нагрузки устанавливают в диапазоне от 3,85 до 7,35 кВт/м<sup>2</sup>, сушка проводится до достижения влажности продукта  $2\div 4\%$ . Продолжительность обезвоживания ягод при данных параметрах составляет от 4 до 6 часов.

В случае, когда необходимо обезвоживать пореобразную массу для получения ягодных порошков, эффективной является вакуум-индукционная сушилка (рис. 4.4) [9].

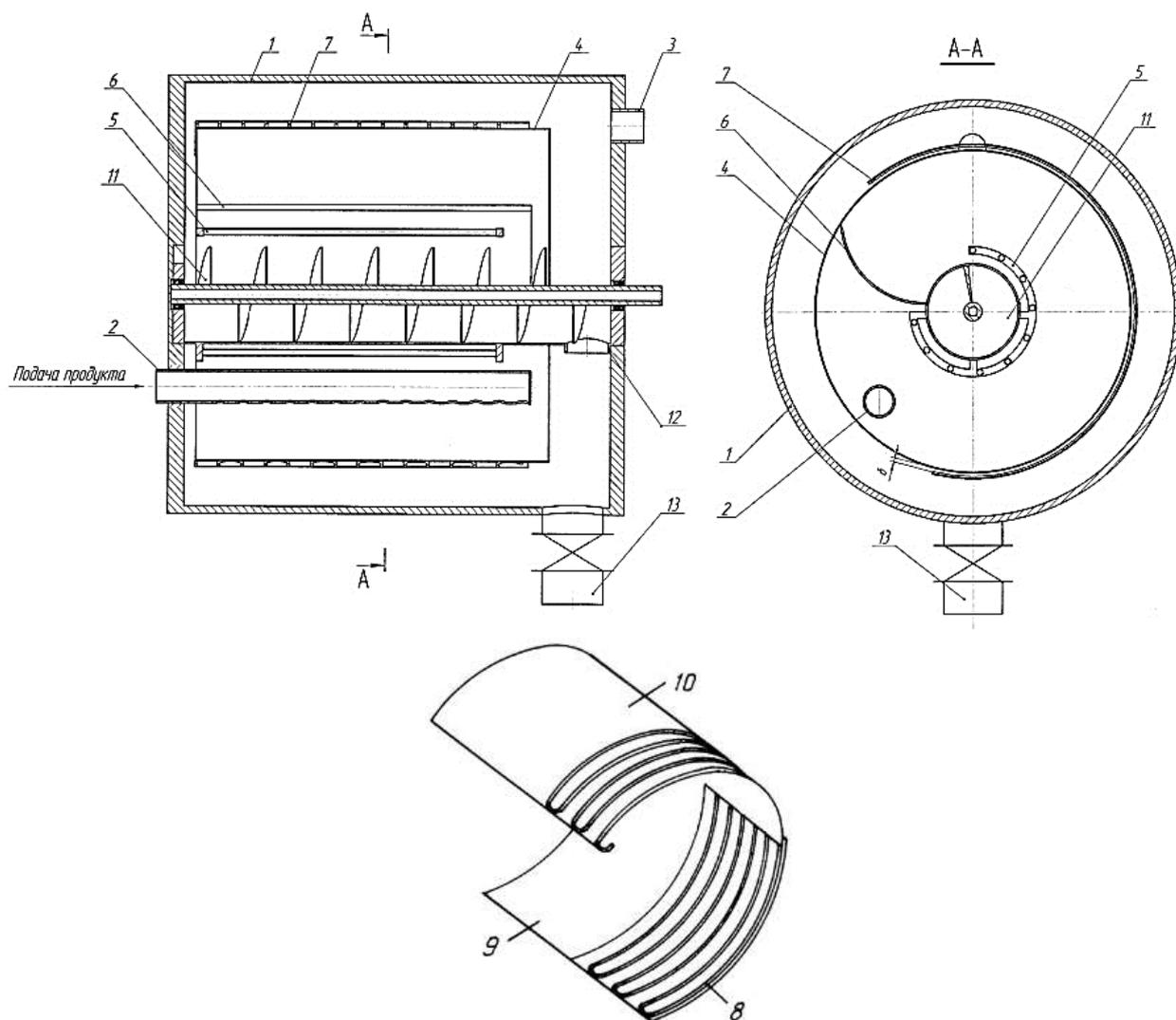


Рисунок 4.4 – Вакуум-индукционная сушилка для получения порошков из ягод и другого растительного сырья:

- 1 – герметичный корпус; 2 – патрубок для подвода продукта; 3 – патрубок отвода паров; 4 – валка; 5 – ИК-излучатели; 6 – нож; 7 – индуктор; 8 – магнитопровод; 9 – внутренняя пропускающая поверхность; 10 – наружная диэлектрическая поверхность; 11 – питатель со шнеком; 12 – патрубок для вывода продукта; 13 – шлюз для удаления продукта

В корпус через патрубок подается пореобразная ягодная масса или другой измельченный растительный продукт. Сырье при этом равномерно распределяется по внутренней поверхности валка за счет наличия в патрубке выходных отверстий, которые расширяются по его длине. Валок нагревается индуктором, направляющим на него

электромагнитное излучение высокой частоты, и передает тепло продукту. С внутренней стороны вала сырья нагревается за счет инфракрасного излучения. Переместившись по длине вала, продукт срезается ножом и направляется в питательный шнек, после чего выводится из аппарата в виде сухого порошка через шлюз.

Таким образом, в данной установке реализован комбинированный способ подвода теплоты при вакуумной сушке ягод – кондукционный и ИК-излучением.

На рисунке 4.5 представлена схема вакуумной сушильной установки.

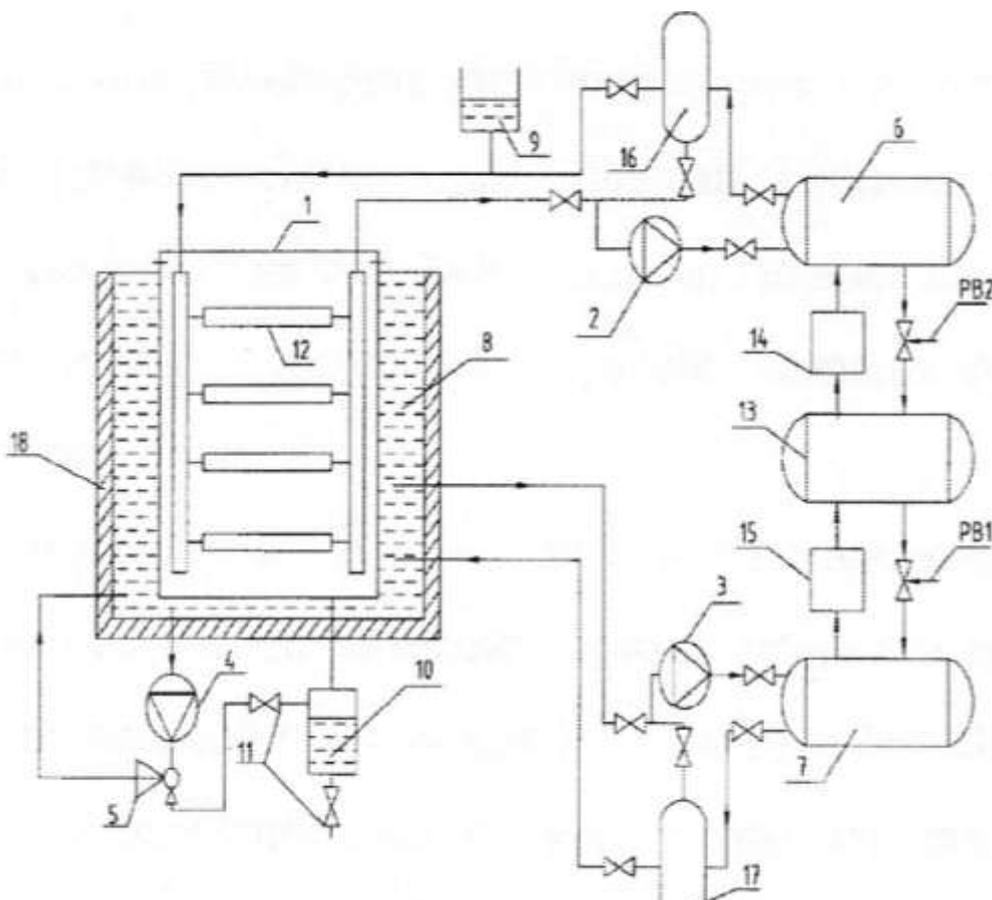


Рисунок 4.5 – Вакуумная сушильная установка:

- 1 – камера сушки (конденсатор); 2, 3, 4 – водяной насос; 5 – трехходовой вентиль; 6 – испаритель; 7 – конденсатор; 8 – хладоноситель;
- 9 – бак-расширитель; 10 – эжектор; 11 – запорная арматура;
- 12 – обогревательные полки; 13 – промежуточный конденсатор-испаритель;
- 14, 15 – обратные каналы связи; 16 – бак-аккумулятор; 17 – ресивер;
- 18 – резервуар

С целью энергосбережения тепло, отводимое от конденсатора вакуумных сушильных установок, может быть направлено на нагрев высушиваемого продукта.

*Двухвальцовая атмосферная сушилка.* Двухвальцовая сушилка с досушивателями изображена на рисунке 4.6. В кожухе 1 расположены вальцы 2 и 3, медленно вращающиеся (2-10 об/мин) навстречу друг другу. Сверху между вальцами непрерывно подается высушиваемый материал. Греющий пар поступает через полу цапфу внутрь каждого из вальцов, конденсат отводится через сифонную трубку 4. Ввод пара и вывод конденсата производятся со стороны, противоположной приводу 5. Вальцы могут также обогреваться горячей водой или высокотемпературными органическими теплоносителями.

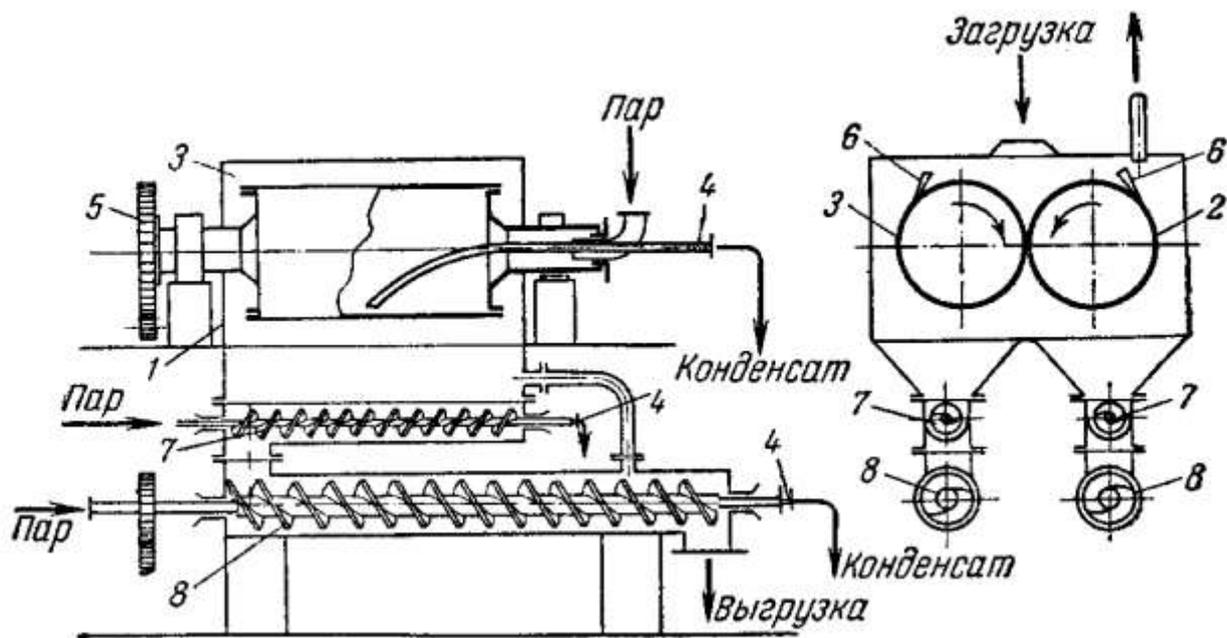


Рисунок 4.6 – Двухвальцовая сушилка с досушивателями:

1 – кожух; 2 – ведомый полый валец на подвижных подшипниках; 3 – ведущий полый валец; 4 – сифонные трубки; 5 – привод; 6 – ножи; 7 – верхние досушиватели; 8 – нижние досушиватели

Растительное сырье покрывает поверхность вальцов тонкой пленкой. Толщина пленки определяется величиной зазора между вальцами, которая обычно не превышает 0,5-1 мм и регулируется путем перемещения ведомого вальца 2. Растительное сырье высушивается в течение неполного оборота вальцов и снимается ножами 6, расположенными вдоль образующей каждого вальца. Досушка сырья проводится в горизонтальных лотках с паровым обогревом (досушивателях), в которых вращаются валы с гребками.

Перед пуском сушилки убеждаются в отсутствии посторонних предметов между вальцами и проверяют ширину зазора. Затем пускают вальцы, проверяют правильность установки ножей, приводят в действие обе пары досушивателей, включают вентилятор и начинают

разогреть вальцы, постепенно пуская в них пар, и в течение 1 ч доводят давление до заданного. Одновременно пускают пар в досушиватели. Затем подают воду или раствор на орошение скруббера, включают в работу дозатор пастосмесителя и подают пасту на вальцы.

При необходимости остановки сушилки закрывают кран на линии подачи пасты на вальцы и останавливают дозатор. После того как закончится сушка находящегося между вальцами сырья, закрывают подачу пара на вальцы и останавливают их. Работа досушивателей продолжается еще 15-20 мин с момента остановки вальцов.

Для обеспечения нормальной работы установки необходимо следить за чистотой воздухопроводов, бункеров и стенок корыт досушивателей.

Влагосъем для таких сушилок составляет  $10-15 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

*Вакуумные кондуктивные сушилки.* На рисунке 4.7 представлена схема установки для сушки сырья в вакууме. Установка состоит из сушильной камеры с поверхностью нагрева, конденсатора (мокрого) и вакуум-насоса. Камера имеет герметически закрывающуюся дверь, однако все же неизбежен присос некоторого количества воздуха. Этот воздух отсасывается вакуум-насосом.

Процесс сушки под вакуумом имеет некоторые особенности. В первый период сушки (удаление свободной влаги) влага удаляется интенсивно. В этот период температура сырья близка к температуре кипения воды при давлении, установившемся в камере.

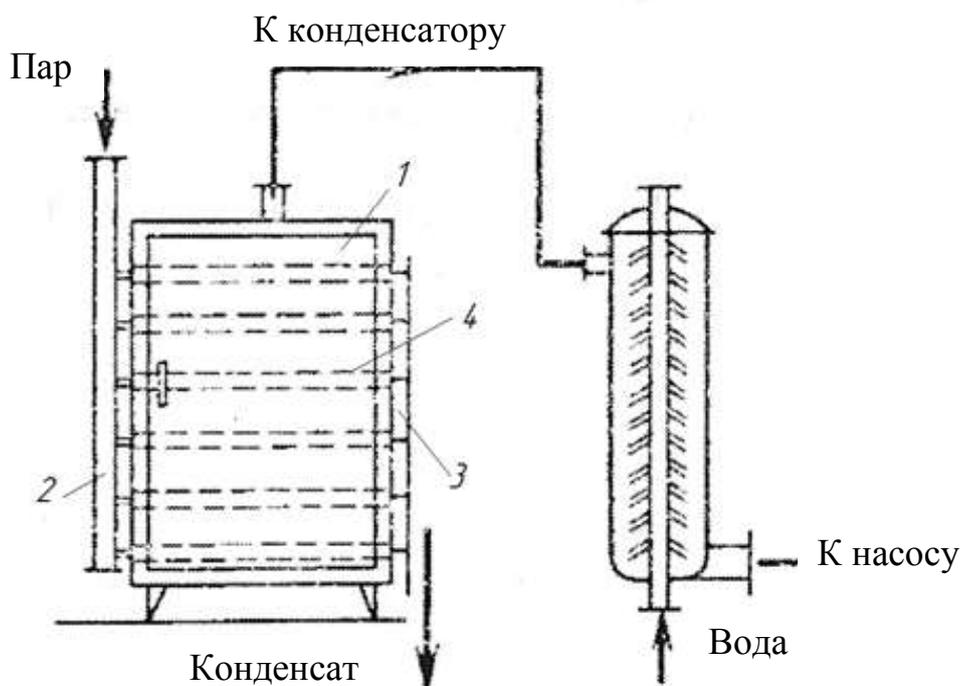


Рисунок 4.7– Схема установки для сушки в вакууме:  
1 – сушильная камера; 2, 3 – коллекторы; 4 – греющая плита

При сушке под вакуумом в порах растительного сырья замечается кипение влаги. Во второй период сушки (удаление связанной воды) температура резко повышается, приближаясь к температуре горячей поверхности кондуктивной сушилки. Поэтому сырье, которое плохо переносит высокую температуру, не может быть высушено до низкой влажности. Количество воздуха, которое должно быть удалено насосом, зависит от тщательности изготовления сушилки. В среднем на 1 кг влаги должно быть удалено около 1 м<sup>3</sup> воздуха (при давлении в сушильной камере).

### 4.3. Конвективные сушилки

В конвективных сушилках высушиваемое сырье непосредственно соприкасается с теплоносителем (горячим воздухом или топочными газами). В химической промышленности наибольшее распространение получили следующие конвективные сушилки: из периодически действующих – камерные циркуляционные, а также сушилки с кипящим (взвешенным, псевдооживленным) слоем; из непрерывно действующих – барабанные, гребковые, турбинные, ленточные, петлевые, пневматические, с кипящим слоем и распылительные.

*Вращающиеся барабанные агрегаты.* При первичной переработке растительного сырья часто применяются вращающиеся барабанные агрегаты, в которых обрабатываются как сыпучие, так и пастообразные материалы. Барабан вращается вокруг продольной оси и наклонен к горизонту. Введенный материал медленно продвигается к выходному отверстию. Теплота принимается материалом от омывающего теплоносителя, которому он отдает влагу, при этом температура теплоносителя понижается. Кроме вращающихся барабанных агрегатов с непрерывным потоком материала, имеются сушилки с периодическим режимом работы. Сушилки конструктивно просты, не требуют больших затрат на обслуживание.

В сушилках непрерывного действия теплоноситель и растительное сырье вводятся в агрегат в зависимости от потребности – прямотоком или противотоком. Барабанный агрегат, работающий в прямотоке, представлен на рисунке 4.8, работающий в противотоке – на рисунке 4.9.

Для получения теплоносителя может использоваться топка (рис. 4.8), паровой калорифер (рис. 4.9) или другой преобразователь энергии.

Дозатор, смонтированный с наклонным самотечным лотком, питает сушилку влажным растительным сырьем. В конце барабана сырье падает в неподвижную осадительную камеру, откуда затем удаляется. Для того чтобы улучшить теплоотдачу от теплоносителя к сырью, сушилку оборудуют насадками, которые измельчают сырье, распределяют его равномерно по сечению трубы, пересыпают поперек потока теплоносителя. Барабанные сушилки имеют диаметр 0,3-5,5 м и длину 2-35 м. Время пребывания сырья в сушилке колеблется от 10 до 150 мин. По окружности вращающегося барабана имеются два-три вращающихся в подшипниках кольца, сама труба лежит на поддерживающем (опорном) ролике. Так называемые направляющие, или прижимные, ролики, а также поддерживающие ролики, если они установлены несколько наклонно, предупреждают продольное скольжение трубы.

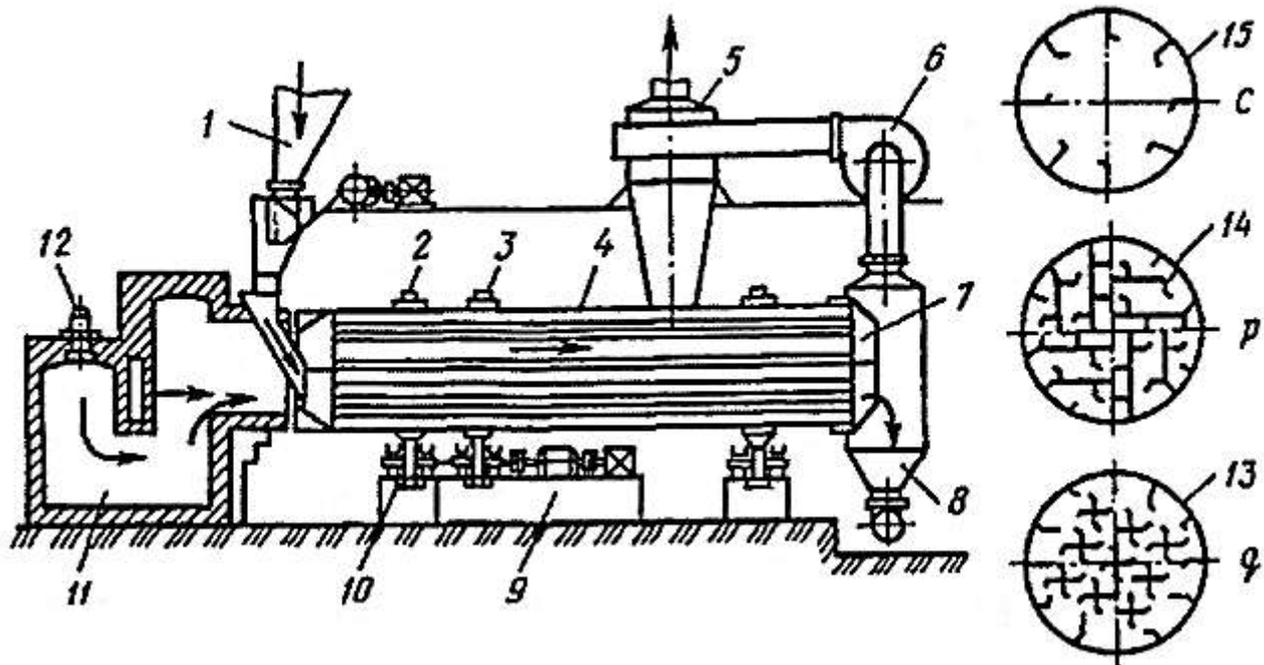


Рисунок 4.8 – Прямоточный барабанный сушильный агрегат:

- 1 – загрузочное устройство; 2 – вращающееся кольцо; 3 – трансмиссия; 4 – вращающийся барабан; 5 – циклон; 6 – вентилятор для отработанного теплоносителя; 7 – подпорное кольцо; 8 – осадительная камера; 9 – привод; 10 – опорный ролик; 11 – камера сгорания; 12 – горелка; 13 – насадка с подъемными лопатками; 14 и 15 – квадратная и крестообразная насадки соответственно

Частота вращения барабана 1-15 об/мин. Как правило, вентилятор транспортирует теплоноситель через вращающийся барабан в та-

ком режиме, что в нем поддерживается незначительный вакуум. В местах, где камеры примыкают к вращающемуся барабану (перед барабаном и за ним), система уплотнителей препятствует проникновению холодного воздуха и утечке сушеного сырья.

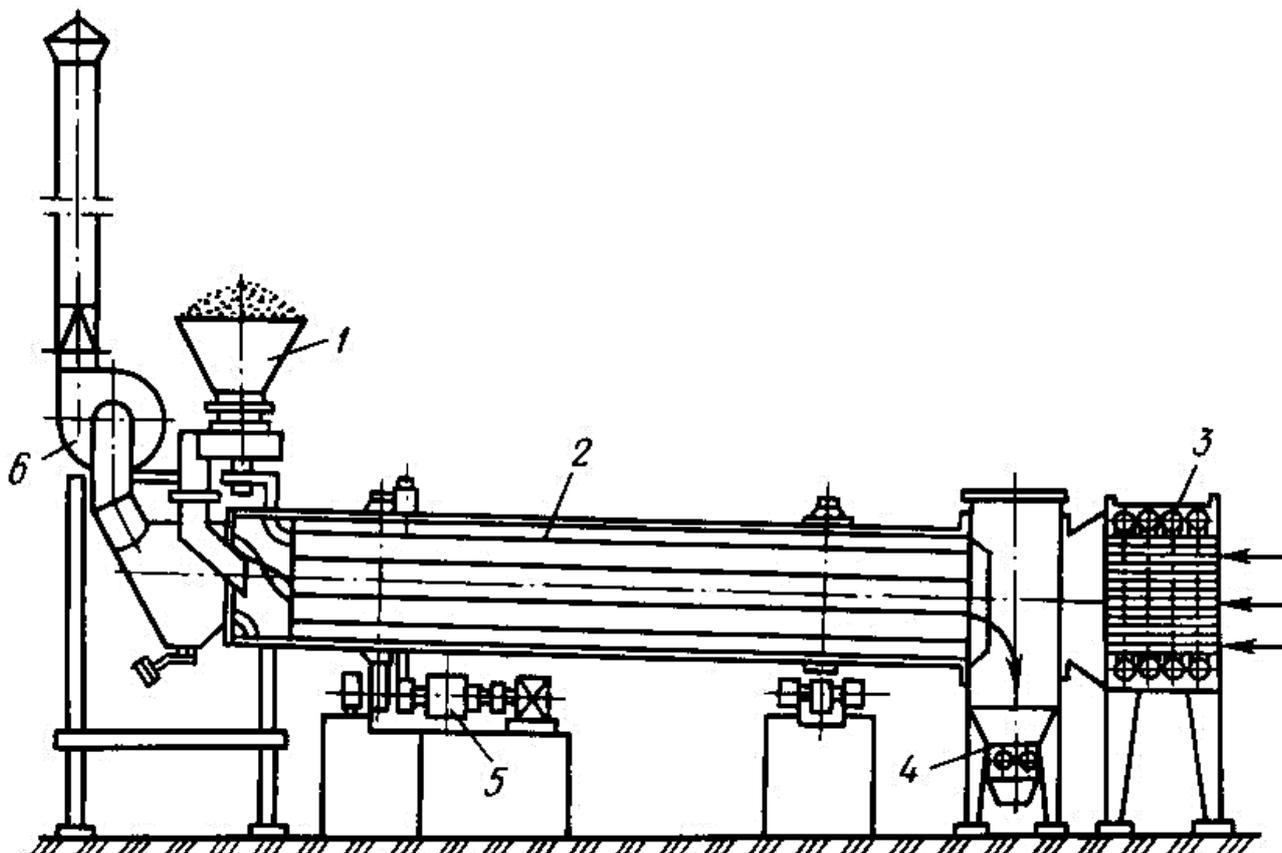


Рисунок 4.9 – Противоточный барабанный сушильный агрегат:  
1 – бункер с тарельчатым питателем; 2 – вращающийся барабан; 3 – паровой калорифер; 4 – осадительная камера; 5 – привод; 6 – вытяжной вентилятор

Для того чтобы потерь энергии было меньше, вращающийся барабан и находящиеся перед ним патрубки покрывают теплоизоляцией. Если сушимое сырье склонно к налипанию к горячим стенкам, входной желоб следует охладить водой или воздухом. В самой барабанной сушилке может быть приспособление для очистки стен от налипания.

Загрязненный отходящий теплоноситель очищается в циклоне, а в некоторых случаях – в мокром скруббере или тканевом фильтре.

Насадки для барабанной сушилки и необходимую футеровку можно изготовить из различных материалов. Венцы рабочих лопаток и поддерживающие ролики для небольших барабанов или в условиях

ненапряженного производства могут быть изготовлены из чугуна, а для больших вращающихся сушилок – из стального литья.

*Шахтные сушилки.* На рисунке 4.10 показана принципиальная схема шахтной сушилки непрерывного действия. Такие сушилки применяются для сушки сыпучего растительного сырья: зерна, жома, свекловичной стружки после механического обезвоживания, овощей и др. В этих сушилках движение сырья происходит за счет действия силы тяжести. Чтобы замедлить движение сушеного сырья, сушилки снабжают полками различной формы.

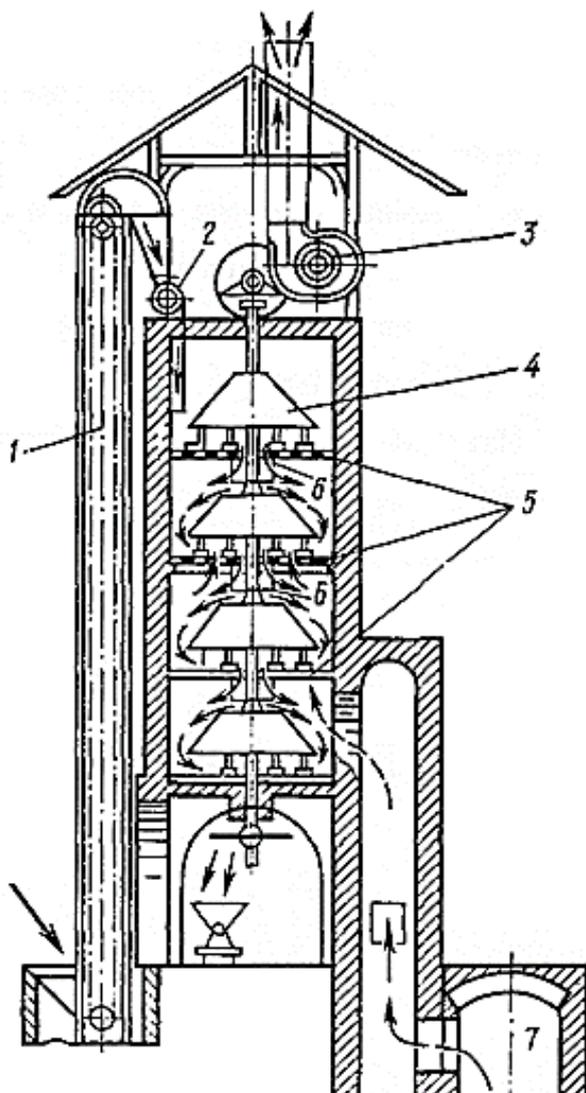


Рисунок 4.10 – Схема шахтной сушилки:

- 1 – элеватор; 2 – загрузочный питатель; 3 – вентилятор; 4 – вращающиеся конусы; 5 – решетка; 6 – распределительные устройства; 7 – газоход

Сушилка предназначена для сушки растительного жома. Элеватором 1 жом подается в загрузочный питатель 2, который подает сы-

рой жом в сушилку. Аппарат имеет ряд решетчатых полок 5 с центральными отверстиями. На вертикальном валу сушилок установлены конусы 4 и скребки, подгребающие материал, падающий с конусов, к центральному отверстию решеток. Горячий сушильный агент поступает из газохода 7 и отсасывается вентилятором 3. Сушилки этого типа работают на топочных газах или на воздухе.

Технологическая схема работы сушильной установки приведена на рисунке 4.11. Во избежание подпора норий сырьем в бункере предусмотрены два перепускных самотека.

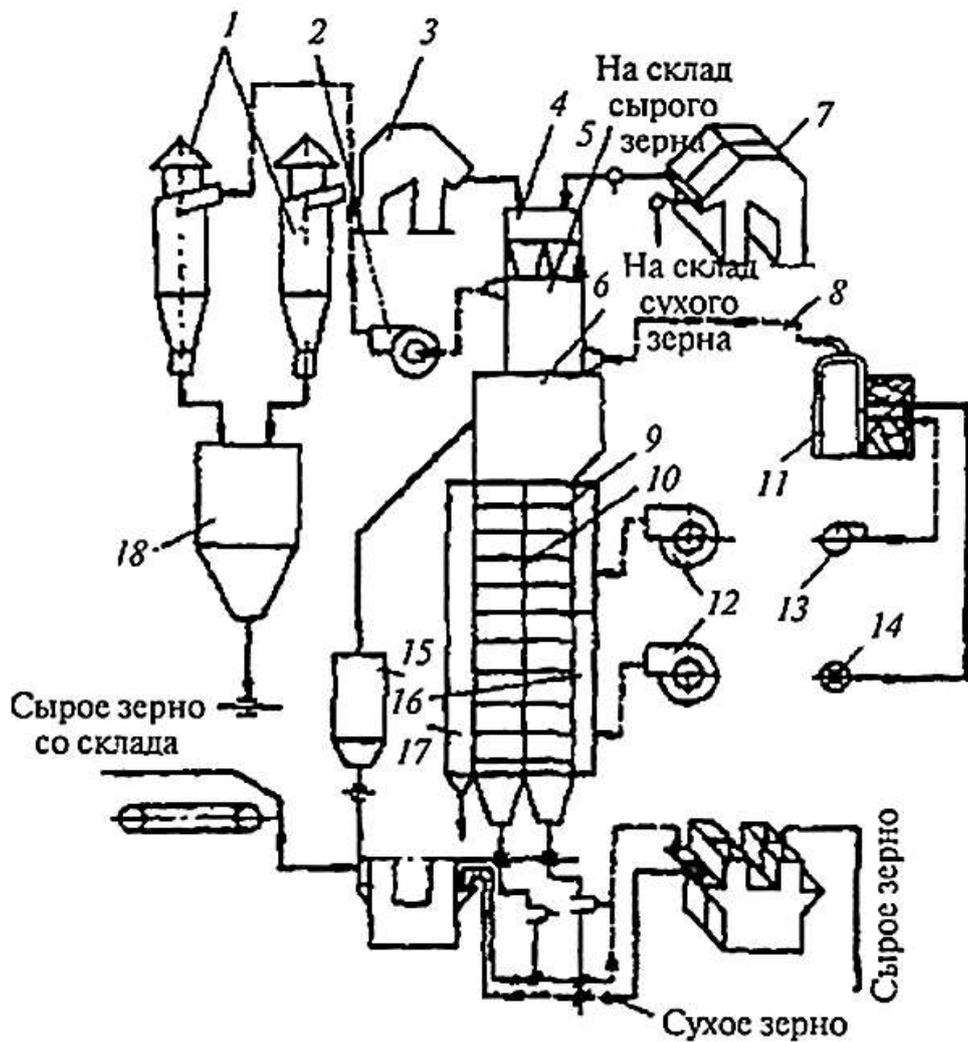


Рисунок 4.11 – Технологическая схема работы зерносушилки «Целинная-30»: 1 – циклон ЦОЛ-15; 2, 12 – вентиляторы Ц4-70 № 10; 3 – нория ДЦТ-П-175/30; 4 – бункер над нагревателем с загрузочным механизмом; 5 – камера нагрева; 6 – теплообменник; 7 – нория НЦ 2×100/30; 8 – сепаратор; 9 – шахта окончательного охлаждения; 10 – шахта частичного охлаждения; 11 – топка; 13 – вентилятор дутьевой; 14 – насос топливный; 15 – сливной бункер; 16 – напорная камера; 17 – осадочная камера; 18 – бункер для отходов

Загрузочное устройство установлено над камерой нагрева и снабжено четырьмя задвижками, работающими от одного привода. Под задвижками загрузочного устройства находятся конусы-рассекатели.

Камера нагрева состоит из трех секций, внутри которых размещены тормозящие элементы. Они представляют собой металлические решетки, изготовленные из стержней диаметром 16 мм. В камере установлено 25 рядов решеток, причем размещены они так, что ячейки первой решетки полностью перекрываются стержнями пяти расположенных ниже рядов решеток. Для подвода и отвода агента сушки в верхней и нижней секциях камеры нагрева смонтированы патрубки, расположенные под углом 45° к стенке камеры. Отработавший агент сушки отсасывается вентилятором и направляется на очистку в циклоны.

В работе Н.Б. Рашковской изложено понятие о псевдооживленном слое и указано на высокую интенсивность тепло- и массообмена в этом слое. Это свойство кипящего слоя используется в сушилках для сыпучего растительного сырья. Такие сушилки предназначены для различного сыпучего и пастообразного сырья. В настоящее время созданы и работают сушилки, в которых в сыпучем слое высушиваются зерно, овощи и т.п.

Широкое применение получила также сушка сыпучего растительного сырья во взвешенном состоянии, т.е. когда скорость движения газа выше второй критической скорости. Сушилки для сушки сырья в кипящем слое весьма разнообразны. Имеются сушилки непрерывного действия, периодические и полунепрерывные. На рисунке 4.12 представлена схема установки для сушки в кипящем слое. Влажное сыпучее растительное сырье поступает из бункера 7 на решетку 3. Горячие газы поступают под решетку из газоподводящей коробки 1. Сушильная камера 5 имеет корытообразную форму, вследствие чего скорость течения газа уменьшается по мере подъема.

Отработавшие газы уходят в газоотводящий коллектор 6. Своеобразная форма коллектора и решетки обеспечивает равномерную скорость частиц в сушилке и равномерную скорость сушки.

Из разгрузочного бункера влажное растительное сырье поступает при помощи вибратора.

Вибрация бункера предотвращает залегание влажного сырья в бункере и на решетке.

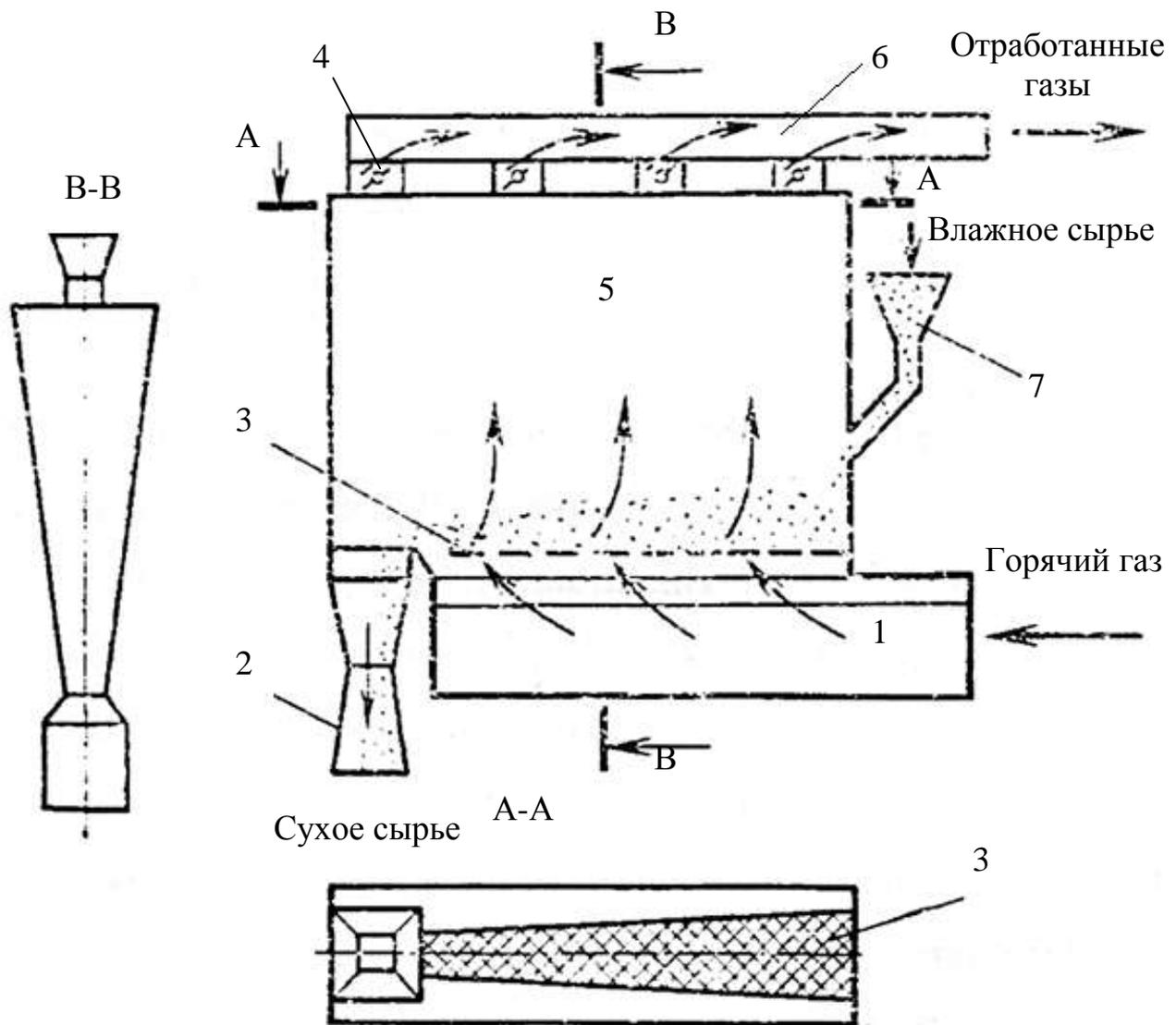


Рисунок 4.12 – Схема для сушки в кипящем слое:

1 – газоподводящая коробка; 2 – приемник высушенного сырья; 3 – решетка; 4 – заслонка; 5 – камера; 6 – газоотводящий коллектор; 7 – загрузочный бункер

В пищевой перерабатывающей промышленности чаще всего используют непрерывно действующие сушильные установки кипящего слоя или других разновидностей взвешенного слоя (фонтанирующего, вихревого). На рисунке 4.13 показана сушильная установка производительностью около 100 т/ч (диаметр сушилки 3,2 м, площадь решетки 8 м<sup>2</sup>).

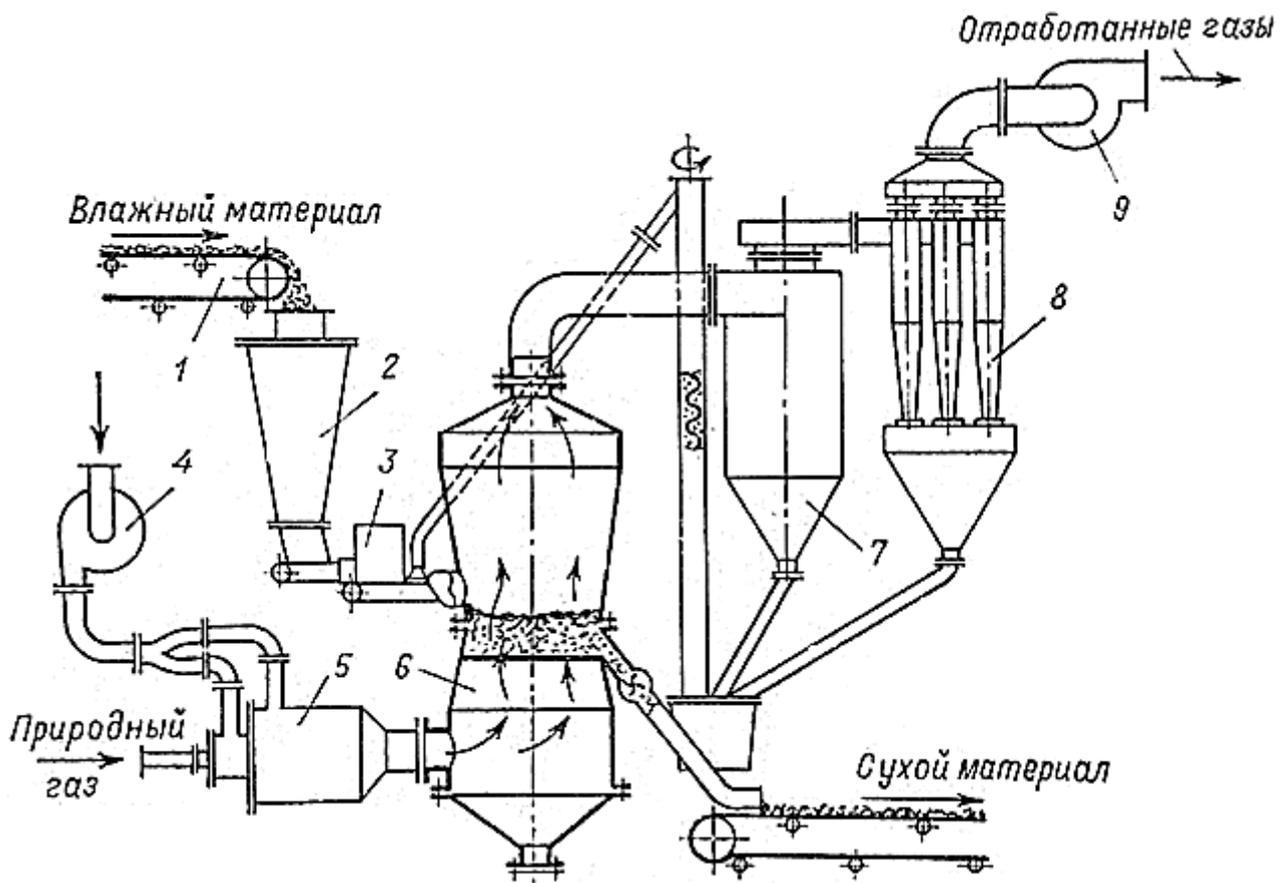


Рисунок 4.13 – Крупномасштабная сушильная установка с кипящим (псевдооживленным) слоем:

1 – транспортер; 2 – бункер; 3 – питатель; 4 – вентилятор; 5 – топка; 6 – камера; 7 – циклоп; 8 – батарейный циклон; 9 – дымосос

Влажное сырье подается транспортером в приемный бункер 2 и питателем-забрасывателем 3 распределяется на поверхности слоя. Вентилятором 4 воздух направляется для подачи в горелку, где сгорает природный газ или мазут, а также на разбавление продуктов сгорания в камеру смешения, составляющую одно целое с топкой 5. Теплоноситель поступает в подрешеточное пространство камеры 6 и, выходя с большой скоростью из отверстий газораспределительной решетки, псевдооживляет находящийся на ней слой высушенного продукта. Высушенный продукт разгружается непрерывно через отверстие, находящееся на уровне решетки (в других установках разгрузка производится через переливное устройство, расположенное на уровне слоя). Разгрузка на уровне решетки способствует выводу крупных комков. Сухой материал поступает на ленточный транспортер.

Мелкая фракция, выделенная в системе циклонов (обычном 7 и батарейном 8), вертикальным шнеком подается из сборника к месту

загрузки и смешивается с влажным сырьем. Окончательная очистка отходящего из сушильной установки теплоносителя осуществляется в мокром скруббере, перед которым установлен дымосос 9.

При сушке комкующегося сырья, а также термочувствительных продуктов гидродинамический режим в прирешеточной зоне должен быть достаточно активным, застойные зоны должны отсутствовать. Такой режим обеспечивается в аппаратах со слоем расширяющегося сечения – фонтанирующим (рис. 4.14, а) и вихревым (рис. 4.14, б).

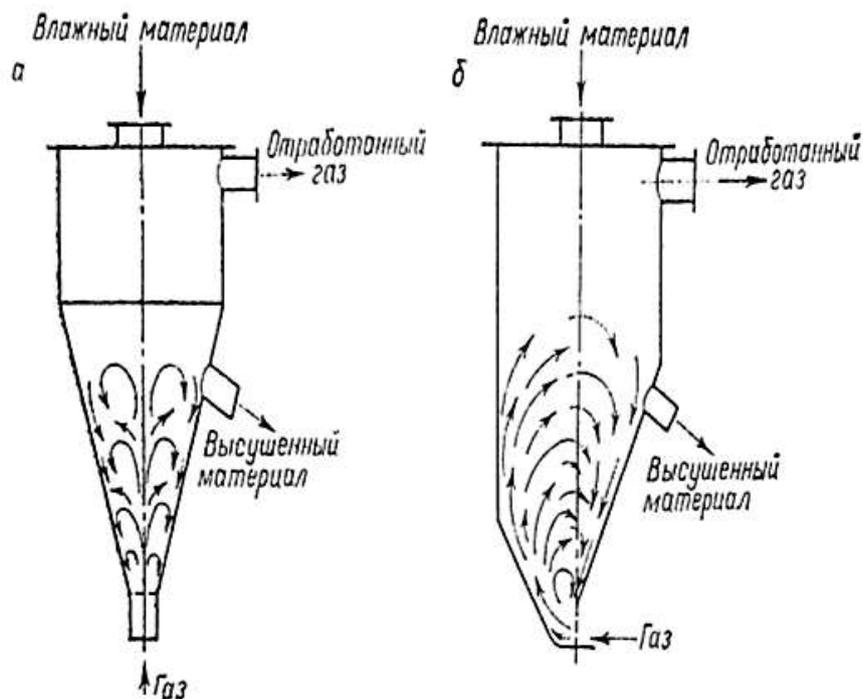


Рисунок 4.14 – Схемы сушильных аппаратов:  
а – с фонтанирующим слоем; б – с вихревым

Эти аппараты легко масштабируются путем параллельного соединения соответствующего количества желобов. Отличие состоит в том, что в аппарате с вихревым слоем теплоноситель подводится в слой тангенциально, решетка беспровальная, а в аппарате с фонтанирующим слоем ввод теплоносителя осуществляется снизу.

Сушилки со взвешенным слоем успешно используются для сушки суспензий и растворов из растительного сырья, причем высушенный продукт может быть получен либо в гранулированном виде, либо в виде порошка.

При получении высушенного сырья в виде гранул процесс обычно проводят в слое высушиваемого сырья с разгрузкой продукта из слоя, а при необходимости получения сравнительно тонкодис-

перного сырья и в тех случаях, когда высушиваются термочувствительные и вязкие материалы, рекомендуется сушка с использованием инертных частиц (фторопластовых, фарфоровых и др.). Следует иметь в виду, что в последнем случае процесс более устойчив, поскольку масса слоя, состоящего практически только из инертных частиц, в процессе сушки не изменяется.

Гранулированный продукт не слеживается при хранении и удобен для использования вследствие малого пыления. Если гранулы являются полупродуктом, то последующую технологическую операцию можно проводить в кипящем слое.

На рисунке 4.15 представлена принципиальная схема установки для сушки сыпучего растительного сырья во взвешенном состоянии. В этой сушилке сырье «витают» в сушильном агрегате, который переносит его сначала в сушильную камеру 4, а затем в циклон 5. Такие сушилки получили применение для сушки хлопка, зерна и другого растительного сырья.

Сушилки отличаются высокой эффективностью, их достоинством является также незначительное время соприкосновения сырья с сушильным агентом, поэтому при сушке растительного сырья, чувствительных к температуре, можно применять горячие топочные газы.

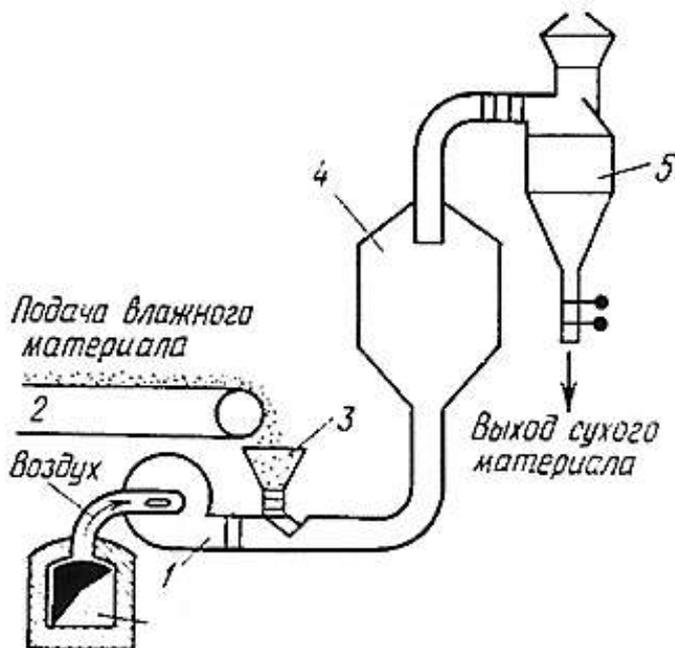


Рисунок 4.15 – Схема аэрофонтанной сушилки:

1 – вентилятор; 2 – транспортер; 3 – воронка; 4 – камера; 5 – циклон

*Распылительная сушилка.* Распылительные сушилки получили применение для сушки жидкого сырья. Сушильная камера такой сушилки выполнена в виде полубашни значительных размеров ( $D = 2-5$  м,  $H = 3-5$  м) (рис. 4.16). Сырье, поступающее в сушилку, распыляется в верхней части сушилки. Капли его опускаются, и при этом создается контакт между сырьем и сушильным агентом, поступающим в нижнюю часть сушилки. Диспергирование сырья производится путем разбрызгивания через форсунки или пневматически при помощи сжатого газа. Получило также применение центробежное распыление.

Благодаря высокой дисперсности сырье в сушилке имеет громадную поверхность контакта с сушильным агентом (с воздухом или дымовыми газами), поэтому скорость сушки весьма велика. Сушильный агент имеет в сушилке малую скорость (0,2-0,4 м/с), но и при этой скорости он увлекает мелкие частицы сырья. Для их улавливания воздух пропускается через фильтры. Высушенное сырье падает на дно камеры и скребками подвигается к шнеку, которым отводится из сушилки.

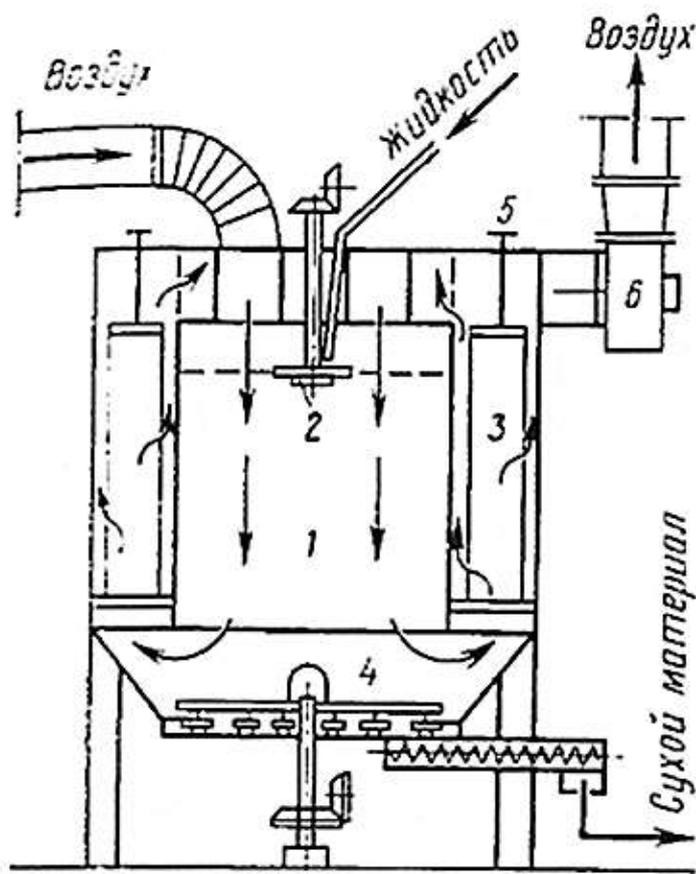


Рисунок 4.16 – Распылительная сушилка:  
 1 – сушильная камера; 2 – распылительный диск; 3 – фильтры;  
 4 – скребки; 5 – встряхивающий механизм; 6 – вентилятор

Распылительные сушилки могут работать как при прямотоке, так и при противотоке сушильного агента и сырья. Применяются сушилки, работающие с нормальным процессом и с возвратом отработавшего воздуха. Напряжение сушилок в зависимости от свойств сырья и температуры воздуха колеблется в широких пределах – от 2 до 25 кг/(м<sup>3</sup>·ч).

#### **4.4. Сублимационная, радиационная, высокочастотная сушилки**

В последние годы в пищевой перерабатывающей промышленности получают применение новые методы сушки в глубоком вакууме, инфракрасными лучами, в поле токов высокой частоты, в кипящем слое и во взвешенном состоянии.

Сушка в глубоком вакууме производится при остаточном давлении 13,3-133,3 Па (0,1-1,0 мм рт. ст.). При этом давлении сушка может протекать при отрицательных температурах, при которых вода будет находиться в состоянии льда. Следовательно, будет иметь место испарение твердого тела без его плавления – сублимация. Поэтому сушка в глубоком вакууме называется сушкой сублимацией. Основным преимуществом сушки сублимацией растительного сырья является возможность получить продукт высокого качества. При сушке сублимацией не происходит денатурации белков, не имеют места микробиологические процессы, сохраняются полностью все витамины, содержащиеся в свежем сырье. Весьма существенным является также и то, что высушенный продукт сохраняет первоначальный объем, приобретая при этом пористую структуру. При смачивании он легко поглощает воду и приобретает первоначальный вид.

Сушка сублимацией может быть применена к самым разнообразным видам растительного сырья: овощам, фруктам, ягодам, грибам.

Сушилка, применяемая для высушивания растительного сырья в глубоком вакууме, состоит из сушильной камеры, конденсатора и вакуум-насосной установки. На рисунке 4.17 представлена схема установки для сушки в глубоком вакууме. Сушильная камера представляет собой герметический шкаф с полками, обогреваемыми паром или горячей водой. Иногда обогрев производится путем инфракрасного облучения. Высушиваемое замороженное сырье укладывают на полки. Таким образом, сушилка относится к группе контактных. Выделяющиеся пары поступают на конденсацию. Конденсатор охлаждает-

ся жидкостью, при этом поверхность его покрывается льдом, который должен непрерывно удаляться. Вакуум-насосная система состоит из ротационных масляных вакуум-насосов. Применяются также многоступенчатые эжекторные паровые вакуум-установки. Данные сушильные установки создают остаточное давление 0,1-1,0 мм рт. ст.

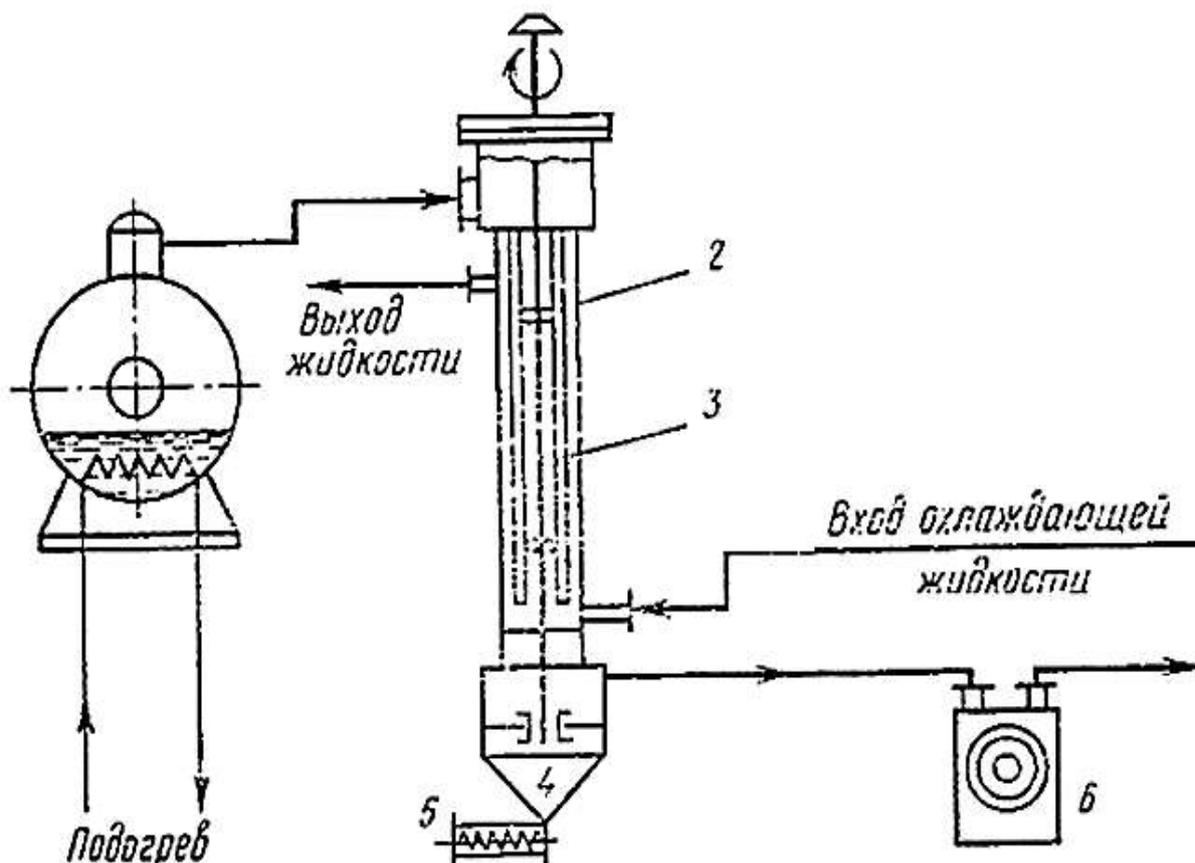


Рисунок 4.17 – Схема установки для сушки в глубоком вакууме:  
1 – камера; 2 – конденсатор; 3 – скребки для удаления льда; 4 – сборник для снега; 5 – шнек для удаления снега; 6 – вакуум-насос

На рисунке 4.18 представлена установка для обезвоживания растительного сырья, которая может работать как в режиме холодной вакуумной, так и сублимационной сушки.

Установка включает в себя сушильную камеру, подключенную к системе осушки (I), системе нагрева и охлаждения продуктовых полок (II) и вакуумной станции (III).

Предварительно замороженный продукт размещается на полках 2 рабочей камеры. Нагрев продукта осуществляется циркуляцией теплоносителя через теплообменник 11.

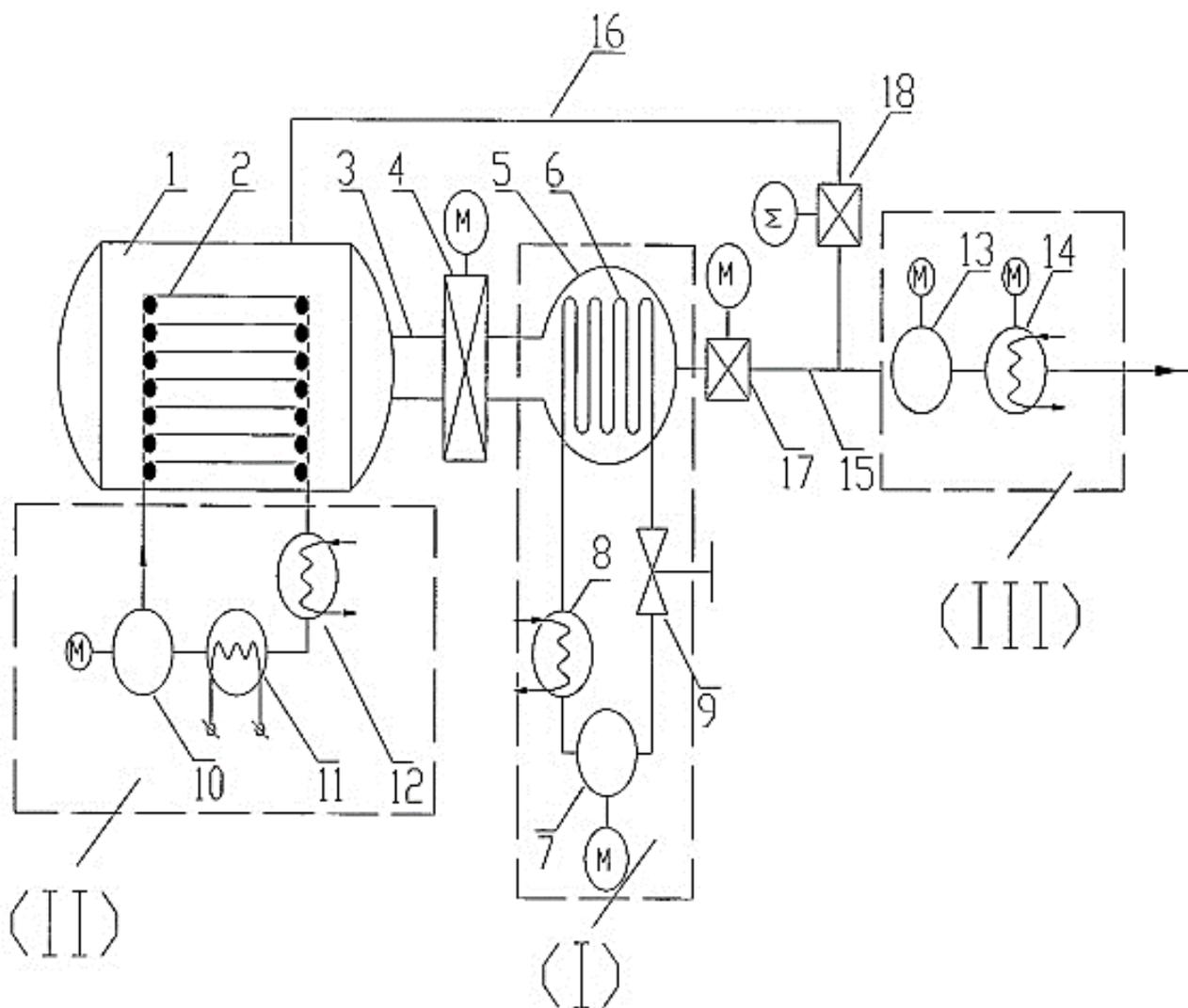


Рисунок 4.18 – Сублимационная сушильная установка для обезвоживания биологических материалов:

- 1 – сублиматор; 2 – продуктовые полки; 3, 15, 16 – патрубки;  
 4, 17, 18 – вакуумные задвижки; 5 – десублиматор; 6 – испарительные батареи;  
 7 – компрессор; 8 – конденсатор; 9 – соленоидный вентиль; 10 – насос;  
 11 – теплообменник; 12 – охладитель; 13, 14 – вакуумные насосы

На этапе, когда обезвоживаемое сырье нагревается до положительной температуры, производится отключение десублиматора, а в процессе досушки удаление паров из рабочей камеры производится вакуумной станцией, минуя десублиматор, в котором происходит оттайка батарей. Это позволяет снизить энергетические затраты и сократить длительность самого процесса сушки.

*Сушка инфракрасными лучами.* В этих сушилках тепло для испарения влаги подводится термоизлучением. Генератором, излучающим тепло, являются специальные лампы или же нагретые керамические или металлические поверхности.

Специальные лампы инфракрасного излучения отличаются от обычных осветительных тем, что температура накала их 2500 вместо 2920 К для обычных ламп. Около 80% электроэнергии, подводимой к этим лампам, преобразовывается в энергию инфракрасного излучения. Для направления пучка лучей лампы снабжают рефлекторами параболической формы.

Основное преимущество сушки инфракрасными лучами – более быстрое удаление влаги. Это ускорение процесса сушки растительного сырья объясняется тем, что лучистый поток тепла проникает частично внутрь капиллярно-пористых тел на глубину 0,1-2,0 мм. Попадая в капилляры тела, лучи почти полностью поглощаются вследствие ряда отражений от стенок. Поэтому при сушке термоизлучением коэффициент теплообмена имеет большую величину, и на единицу поверхности сырья может быть передано в единицу времени значительно больше тепла, чем при сушке нагретыми газами или при контактной сушке. Ускорение процесса сушки может быть значительным. Так, например, продолжительность сушки инфракрасными лучами текстильных материалов уменьшается в 30-100 раз. Это имеет место при сушке другого тонкослойного сырья. Сушилки этого типа получили распространение для сушки различных металлических окрашенных изделий, для изделий из картона, дерева, пластмассы.

На рисунке 4.19 представлена схема сушилки, оборудованной лампами.

Ламповые излучатели характеризуются высоким расходом электроэнергии, что является основным препятствием к их внедрению. Однако в ряде случаев себестоимость ламповой сушки ниже, чем конвективной, за счет сокращения времени сушки и уменьшения капитальных затрат.

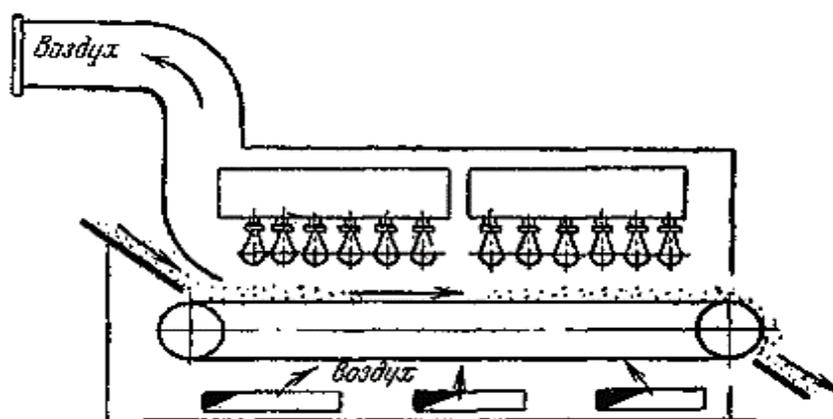


Рисунок 4.19 – Схема ламповой сушилки

На рисунке 4.20 представлена схема радиационной сушилки с излучателями, обогреваемыми газами.

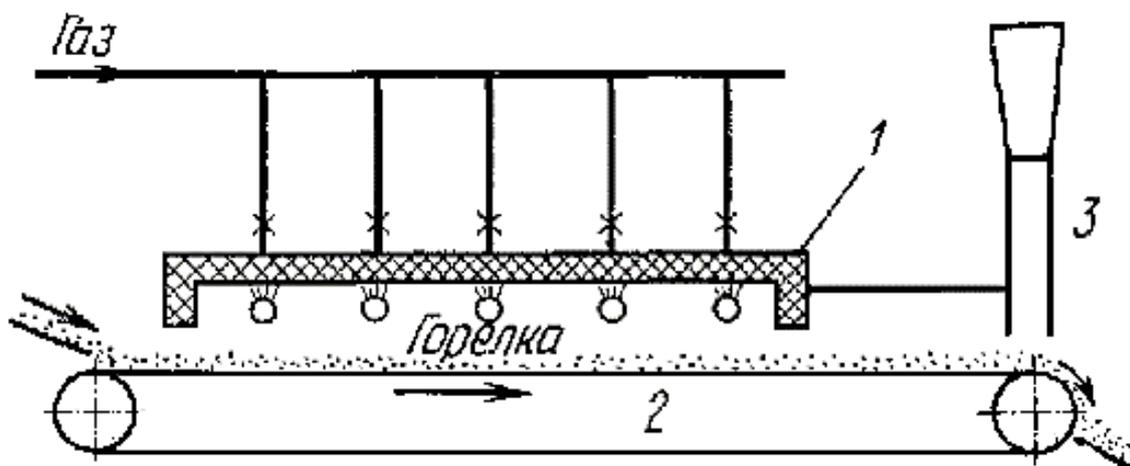


Рисунок 4.20 – Схема радиационной сушилки с излучателями:  
1 – излучатель; 2 – конвейер; 3 – вытяжное устройство

Газовые радиационные сушилки проще по конструкции и дешевле, чем сушилки, оборудованные лампами. В них меньше расход энергии. Излучатели нагреваются газом, сжигаемым непосредственно под излучателями, или же топочными газами, поступающими внутрь излучателей. Вследствие интенсивного обогрева сырья радиационным излучением в растительном сырье возникает значительный температурный градиент. Возникающий вследствие этого термодиффузионный поток влаги препятствует миграции влаги из глубины сырья к его поверхности.

Во избежание этого явления рекомендуется особый, прерывистый режим сушки. Сушка в этом случае состоит из коротких периодов облучения (2-4 с) и длительных периодов (20-80 с) отлежки без облучения. В период облучения высушиваемому телу подводится тепло, а в период отлежки происходит движение влаги от центра тела к поверхности, так как в этот период, когда нет подогрева, температурный градиент изменяет направление.

Прерывное облучение снижает конечную температуру сушки и уменьшает расход энергии. Общая продолжительность сушки при этом не увеличивается. Прерывистая сушка растительного сырья способствует сохранению витаминов. Для улучшения качества высушенных видов сырья рекомендуют также применять комбинированную сушку: радиационную и конвективную, т.е. одновременно с применением радиационного нагрева пропускать над сырьем нагретый воздух.

*Сушка в поле токов высокой частоты.* На рисунке 4.21 представлена схема установки для сушки токами высокой частоты, состоящая из электросети 1, электродов 2 и транспортера 3.

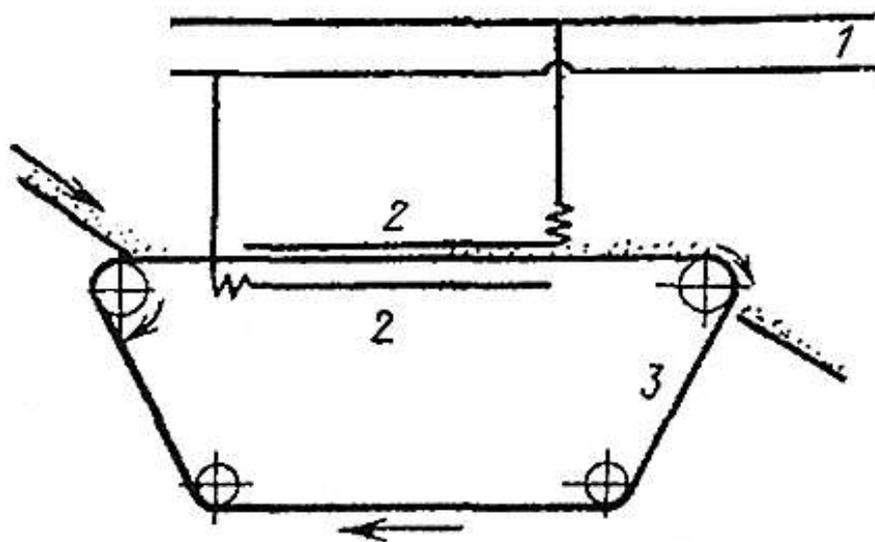


Рисунок 4.21 – Схема установки для сушки токами высокой частоты:  
1 – электросеть; 2 – электроды; 3 – транспортер

Если высушиваемое сырье поместить между двумя пластинами, к которым подводится ток высокой частоты, то материал будет нагреваться по всей его толщине. Объясняется это тем, что под влиянием переменного электрического поля молекулы сырья приходят в колебательное движение. Движение молекул приводит к нагреванию сырья по всей его толщине, но так как наружные элементы тела отдают тепло в окружающее пространство, температура тела падает от центра к поверхности. В этом же направлении при сушке изменяется и влажность. В этом случае, следовательно, температурный и влажностный градиенты совпадают по знаку, и оба они способствуют миграции влаги от центра к поверхности.

Поэтому скорость высокочастотной сушки значительно выше скорости конвективной сушки.

#### **4.5. Сушильные установки с применением теплового насоса**

Принцип действия компрессионных тепловых насосов состоит в последовательном расширении и сжатии рабочего тела. На рисунке 4.22 представлена принципиальная схема использования теплового насоса в сушильных установках [9].

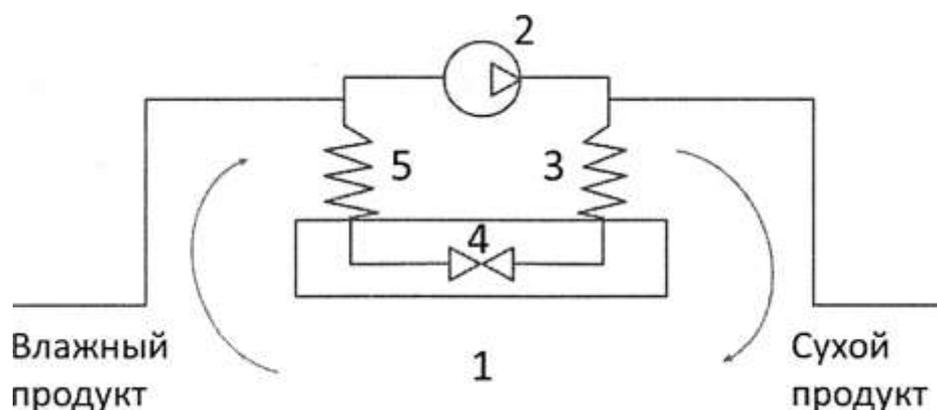


Рисунок 4.22 – Принципиальная схема использования компрессионного теплового насоса в сушильных установках:

1 – сушильная камера; 2 – компрессор; 3 – конденсатор; 4 – дроссель;  
5 – испаритель

Отработанный воздух из сушильной камеры проходит через испаритель холодильной машины, на котором происходит конденсация влаги и ее дальнейшее удаление из системы. После чего осушенный воздух проходит через конденсатор, где ему сообщается тепло, эквивалентное теплоте, приобретенной в испарителе и при работе сжатия в компрессоре. Нагретый сухой воздух направляется обратно в сушильную камеру для обезвоживания продукта.

Компрессионные теплонасосные установки используются в установках конвективной сушки плодов и ягод. Парокомпрессионные теплонасосные установки обладают относительно высоким коэффициентом преобразования теплоты, составляющим от 1,2 до 4,5 в зависимости от температуры кипения хладагента. Поэтому применение таких тепловых насосов в конвективной сушке дает возможность сократить энергопотребление в отличие от традиционных систем.

В зависимости от типа подключения теплонасосные установки, используемые в конвективных сушильных аппаратах, можно разделить на конденсационные и рекуперативные.

Первый тип используется в таких сушильных установках, где осуществляется замкнутая циркуляция теплоносителя. Удаление влаги при этом осуществляется путем ее конденсации на испарителе. В конденсационных тепловых насосах энергоэффективность характеризуется количеством влаги, сконденсированной на теплообменной поверхности, на кВт/час потребляемой электроэнергии.

Второй тип – рекуперативные тепловые насосы – используется в сушильных установках с однократным прохождением теплоносителя

через обезвоживаемое растительное сырье. При этом отработанный воздух проходит через испаритель, а свежий воздух, поступающий в камеру, – через конденсатор. Энергоэффективность такой теплонасосной установки зависит от разности температур между поступающим и вытяжным воздухом и определяется величиной коэффициента преобразования. Одним из путей повышения производительности рекуперативных тепловых насосов является использование двигателей внутреннего сгорания в приводе компрессора вместо электродвигателей. В этом случае возможно также использование теплоты отходящих газов ДВС для дополнительного нагрева входящего воздуха.

На рисунке 4.23 представлена схема теплонасосной установки для конвективной сушки пищевых продуктов.

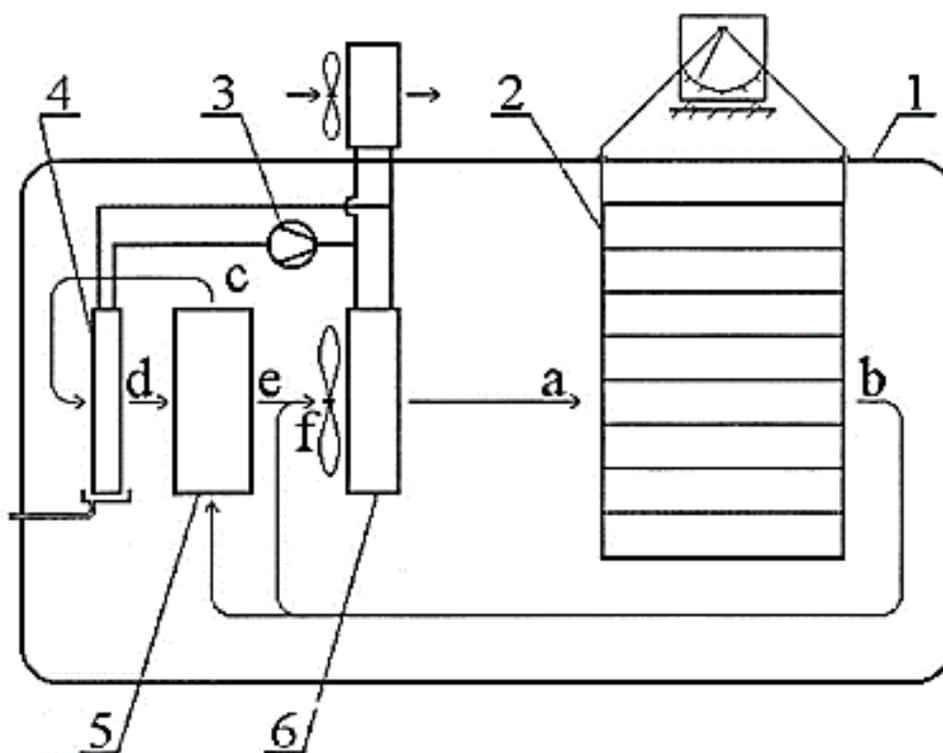


Рисунок 4.23 – Схема теплонасосной сушильной установки:  
 1 – сушильная камера; 2 – тележка; 3 – компрессор; 4 – испаритель;  
 5 – рекуперативный теплообменник; 6 – конденсатор

Данная установка включает в себя сушильную камеру 1, в которой предусмотрены тележки 2 для высушиваемого продукта и теплонасосная установка, состоящая из компрессора 3, двухсекционного воздушного конденсатора 6, одна из секций которого размещена в сушильной камере, а вторая – снаружи нее, рекуперативного теплообменника 5 и испарителя 4 с поддоном для сбора конденсата.

Работа установки состоит в следующем. Нагретый и высушенный после конденсатора воздух (точка а) проходит через тележку, адиабатически увлажняясь при этом за счет отбора влаги от обезвоживаемого продукта.

Влажный воздух после продукта (точка b) разделяется на 2 потока, один из которых направляется на рециркуляцию на вход в конденсатор, а второй – на осушение в тепловой насос. Второй поток при этом вначале проходит через рекуперативный теплообменник, где он предварительно охлаждается. Затем воздух проходит через испаритель, где он доохлаждается. Конденсируемая при этом влага собирается в поддоне и выводится из системы. Воздух после испарителя подогревается в теплообменнике и смешивается с рециркулируемым воздухом. Образующийся воздух (точка f) проходит через конденсатор, и цикл повторяется.

Для повышения эффективности сушильных установок на базе тепловых насосов были разработаны более сложные схемы агрегатов по сравнению с традиционными: теплонасосные сушильные установки с несколькими температурными уровнями, в комбинации с солнечными аккумуляторами или тепловыми трубами и т.д.

На рисунке 4.24 изображена схема гелиосушильной установки с тепловым насосом для обезвоживания дикорастущего пищевого сырья.

Корпус сушильной установки изготовлен из прозрачного сырья, зачерченный плоский испаритель устанавливается под углом 25-40° к горизонту. Высушиваемое сырье укладывается в рабочую камеру, где в дневное время суток высушивается одновременно с помощью солнечной радиации, проникающей через прозрачный корпус, и за счет циркуляции воздуха с температурой 55-60 °С. С помощью вентилятора наружный воздух подается через конденсатор, где он нагревается и поступает в сушильную камеру. В зависимости от времени суток и года, а также от свойств высушиваемого продукта температура отработанного воздуха в дневное время составляет порядка 48-60 °С. При этом теплота отработанного воздуха накапливается в аккумуляторе-испарителе, а охлажденный воздух выбрасывается в окружающую среду.

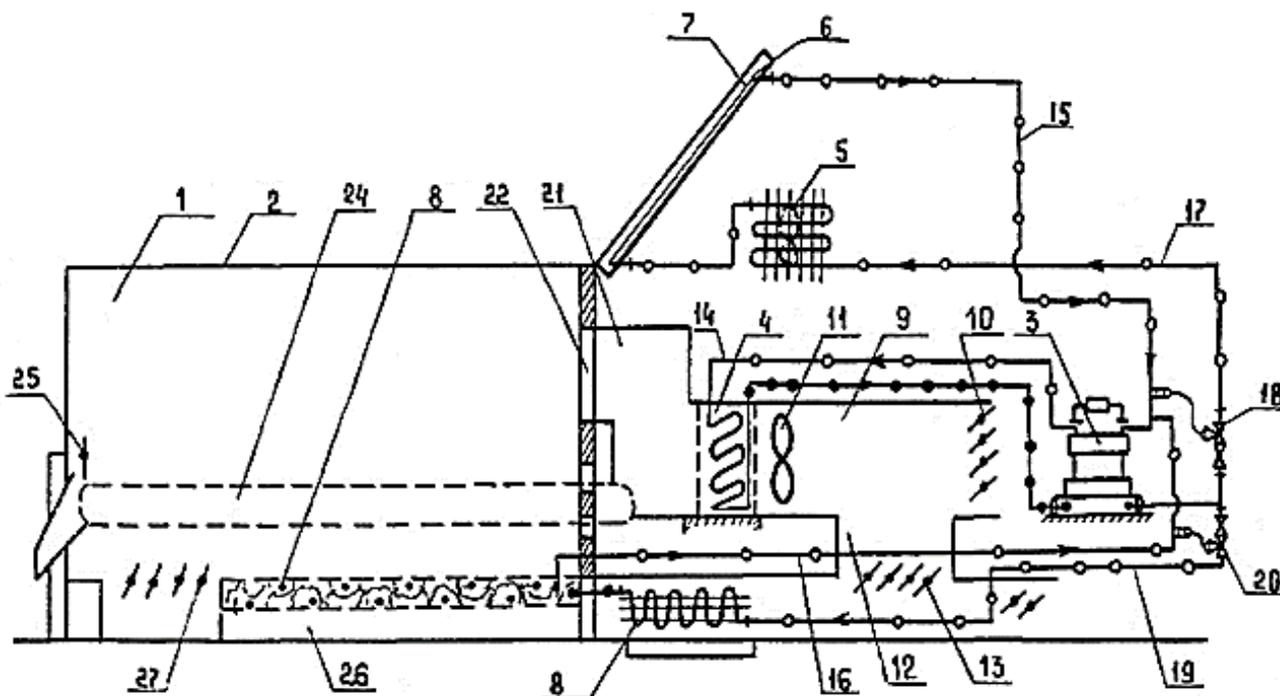


Рисунок 4.24 – Схема гелиосушильной установки с тепловым насосом:  
 1 – камера; 2 – прозрачный корпус; 3 – компрессор; 4 – конденсатор;  
 5 – воздухоохладитель; 6 – испаритель; 7 – солнечный коллектор;  
 8 – испаритель и аккумулятор-испаритель; 9, 12, 21, 26 – воздуховоды;  
 10, 13, 27 – шиберы; 11 – вентилятор; 14–17 – трубопроводы;  
 18, 20 – терморегулирующие вентиля; 19 – трубопроводы; 22 – окно  
 для воздуха; 23 – выход воздуха; 24 – конвейер; 25 – перегородка

В случае, если температура уходящего воздуха становится больше температуры окружающего воздуха, с помощью шиберы поток воздуха частично или полностью направляется на рециркуляцию. В вечернее время суток или в условиях облачности источником тепла является теплота, накопленная в аккумуляторе-испарителе и теплота отработанного воздуха.

В настоящее время вакуумная сушка нашла применение не только в пищевой промышленности, но и в фармацевтическом производстве, поскольку процесс проводится в щадящих режимах при пониженных температурах, что позволяет исключить разложение и разрушение термолабильного сырья.

С точки зрения сохранности макро- и микронутриентов плодов и ягод выделяется вакуумная сушка с ИК-энергоподводом. Вакуум-инфракрасная сушка позволяет сохранить порядка 80-90% термолабильных белков, витаминов, полиненасыщенных жирных кислот, а также органолептические показатели продукта. Энергосберегающий

эффект заключается в том, что отсутствуют потери тепла с уходящим воздухом.

### *Контрольные вопросы*

1. По каким признакам классифицируют сушильные установки?
2. Какие бывают конструкции пневмосушилок?
3. Что относится к недостаткам вакуум-сушильных шкафов?
4. В чем заключаются особенности процесса сушки под вакуумом?
5. Что используют для получения теплоносителя в конвективных сушилках?
6. Что относится к достоинствам и недостаткам сублимационных сушилок?

## Глава 5. РАСЧЕТ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВОК ДЛЯ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

При проектировании сушильных установок стремятся к достижению максимальной интенсификации процесса сушки и улучшению качества высушиваемого материала.

В соответствии с этими требованиями выработаны рациональные условия технико-экономического проектирования сушильных установок, предусматривающие:

- а) непрерывность процесса сушки;
- б) увеличение агрегатных мощностей;
- в) совмещение в одном агрегате процесса сушки с другими технологическими процессами (например, помола);
- г) применение оптимальных параметров теплоносителей и технологических режимов;
- д) применение интенсивных комбинированных способов сушки, дающих наибольший эффект для данного высушиваемого материала;
- е) механизацию и автоматизацию процесса, облегчение условий труда обслуживающего персонала.

*Вопросы проектирования и выбор типа сушилки.* На той стадии проектирования, когда уже определен конкретный тип сушилки, но ни один из типовых проектов не подходит, необходимо выполнить следующее:

- а) определить или выбрать оптимальный режим сушки материала, определяемый значениями температуры, влажности и скорости сушильного агента относительно материала;
- б) выбрать вид сушильного агента – воздух, топочные или инертные газы;
- в) выбрать тип и количество вентиляторов (осевых или центробежных) и их расположение в сушильной камере (нижнее, верхнее, боковое, смешанное и т.п.) или расположить их вне камеры;
- г) при сушке воздухом выбрать тип калорифера (компактный, пластинчатый, из ребристых или гладких труб) или при сушке топочными газами тип топочной камеры со всем ее вспомогательным оборудованием;
- д) выбрать тип транспортных устройств – ленточный транспортер, конвейер, вагонетки или тележки;

е) определить количество и месторасположение датчиков и контрольно-измерительных приборов и выбрать систему регулирования процесса сушки.

Выбор оптимального типа сушильной установки для какого-либо материала, который можно сушить разными способами и в различных типах сушилок (например, сушка растительного сырья может осуществляться в полочных сушилках, в барабанных сушилках, в кипящем слое, в вибросушилках и т.п.), представляет собой сложную технико-экономическую задачу, и только технико-экономическое сравнение расчетов различных вариантов конкурирующих типов сушилок может определить оптимальный тип сушилки для данного материала.

Методика теплового расчета в значительной степени зависит от способа подвода тепла. Если при конвективном способе подвода тепла к сушимому материалу режим сушки определяется температурой  $t$ , скоростью  $v$  и относительной влажностью  $\phi$  сушильного агента, т.е. параметрами, которые определяют продолжительность сушки материала при заданном количестве высушиваемого материала, то при других способах подвода тепла процесс сушки растительного сырья задается или определяется интенсивностью теплового потока, при которой температура сырья не должна превышать установленные пределы (превышение установленных пределов приводит к порче или браку высушиваемого материала). В ряде отраслей промышленности установлены нормативы и режимы сушки сырья, которыми следует руководствоваться при проектировании сушильных установок.

### **5.1. Расчет контактных сушилок**

В большинстве случаев сушка растительного сырья в контактной сушилке осуществляется за счет тепла, полученного при соприкосновении с нагретой поверхностью. Часто нагрев поверхности производится насыщенным водяным паром или топочными газами, полученными в результате горения различного вида топлива, на выбор теплоносителя влияет допустимая для растительного сырья температура.

Конструктивно контактные сушильные установки изготавливаются в виде периодически действующих сушильных барабанов или сушильных шкафов с расположенными по их высоте обогревающими полками или плитами, на которых располагается периодически за-

гружаемое высушиваемое растительное сырье, или в виде непрерывно действующих вальцовых сушильных установок.

Материальный и тепловой баланс рассмотрен на примере кондуктивной сушильной установки.

Если расход влажного растительного сырья равен  $G_1$ , кг/с, а высушенного сырья  $G_2$ , кг/с, то материальный баланс процесса сушки имеет вид

$$G_1 = G_2 + W, \quad (5.1)$$

где  $W$  – количество испаряемой влаги, кг/с.

Пусть начальная и конечная влажность растительного сырья  $U_1$  и  $U_2$ , тогда материальный баланс по абсолютно сухому высушиваемому сырью будет равен

$$G_1 = \frac{100 - U_1}{100} = G_2 = \frac{100 - U_2}{100}. \quad (5.2)$$

Решая эти два уравнения, найдем количество испаряемой влаги из растительного сырья, кг/с

$$W = G_1 - G_2 = G_1 \frac{U_1 - U_2}{100}. \quad (5.3)$$

Тепловой баланс сушильного процесса составляется с целью определения необходимых тепловых затрат. При кондуктивной сушке тепло, необходимое для испарения влаги, передается растительному сырью через стенку. В качестве теплоносителя при такой сушке обычно используют насыщенный водяной пар либо газы, полученные в результате сгорания топлива.

Тепло приходит в сушильную камеру с топочными газами  $G_{ТГ}$ , кг/с, с влажным растительным сырьем ( $G_1 = G_2 + W$ ), кг/с.

Уходит из сушилки с топочным газом  $G_{ТГ}$ , кг/с, с высушенным растительным сырьем  $G_2$ , кг/с, с испаренной влагой из высушиваемого сырья  $W$ , кг/с, и потерями тепла в окружающую среду,  $Q_{пот}$ , кДж/с.

Тепловой баланс кондуктивной сушильной установки имеет вид

$$G_{ТГ} C_{ТГ} t_1 + G_2 C_M Q_1 + W C_{вг} Q_1 = G_{ТГ} C_{ТГ} t_2 + G_2 C_M Q_2 + W J_0 Q_n. \quad (5.4)$$

Из теплового баланса определяется расход тепла (на нагревание растительного сырья, испарение влаги из высушиваемого сырья и по-

тери имеющегося тепла в окружающую среду), а также расход топлива (пара или топочных газов) на процесс сушки имеющегося растительного сырья. Потери тепла в окружающую среду рассчитываются или принимаются от 10 до 15% от расхода тепла на процесс сушки растительного сырья.

$$Q_T = G_{ТГ} C_{ТГ} (t_1 - t_2) = G_2 C_M (v_2 - v_1) + W (J_0 - C_B v_1) + Q_n, \quad (5.5)$$

где  $G_{ТГ}$  – расход топочных газов, кг/с;

$t_1$  и  $t_2$  – температура топочных газов на входе и выходе из сушильной установки;

$v_1$  и  $v_2$  – температура растительного сырья на входе и выходе из сушильной установки.

При расчете периодического процесса сушки учитываются время нагревания растительного сырья  $\tau_1$  и время испарения влаги  $\tau_2$ .

Расход топлива на процесс сушки при обогреве паром, кг/с

$$G_T = \frac{Q_t}{\zeta \chi}, \quad (5.6)$$

где  $\zeta$  – теплота конденсации пара при заданном давлении, кДж/кг;

$\chi$  – степень сухости пара, принимается 0,95-0,98.

Расход топлива на процесс сушки при периодической сушке растительного сырья, кг

$$G_T = \frac{Q}{Q_H^p}, \quad (5.7)$$

где  $Q_H^p$  – наименьшая теплотворная способность топлива.

Количество тепла, получаемого при сгорании 1 кг дров.

Определение высокой и нижней теплотворной способности дров, кДж/кг

$$Q_B^p = 3400C^p + 12500H^p - 109(O^p - S^p). \quad (5.8)$$

Низкая теплотворная способность дров

$$Q_H^p = Q_B^p - 25(H^p + W_T^p). \quad (5.9)$$

Теоретическое количество абсолютно сухого воздуха, необходимого для сгорания 1 кг топлива (дров), кДж/кг

$$L_0 = 0,115C^p + 0,342H^p - 0,043(O^p - S^p). \quad (5.10)$$

Действительный расход воздуха, кг

$$L = \alpha L_0, \quad (5.11)$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха; 1,2.

Количество водяного насыщенного пара, образовавшегося при сгорании топлива (дров), кг/кг

$$G_n = \frac{9H^p + W_1^p}{100} + Lx_0 + W_1^p, \quad (5.12)$$

где  $x_0$  – влагосодержание холодного воздуха.

Количество сухих газов, полученных при сжигании 1 кг топлива (дров), кг/кг

$$G_r = 1 + L - \frac{9H^p + W_T^p + A^p}{100}, \quad (5.13)$$

влагосодержание продуктов сгорания, кг/кг

$$x = \frac{G_n}{G_r}. \quad (5.14)$$

Так как в удаленных и северных районах в качестве топлива используют дрова, в таблице 5.1 приводим теплотворную способность и химический состав дров.

Таблица 5.1 – Теплотворная способность и химический состав дров

Вид топлива	Влажность топлива $W$ , % масс	Зольность топлива $A$ , % масс	Состав топлива, % масс					Теплотворная способность топлива, кДж/кг	
			$C^p$	$H^p$	$O^p$	$N^p$	$S^p$	$Q_H^p$	$Q_B^p$
Дрова	25	0,4	50,4	6,2	43,3	0,1	-	15200	16800

Необходимую поверхность сушильных полок можно определить через количество испаряемой влаги и интенсивность испарения влаги с  $1 \text{ м}^2$  полок в час.

Поверхность сушки ( $\text{м}^2$ ) определяется по формуле

$$F_s = \frac{W}{A_s \varphi}, \quad (5.15)$$

где  $W$  – количество испаряемой влаги в час в сушке (из материального баланса), кг/ч;

$A_s$  – интенсивность испарения влаги, принимается равной от 0,5 до 3,5 кг/м<sup>2</sup>·ч [4, 10].

Для контактных сушилок коэффициент ( $\varphi$ ), учитывающий степень активного контакта между поверхностью полки и растительным сырьем, равен 0,75.

Далее рассчитывают количество полок, приняв площадь полки и расстояние между ними 150-200 мм.

#### *Пример расчета вальцовой сушильной установки для сушки ирги*

Определить основные размеры двухвальцовой атмосферной сушильной установки для сушки пасты ирги при следующих условиях.

Начальный вес пасты ирги  $G_1=90$  кг, ее температура  $\vartheta_m=15$  °С, начальная влажность пасты ирги  $\omega_1=75\%$ , конечная  $\omega_2=10\%$  (на общий вес пасты ирги). Обогрев сушильной установки производится водяным паром при  $p=1$  атм, с температурой  $t_{\text{нас}} \approx 100$  °С и теплотой конденсации  $r=2264$  кДж/кг. Толщина слоя пасты ирги  $\delta_1=1$  мм, его теплопроводность  $\lambda=0,52$  Вт/м·к град и теплоемкость  $c=3,44$  кДж/кг·град.

Толщина стенки чугунного вальца сушильной установки  $\delta_2=10$  мм и теплопроводность чугуна  $\lambda=46,5$  Вт/м·к. Над поверхностью пасты ирги продувается воздух со скоростью  $v=1,5$  м/с; температурой  $t_c=40$  °С;  $\varphi=40\%$  и  $p_{\text{п}}=0,3$  кПа. В примере не задана температура пасты ирги  $\vartheta_m$ .

Количество испаренной влаги

$$q_{\text{исп}} = W \cdot r = \alpha \Delta \vartheta = \alpha_{\text{исп}} (\vartheta_m - t_c). \quad (5.16)$$

Из этой зависимости можно составить уравнение для определения коэффициента теплообмена от влажной пасты ирги к окружающей среде

$$\alpha_{\text{исп}} = \frac{q_{\text{исп}}}{\vartheta_{\text{м}} - t_{\text{с}}} = \frac{W \cdot r}{\vartheta_{\text{м}} - t_{\text{с}}} \quad (5.17)$$

по формуле

$$W = 0,04075 \nu^{0,8} \Delta p \quad (5.18)$$

или

$$\alpha_{\text{исп}} = \frac{0,04075 \nu^{0,8} \Delta p}{\vartheta_{\text{м}} - t_{\text{с}}} =, \text{кДж/м}^2 \text{к}, \quad (5.19)$$

$$\alpha_{\text{исп}} = \frac{0,04075 \cdot 1,5^{0,8} (47,3 - 0,3) 2264}{80 - 40} = 151,7 \text{кДж/м}^2 \text{к}.$$

В этом уравнения задается предварительная температура пасты ирги  $\vartheta_{\text{м}} = 80$  °С. Упругость насыщенного водяного пара при данной температуре пасты ирги составляет  $p_{\text{нас}} = 47,3$  кПа.

Коэффициент  $\alpha_{\text{исп}}$  можно подсчитать и более точно по формуле А.В. Нестеренко.

Коэффициент теплопередачи от конденсирующегося пара к воздуху

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{конд}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{\text{исп}}}}, \quad (5.20)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{5000} + \frac{0,01}{46,5} + \frac{0,001}{0,52} + \frac{1}{151,7}} = 100,6, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{к}.$$

Проверим принятую выше температуру поверхности пасты ирги. Для стационарного режима

$$q = k = (t_{\text{нас}} - t_{\text{с}}) = \alpha_{\text{исп}} (\vartheta_{\text{м}} - t_{\text{с}}) \quad (5.21)$$

или

$$\Delta \vartheta = (\vartheta_{\text{м}} - t_{\text{с}}) = \frac{k(t_{\text{нас}} - t_{\text{с}})}{\alpha_{\text{исп}}}, \quad (5.22)$$

$$\Delta \vartheta = \frac{100,6(100 - 40)}{151,7} = 39,8 \text{°С},$$

откуда температура пасты ирги

$$\vartheta = t_{\text{с}} + \Delta \vartheta = 40 + 39,8 = 79,8 \approx 80 \text{°С}. \quad (5.23)$$

Количество влаги, испаряемой в сушильной установке

$$W = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2} = 90 \frac{75 - 10}{100 - 10} = 65 \text{ кг/ч.} \quad (5.24)$$

Часовой расход тепла (на подогрев пасты ирги и испарение влаги)

$$Q = 90 \cdot 3,44(79,8 - 15) + 65 \cdot 2264 = 171866 \text{ кДж/ч} = 6,2, \text{ кВт/ч.}$$

Поверхность нагрева вальцовой сушильной установки

$$F = \frac{Q}{k(t_{\text{нас}} - t_c)\varphi} = \frac{6,2 \cdot 10^3}{100,6(100 - 40)0,75} = 1,3 \text{ м}^2, \quad (5.25)$$

где  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий фактическую поверхность соприкосновения пасты ирги с греющей поверхностью вальцов сушильной установки.

Тепловые потери сушильной установки должны быть учтены при определении расхода насыщенного водяного пара. Возможное в эксплуатационных условиях ухудшение теплообмена в цилиндре сушильного аппарата за счет наличия конденсатной пленки и воздуха будет регулироваться повышением давления насыщенного греющего водяного пара или изменением  $t_{\text{нас}}$ .

*Достоинства и имеющие недостатки контактных вакуум-сушильных установок.* Вакуумные контактные сушильные установки применяются для сушки растительного сырья, а также для сушки других веществ. Вследствие их сложности и дороговизны конструктивных особенностей они имеют сравнительно нераспространенное применение. При вакууме воздух обладает способностью поглощать значительные количества паров; например, при давлении  $B=1$  атм, температуре  $30$  °С и относительной влажности  $100\%$  влагосодержание воздуха составляет  $27,7$  г/кг, что подтверждается формулой

$$d = 622 \frac{p_{\text{п}}}{B - p_{\text{п}}}, \quad (5.26)$$

где  $B$  и  $p_{\text{п}}$  – общее давление смеси и парциальное давление водяных паров.

В вакуумных сушильных установках незначительное количество воздуха, проникающее, например, через неплотности конструкции сушильного аппарата, в состоянии поглощать большое количество влаги, испаряемой из растительного сырья. Вместе с тем при вакуумном процессе сушки растительного сырья воздух не является сушильным агентом, а представляет собой балласт, и его присутствие в сушильной камере не улучшает, а ухудшает данный процесс сушки, так как он повышает температуру растительного сырья и усложняет работу конденсатора сушильного аппарата. Механизм вакуумной сушильной установки определяется градиентом давления насыщенного водяного пара, образующегося в объеме высушиваемого растительного сырья и конденсаторе сушильного аппарата. Температура высушиваемого растительного сырья примерно соответствует температуре насыщения или кипения влаги при данном давлении в сушильной камере аппарата. Образующиеся при этом водяные пары вместе с воздухом, проникающим через неплотности корпуса сушильной установки, а также с инертными газами, иногда выделяющимися при сушке растительного сырья, поступают в конденсатор сушильного аппарата, в котором поддерживается более низкое давление, чем в сушильной камере аппарата. Влажный воздух из вакуумной системы сушильной установки удаляется обычно эжектором в атмосферу.

Технологическим преимуществом вакуумных сушильных установок по сравнению с атмосферными сушильными установками является интенсивная сушка при низких температурах, что имеет важное значение для растительного сырья, не выдерживающего высокую температуру. Большое значение может иметь и стерильность рабочей среды сушильного аппарата. Герметичность сушильной камеры аппарата дает гарантию от загрязнения сушеного растительного сырья пылью из окружающей рабочей среды. Имеется также полная возможность исключить выделение вредных паров и газов в окружающую среду. Кроме того, при вакуумном процессе сушки в окружающей среде содержится очень незначительное количество кислорода, что очень важно для растительного сырья, технические условия процесса сушки которого не допускают его присутствия.

Сушка растительного сырья под вакуумом не зависит от атмосферных условий и протекает быстро главным образом вследствие большого (положительного) градиента температур между закрытой – нагреваемой – и открытой поверхностями сушеного растительного

сырья. Если допустить, что температура сушеного сырья на контактной поверхности сушилки при вакууме 0,87 атм равна температуре насыщения водяных паров при данном давлении (вакууме), т.е. равна 54 °С, а давление греющего водяного пара составляет 2 атм и его температура 121 °С, то температурный перепад составит  $121-54=67$  °С, а при атмосферном давлении он равен  $121-100=21$  °С. Если также допустить, что испарение влаги в сушеном растительном сырье пропорционально температурному перепаду, то оно должно увеличиться в вакуумной сушильной установке в 3-3,5 раза.

Как отмечалось выше, при сушке растительного сырья под вакуумом воздух является балластом, а не сушильным агентом и проникает в сушильную установку в ничтожно малых количествах. Тепловые потери с этим воздухом можно практически не учитывать в расчете теплового баланса сушильного аппарата, тогда как в атмосферных сушильных установках 25-40% всего вводимого тепла уносится нерационально с сушильным агентом. Например, если на испарение 1 кг влаги при вакуумной сушке при температуре 40 °С необходимо затратить 2397 кДж, то в воздушной атмосферной сушилке – 3230, 3457 и 3867 кДж.

В сушильных аппаратах под вакуумом имеется возможность более полного улавливания ценных или вредных паров, выделяющихся при сушке растительного сырья. Вместо дорогой абсорбционной сушильной установки, применяющейся для этой цели при атмосферной сушке сырья, при сушке под вакуумом применим более дешевый и радикальный способ – конденсация летучих растворителей (до 95%). Наконец, при сушке сырья под вакуумом потери высушиваемого растительного сырья в виде пыли меньше и соответственно меньше пожаро-, взрывоопасность.

К недостаткам сушильных установок под вакуумом следует отнести большую стоимость сушильного аппарата вследствие сложности исполнения его конструктивных особенностей и наличия дополнительной специальной установки для конденсации, а также трудность наблюдения за процессом сушки растительного сырья. Поэтому вакуумные сушильные установки применяются только там, где по технологическим причинам невозможно осуществить сушку сырья под атмосферным давлением.

*Тепловые балансы вакуумных сушильных установок и продолжительность контактной сушки растительного сырья*  
*Вакуумные сушилки непрерывного действия. Тепловой баланс вакуумных сушильных установок непрерывного действия*

$$D i_1 + W \vartheta_1 + c_m'' G_2 \vartheta_1 = W i_2 + c_m'' G_2 \vartheta_2 + D i_k + Q_5, \quad (5.27)$$

где  $D$  – часовой расход греющего водяного пара, кг/с;

$W$  – количество испаренной влаги, кг/с;

$G_2$  – вес растительного сырья после его сушки, кг/с;

$\vartheta_1, \vartheta_2$  – температуры испаренной влаги и растительного сырья после сушки, °С;

$c_m''$  – теплоемкость растительного сырья, кДж/кг·град;

$i_1, i_2$  и  $i_k$  – энтальпии греющего водяного пара, вторичного пара (полученного из растительного сырья) и конденсата, кДж/кг;

$Q_5$  – потери тепла в окружающую среду, кДж/ч.

При составлении тепловых балансов пренебрегают потерей тепла с уходящим воздухом, просачивающимся через неплотности рабочей камеры сушильной установки, ввиду незначительной величины этой потери. Эту потерю учитывают в общем коэффициенте при определении действительного расхода тепла и поверхности теплообмена сушильной установки.

Расход тепла на 1 кг испаренной влаги

$$q = \frac{D}{W} (i_1 - i_k) = (i_2 - \vartheta_1) + \frac{G_2 c_m''}{W} (\vartheta_2 - \vartheta_1) + \frac{Q_5}{W}, \quad (5.28)$$

или в сокращенной записи

$$q = q_1 + q_m + q_5, \text{ кДж/кг испаренной влаги.} \quad (5.29)$$

*Вакуумные сушильные установки периодического действия*

В вакуумных сушильных установках периодического действия расход тепла в период нагрева влаги в период нагрева, кДж/кг

$$q' = \frac{q_6 + q_m + q_5' + q_1'}{\tau_1}. \quad (5.30)$$

Расход тепла в период сушки, кДж/кг

$$q'' = \frac{q_1 + q_5''}{\tau_2} = \frac{i_2 - \vartheta_1 + q_5''}{\tau_2}, \quad (5.31)$$

где  $q_6$  – расход тепла на нагрев ограждений, кДж/кг;

$q_m$  и  $q_5$  – те же величины, которые были указаны выше, но они определяются, как и  $q_6$ , по формулам для нестационарного режима;

$\tau_1$  – продолжительность прогрева, ч;

$\tau_2$  – продолжительность сушки растительного сырья, ч;

$q_1'$ , и  $q_1$  – расходы тепла на испарение влаги в периоды нагрева и сушки растительного сырья, кДж/кг;

$\vartheta_1$  – температура растительного сырья перед процессом сушки сырья, °С;

$i_2$  – энтальпия водяных паров, кДж/кг;

$q_5'$  и  $q_5''$  – потери тепла ограждениями сушилки растительного сырья в периоды нагрева и процесса сушки, кДж/кг.

При контактной сушке толщина растительного сырья уменьшается. Особенно значительное уменьшение толщины (в 6-8 раз) наблюдается при контактной сушке коллоидного сырья. Однако, несмотря на уменьшение толщины сушеного сырья, скорость сушки также уменьшается, так как значительно снижаются температурный напор и коэффициент теплообмена при повышении температуры растительного сырья и ухудшении контакта с поверхностью нагрева. Ввиду крайней сложности процесса сушки и трудности его математического описания в настоящее время продолжительность контактной сушки определяют по опытным значениям напряжения контактной поверхности

$$A = \frac{W}{F\tau}. \quad (5.32)$$

Диаметр вальцовой сушильной установки для приближенных расчетов может быть определен по формуле

$$D_D = \frac{G_1}{60\pi n l \delta \gamma k}, \quad (5.33)$$

где  $G_1$  – часовая производительность сушилки, кг/ч;

$n$  – число оборотов вальца, об/мин;

$l$  – длина цилиндра, м;  
 $\delta$  – толщина слоя растительного сырья на вальце сушильной установки, м;  
 $\gamma$  – удельный вес растительного сырья, кг/м<sup>3</sup>;  
 $k$  – 0,8-0,9 – коэффициент, учитывающий долю поверхности вальца, занятую растительным сырьем.

## 5.2. Расчет конвективных сушилок

При проектировании сушильной установки для растительного сырья необходимо выполнить следующие условия:

а) составить принципиальную схему сушильной установки и нанести на нее параметры процесса сушки, как заданные, так и те, которые необходимо определить;

б) составить материальный баланс и расчетным путем определить общее количество влаги, которое необходимо испарить в течение 1 ч;

в) если сушильная установка работает на смеси воздуха с топочными газами, то необходимо определить: теоретически необходимый расход воздуха на 1 кг сжигаемого топлива; коэффициент избытка воздуха (с учетом местонахождения проектируемой сушильной установки) для обеспечения получения топочных газов необходимой температуры, уходящих из топочного устройства сушильного аппарата; влагосодержание и энтальпию полученных топочных газов, уходящих из топочного устройства и поступающих в сушильную камеру установки;

г) построить процесс сушки на  $Id$ -диаграмме и определить необходимый расход сухого газа или воздуха для сушки растительного сырья. Для этого определить расход тепла на нагрев сушеного материала; величину потерь в окружающую среду, расход тепла на испарение 1 кг влаги; суммарные тепловые потери  $\Delta$  в сушильной камере установки;

д) по значению  $\Delta$  и заданным значениям начальных параметров сушильного агента и его конечных параметров  $t_2$  или  $\varphi_2$  построить процесс в  $Id$ -диаграмме и найти параметры сушильного агента на выходе из сушильной камеры проектируемой установки;

е) по количеству влаги, испаренной в сушильной установке, рассчитать часовой расход сушильного агента на 1 кг испаренной влаги, а также часовое и общее количество тепла на сушку растительного сырья;

ж) определить удельные объемы влажного газа на входе и выходе из проектируемой сушильной установки, отнесенные к 1 кг сухого газа;

з) по часовому расходу и количеству сушильного агента в проектируемой сушильной установке и напору, необходимому для преодоления аэродинамических сопротивлений в сушильной установке, подобрать соответствующий тип вентилятора, а по часовому расходу сушильного агента – необходимый калорифер (если сушильный агент – воздух) или топку (если сушильный агент – смесь топочных газов с воздухом).

Такой порядок теплового расчета характерен для туннельных или коридорных сушильных установок, где продолжительность процесса сушки растительного сырья определяется режимом сушки.

В настоящее время для сушки пищевого растительного сырья широко используются сушильные установки, в которых для подвода тепла в сушильную камеру установки и отвода водяных паров используется воздух, играющий роль сушильного агрегата. По изменению его состояния, вследствие контакта с влажным высушиваемым сырьем, можно судить о ряде показателей процесса сушки, далее представлены основные параметры влажного воздуха.

Абсолютная влажность воздуха – это масса водяного пара, содержащегося в воздухе, приходящегося на единицу объема, кг/м<sup>3</sup>.

Относительная влажность воздуха  $\varphi$  по смыслу представляет собой отношения массы водяного пара  $\rho_n$ , находящегося в 1 м<sup>3</sup> воздуха, к максимально возможной массе  $\rho_n$  при той же температуре и давлении

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n} 100\%, \quad (5.34)$$

где  $\varphi$  является важнейшим параметром состояния, так как характеризует способность воздуха поглощать водяной пар. С повышением температуры воздуха его сушильная способность возрастает в результате того, что увеличивается  $\rho_n$  и, как следствие, падает  $\varphi$ .

Влагосодержанием воздуха  $x$  (кг/кг) называют отношение массы водяного пара, находящегося в воздухе, к массе сухого воздуха, которое можно определить по формуле

$$x = 0,622 \frac{p_n}{B-p_n}, \quad (5.35)$$

где  $B$  – барометрическое давление, Па;

$\rho_{\text{п}}$  – парциальное давление водяных паров в воздухе, Па;

$\rho_{\text{н}}$  – давление насыщенных паров в воздухе, Па.

Энтальпия воздуха  $J$  (кДж/кг) представляет собой сумму энтальпий 1 кг сухого воздуха и находящейся в ней массы водяного пара  $x$

$$J = C_{\text{св}} t + x J_{\text{н}}, \quad (5.36)$$

где  $C_{\text{св}}$  – удельная теплоемкость сухого воздуха, кДж/кг·К;

$t$  – температура воздуха, °С;

$J_{\text{н}}$  – энтальпия водяного пара, кДж/кг.

Определение параметров состояния по приведенным формулам можно избежать, пользуясь диаграммой  $J$ - $x$  влажного воздуха, предложенной Л.К. Рамзиным.

Общая схема сушильной установки представлена на рисунке 5.1.

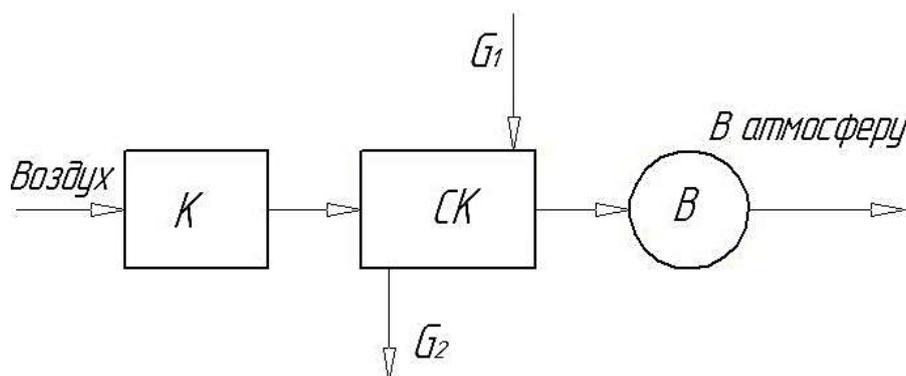


Рисунок 5.1 – Общая схема сушильной установки:  
К – калорифер; СК – сушильная камера; В – вентилятор

Сушильные установки могут работать периодически и непрерывно, при периодической работе в сушилку загружают определенное количество растительного сырья  $G_1$  а через некоторое время выгружают высушенное сырье  $G_2$ , при непрерывной сушке загрузка и выгрузка сырья производится постоянно (тогда  $G_1$  и  $G_2$  – производительность сушилки по влажному и высушенному сырью, кг/ч и кг/с соответственно). Разность  $G_1 - G_2$  представляет количество удаленной из сырья влаги или производительность сушильной установки по влаге. Влажность поступающего растительного сырья  $G_1$  и  $U_1$ , влажность высушенного растительного сырья  $U_2$ . Количество испаряемой влаги в процессе сушки

$$W = \frac{U_1 G_1}{100} - \frac{U_2 G_2}{100}, \quad (5.37)$$

где  $G_1$  и  $U_1$  – влажность поступающего растительного сырья;  
 $U_2$  – влажность высушенного растительного сырья.

Количество высушенного растительного сырья можно выразить

$$G_2 = G_1 - W. \quad (5.38)$$

Решая совместно оба уравнения, получим

$$W = G_1 \frac{U_1 - U_2}{100 - U_2}. \quad (5.39)$$

Массовый расход воздуха  $L$  на сушку пищевого растительного сырья определяют в зависимости от производительности сушильной установки по испаряемой влаге

$$L = W \cdot e, \quad (5.40)$$

где  $e$  – удельный расход воздуха (кг/кг влаги), рассчитывают по формуле

$$e = \frac{1}{x_2 - x_1}, \quad (5.41)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  – влагосодержание воздуха на входе в сушильную установку и выходе из нее.

Расход теплоты при конвективной сушке рассчитывают по уравнению

$$Q = Q_{\text{ув}} + Q_{\text{мат}} + Q_{\text{тр}} - W_{\text{св}} \nu_1 + Q_{\text{пот}}, \text{ кДж}. \quad (5.42)$$

Расход теплоты на нагревание холодного воздуха (кДж)

$$Q = L(i_1 - i_0), \quad (5.43)$$

где  $i_1$  – энтальпия воздуха, поступающего в камеру сушильной установки;

$i_0$  – энтальпия атмосферного воздуха.

Количество теплоты, уходящее из сушильной камеры установки с воздухом (кДж)

$$Q_{yв} = L(i_2 - i_0), \quad (5.44)$$

где  $i_2$  – энтальпия уходящих газов.

Количество теплоты, расходуемое на нагрев растительного сырья

$$Q_{mat} = G_2 C_2 (v_2 - v_1), \quad (5.45)$$

где  $C_2$  – теплоемкость высушенного растительного сырья;

$v_1$  и  $v_2$  – температура поступающего растительного сырья и высушенного сырья.

Потери тепла на нагревание транспортных устройств

$$Q_{тр} = G_{тр} C_{тр} (v_2 - v_0), \quad (5.46)$$

где  $G_{тр}$  – масса транспортных устройств;

$C_{тр}$  – теплоемкость транспортных устройств;

$C_v$  – теплоемкость воды.

Потери тепла в окружающую среду принимаются за 10–15% от общего расхода тепла или рассчитываются по формуле

$$Q_{пот} = \alpha F \Delta t, \quad (5.47)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от стенки сушилки к воздуху при свободной конвекции принимается 3–9 Вт/м<sup>2</sup>·К;

$F$  – поверхность сушильной камеры установки, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – разность температур между наружной стенкой сушильной установки и воздухом в сушильном цехе.

Наружная температура стенки сушильной установки должна быть равна 40 °С.

*Определение основных параметров конвективной сушильной установки.* Объём сушильной камеры конвективной сушильной установки (м<sup>3</sup>) определяется по формуле

$$V_c = \frac{W}{A}, \quad (5.48)$$

где  $W$  – количество испаряемой влаги, кг/ч;

$A$  – напряженность сушильного пространства, в зависимости от конструкции сушильной установки (барабанная, кипящего слоя, аэ-

рофонтанная) и вида высушиваемого растительного сырья выбирается по табличным данным [4, 10].

Для барабанной сушильной установки диаметр барабана ( $m^2$ ) определяется по формуле

$$D_6 = \sqrt{\frac{V_6}{0,785 w_6 (1-\beta)}}, \quad (5.49)$$

где  $V_6$  – объем влажного воздуха,  $m^3/c$ .

$$V_6 = \iota V_{уд}, \quad (5.50)$$

где  $V_{уд}$  – удельный объем воздуха при температуре выхода из сушильной установки,  $m^3/кг$ ;

$V_6$  – средняя скорость воздуха в барабане сушильной установки, которую принимают в зависимости от размеров и плотности растительного сырья по табличным данным;

$\beta$  – коэффициент заполнения барабана сушильной установки. Для подъемно-полостных насадок  $\beta=0,12-0,14$ , для распределительных  $\beta=0,206$ , для секторных  $\beta=0,275$ .

Длина барабана  $L_6$ , (м) определяется по формуле

$$L_6 = \frac{V_c}{0,785 D^2}, \quad (5.51)$$

отношение длины барабана к его диаметру принимают в пределах от 3,5 до 7.

По рассчитанным  $V_c$ ,  $D_6$ ,  $L_6$  выбирают стандартный барабан сушильной установки.

Действительная скорость воздуха в барабане  $w_{см}$  (м/с) не должна отличаться от расчетной не более чем на 15%. Время прибытия сушеного сырья в сушильную установку  $\tau$  (с) определяется по формуле

$$\tau = \frac{G_M}{G_K + \frac{W}{2}}, \quad (5.52)$$

где  $G_M$  – количество находящегося в сушильной установке растительного сырья, кг;

$G_K$  – количество высушенного растительного сырья, кг/с;

$W$  – количество испаряемой влаги, кг/с.

Количество находящегося в сушильной установке сушеного растительного сырья  $G_M$  (кг) определяется по формуле

$$G_M = V_6 \cdot \beta \cdot \rho_M, \quad (5.53)$$

где  $V_6$  – объём стандартного барабана, м<sup>3</sup>;

$\beta$  – коэффициент заполнения барабана;

$\rho_M$  – насыпная плотность сушеного растительного сырья, кг/м<sup>3</sup> (при отсутствии экспериментальных данных принимаем 0,5 от действительной плотности растительного сырья).

Число оборотов барабана принимается за 1-8 об/мин, угол наклона барабана от 3 до 5°.

При расчете сушильной установки кипящего слоя объём сушильной камеры установки определяется, как для барабанной сушильной установки, только  $A$  (кг/м<sup>3</sup>) выбирается для сушилок кипящего слоя.

Для определения основных размеров сушилки кипящего слоя делается гидродинамический расчет сушилки.

Определение критерия Архимеда при температуре слоя, на 5-15 °С превышающей температуру уходящего из сушильной установки воздуха

$$A_2 = \frac{d_3^3 \cdot \rho_B \cdot g \cdot \rho_M}{\mu_B^2}, \quad (5.54)$$

где  $d_3$  – средний диаметр частиц сушеного растительного сырья, м;

$\rho_M$  – плотность сушеного растительного сырья, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости воздуха, Па·С;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Число псевдооживления ( $\kappa$ ) принимаем в пределах от 3 до 8.

Пористость псевдооживленного слоя

$$E = E_H \cdot K^n, \quad (5.55)$$

где  $K^n$  – пористость неподвижного слоя, равна 0,4; показатель степени  $n=0,08$ ; при  $d \leq 0,3$   $n=0,2$ ; при  $d \leq 2,7$   $n=(0,065-0,5) \cdot d_3$ ; при  $0,3 \leq d_3 \leq 2,7$ .

Критерий Рейнольдса для рабочей скорости

$$Re = \frac{A_z \cdot E^{4,75}}{18 + 0,6 \sqrt{A_z \cdot E^{4,75}}}. \quad (5.56)$$

Рабочую скорость псевдоожижения (м/с) найдем по формуле

$$\omega_{\text{раб}} = \frac{Re \mu^B}{d_{\text{эпв}}}. \quad (5.57)$$

Диаметр решетки сушильного аппарата (м) по формуле

$$D_{\text{реш}} = \sqrt{\frac{L}{0,785 \omega_{\text{раб}} \rho_{\text{в}}}}, \quad (5.58)$$

где  $L$  – расход воздуха на процесс сушки из материального баланса аналогично барабанной сушильной установке, кг сухого воздуха/кг влаги;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха в сушилке при средней температуре, кг/м<sup>3</sup>

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{внх}}}{2}. \quad (5.59)$$

*Высота сушильного аппарата (м).* Высоту кипящего слоя в сушильном аппарате, исходя из практических соображений, принимает в 4 раза больше зоны действия струй

$$h_{\text{стр}} = 20 \cdot d_{\text{отв}}, \quad (5.60)$$

где  $d_{\text{отв}}$  – диаметр отверстий в сушильном аппарате в пределах 2,0-6,0 мм.

Высота сепарационного пространства (м)

$$h_{\text{сеп}} = 4h_{\text{сл}}. \quad (5.61)$$

Высота аппарата под решеткой  $H_{\text{н}}$  (м) должна быть

$$(1,1-1,2) \cdot d_{\text{тр}}, \quad (5.62)$$

где  $d_{\text{тр}}$  – диаметр трубопровода для входа воздуха в сушильный аппарат.

Тогда общая высота сушильного аппарата кипящего слоя (м)

$$H = H_{\text{в}} + H_{\text{н}}. \quad (5.63)$$

Число отверстий в решетке

$$n = \frac{4F_{\text{реш}} \cdot \varphi_{\text{ж.с.}}}{\pi \cdot d_{\text{отв}}^2}, \quad (5.64)$$

где  $\varphi_{\text{ж.с.}}$  – доля живого сечения решетки, принимается в пределах от 0,01 до 0,07;

$F_{\text{реш}}$  – площадь решетки,  $\text{м}^2$ .

Для нормальной работы сушильного аппарата кипящего слоя допустимо, чтобы только 10% частиц сушеного растительного сырья уносились с уходящим из сушильного аппарата воздухом.

Для проверки уноса частиц сушеного растительного сырья с минимальным размером определяем критерий Архимеда при температуре на выходе из сушильного аппарата по приведенной выше формуле.

Находим критерий Лященко при  $E=1$ .

Скорость уноса частиц сушеного растительного сырья, соответствующая скорости витания (м/с), равна

$$\omega_{\text{ВИТ}} = \sqrt{\frac{L_{\text{ВИТ}} \nu_{\text{в}} \rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{в}}}}, \quad (5.65)$$

где  $\nu_{\text{в}}$  – кинетическая вязкость воздуха ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) при температуре выхода из сушильного аппарата.

Действительная скорость воздуха (м/с) сепарационного пространства (для сушильного аппарата с вертикальными стенками)

$$\omega_{\text{реш}} = \frac{V}{F_{\text{реш}}}, \quad (5.66)$$

где  $V$  – объёмный расход газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$F_{\text{реш}}$  – площадь решетки,  $0,785 D_{\text{реш}}^2$ ,  $\text{м}^2$ .

*Пример расчета конвективной сушильной установки*

Барабанная сушильная установка, обогреваемая воздухом.

Задание: спроектировать сушильную установку для сушки брусники.

*Данные для расчета*

Производительность по исходному растительному сырью –  $G_H=800$  кг/ч.

Влажность брусники (на общую массу):

– начальная –  $U_H=25$  %;

– конечная –  $U_K=6$  %.

Температура брусники:

– начальная –  $t_M'=19$  °С;

– конечная –  $t_M''=60$  °С.

Температура воздуха:

– до входа в калорифер –  $t_0=25$  °С;

– на выходе из калорифера (при входе в барабан сушильной установки) –  $t_1=110$  °С;

– на выходе из барабана сушильной установки –  $t_2=60$  °С.

Плотность брусники (насыпная масса) –  $\rho_M=635$  кг/м<sup>3</sup>.

Давление греющего водяного пара –  $P_H=2$  атм.

Напряжение барабана сушильной установки по влаге –  $A=25$  кг/(м<sup>3</sup>·ч).

Коэффициент заполнения барабана сушильной установки –  $\beta=0,15$ .

Насадка барабана сушильной установки – подъемно-лопастная.

Количество испаряемой влаги

$$W = G_H \frac{U_H - U_K}{100 - U_K} = 800 \frac{25 - 6}{100 - 6} = 161,7 \text{ кг/ч.} \quad (5.67)$$

Количество высушенной брусники

$$G_K = G_H - W = 800 - 161,7 = 638,3 \text{ кг/ч.} \quad (5.68)$$

*Размеры сушильного барабана.* Объем барабана (м<sup>3</sup>) сушильной установки рассчитывается по формуле

$$V_{\text{б}} = \frac{W}{A} = \frac{161,7}{25} = 6,5. \quad (5.69)$$

Принимаем  $\frac{L}{d} = 5$ . Диаметр барабана сушильной установки находим из соотношения

$$V_{\text{б}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L = 0,785 \cdot d^2 \cdot 5d = 3,925 \cdot d^3, \quad (5.70)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{б}}}{3,925}} = \sqrt[3]{\frac{6,5}{3,925}} = 1,18 \text{ м}. \quad (5.71)$$

Тогда длина барабана (м) сушильной установки рассчитывается по уравнению

$$L = 5d = 5 \cdot 1,18 = 5,9. \quad (5.72)$$

Выбираем сушильный барабан с диаметром  $d=1,2$  м и длиной  $L=6$  м.

Число оборотов барабана сушильной установки в 1 секунду

$$n = \frac{L}{a\pi d \cdot \text{tg } \alpha}, \quad (5.73)$$

где  $a$  – опытный коэффициент;

$\text{tg } \alpha$  – тангенс угла наклона барабана сушильной установки;

$\tau$  – время пребывания брусники в барабане сушильной установки, с.

Время пребывания брусники в барабане сушильной установки (мин)

$$\tau = \frac{V_{\text{б}} \rho_{\text{ср}} \beta}{G_{\text{ср}}} = \frac{6,5 \cdot 635 \cdot 0,15}{0,2} = 3095,6 \text{ с} = 51,6, \quad (5.74)$$

где  $G_{\text{ср}}$  – средняя масса брусники, проходящая через барабан сушильной установки, кг;

$\beta=0,15$  – коэффициент заполнения барабана сушильной установки;

$\rho_{\text{ср}} \approx \rho_{\text{м}} = 635 \text{ кг/м}^3$  – средняя насыпная плотность сушеного растительного сырья (в данном случае брусники)

$$G_{\text{ср}} = \frac{G_{\text{н}} + G_{\text{к}}}{2} = \frac{800 + 638,3}{2} = 719,15 \text{ кг/ч} = 0,2 \text{ кг/с.} \quad (5.75)$$

Барабаны сушильной установки имеют угол наклона к горизонту  $0,5-6^\circ$ ; принимаем  $\alpha = 2^\circ$ ,  $\text{tg}\alpha = 0,035$ .

Тогда

$$n = \frac{6}{1,2 \cdot 3095,6 \cdot 1,2 \cdot 0,035} = 0,038 \text{ об/с} \approx 2,3 \text{ об/мин,}$$

где  $1,2$  – коэффициент  $a$  для подъемно-лопастной насадки сушильной установки.

Потери тепла в окружающую среду

$$Q_{\text{п}} = F_{\text{бок}}(t_{\text{ст}} - t_0)\alpha, \text{ Вт,} \quad (5.76)$$

где  $F_{\text{бок}}$  – боковая поверхность барабана сушильной установки,  $\text{м}^2$ ;  
 $t_{\text{ст}}$  – температура стенки барабана сушильной установки с внешней стороны,  $^\circ\text{С}$ ;

$t_0$  – температура окружающей среды,  $^\circ\text{С}$ ;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от стенки барабана сушильной установки в окружающую среду,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Он равен

$$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}, \quad (5.77)$$

где  $\alpha_{\text{к}}$  – коэффициент теплоотдачи за счет вынужденной конвекции окружающей среды относительно наружной поверхности вращающегося барабана сушильной установки,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\alpha_{\text{л}}$  – коэффициент теплоотдачи излучением,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Принимаем  $t_{\text{ст}} = 35 \text{ }^\circ\text{С}$  и определяем режим движения окружающего воздуха относительно наружной поверхности барабана сушильной установки

$$\text{Re} = \frac{w_{\text{в}} d_{\text{нар}} \rho_{\text{в}}}{\mu} = \frac{0,156 \cdot 1,3 \cdot 1,185}{0,0188 \cdot 10^{-3}} = 12783, \quad (5.78)$$

где  $w_B = \frac{\pi d_{\text{нар}}^n}{60} = \frac{3,14 \cdot 1,3 \cdot 2,3}{60} = 0,156 \text{ м/с}$  – относительная скорость движения воздуха;

$d_{\text{нар}} = 1,3 \text{ м}$  – в данном случае определяющий размер с учетом возможной толщины тепловой изоляции;

$\rho_B = \rho_0 \frac{T_0}{T} = 1,293 \frac{273}{273 + 25} = 1,185 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха при  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

$\mu = 0,0188 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$  – вязкость воздуха при  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплоотдачи от стенки барабана сушильной установки в окружающую среду за счет вынужденной конвекции

$$\text{Nu} = 0,018 \text{Re}^{0,8} \varepsilon_i = 0,018 \cdot 12783^{0,8} \cdot 1,27 = 44; \quad (5.79)$$

$$\varepsilon_i = 1,27 \text{ (при } \text{Re} = 12783, \frac{L}{d} = 5) [4, 10]; \quad (5.80)$$

$$\alpha_K = \frac{\text{Nu} \lambda_B}{L} = \frac{44 \cdot 0,0261}{1,3} = 0,88 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (5.81)$$

где  $\lambda_B = 0,0261 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$  – теплопроводность воздуха при  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определяем коэффициент теплоотдачи излучением

$$\alpha_{\text{и}} = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \frac{\left[ \left( \frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{ст}} - t_0} = 0,95 \cdot 5,7 \cdot \frac{\left[ \left( \frac{273 + 35}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + 25}{100} \right)^4 \right]}{35 - 25} = 5,95 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (5.82)$$

где  $c_0 = 5,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$  – коэффициент лучеиспускания абсолютного тела;

$\varepsilon = 0,95$  – степень черноты для поверхности, покрытой черной краской.

Коэффициент теплоотдачи от стенки барабана сушильной установки к воздуху

$$\alpha = 0,88 + 5,95 = 6,83 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Определяем необходимую толщину слоя изоляции. В качестве изоляционного материала выбираем шлаковую вату с  $\lambda_2=0,076$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Поверх изоляции толщиной  $\delta_2$  имеется кожух из листового железа ( $\delta_3=1$  мм), покрытый масляной краской. Толщина стенки барабана сушильной установки  $\delta_1=12$  мм. Можно принять  $t_1=t_2=60^\circ\text{C}$  и  $t_3=t_4=35^\circ\text{C}$ . Здесь  $t_1$  и  $t_2$  – температура внутренней и наружной стенок барабана сушильной установки;  $t_3$  и  $t_4$  – температура стенок защитного кожуха.

Расчет ведем по известным формулам теплопроводности через цилиндрическую стенку.

Удельный тепловой поток

$$q_1 = \pi d_{\text{нар}} q_{\text{нар}} = \pi d_{\text{нар}} \alpha (t_4 - t_0) = 3,14 \cdot 1,3 \cdot 6,83 \cdot (35 - 25) = 278,8 \text{ Вт/м.} \quad (5.83)$$

По упрощенной формуле

$$q_1 = \frac{\lambda_2}{\delta_2} \pi d_{\text{ср}} (t_2 - t_3) = \frac{\lambda_2}{\delta_2} \pi (d + 2\delta_1 + \delta_2) \cdot (t_1 - t_3) \quad (5.84)$$

определяем толщину изоляции  $\delta_2$

$$278,8 = \frac{0,076}{\delta_2} \cdot 3,14 \cdot (1,2 + 2 \cdot 0,012 + \delta_2) \cdot (60 - 35).$$

Отсюда  $\delta_2=0,027$  м. Принимаем  $\delta_2=30$  мм.

Уточняем величину наружного диаметра барабана сушильной установки

$$d_{\text{нар}} = 1,2 + 2 \cdot 0,012 + 2 \cdot 0,030 + 2 \cdot 0,001 = 1,286 \text{ м.} \quad (5.85)$$

Наружная поверхность барабана сушильной установки

$$F_{\text{бок}} = \pi d_{\text{нар}} L = 3,14 \cdot 1,286 \cdot 6 = 24,2 \text{ м}^2. \quad (5.86)$$

Тепловые потери в окружающую среду

$$Q_{\text{п}} = \alpha F_{\text{бок}} (t_4 - t_0) = 6,83 \cdot 24,2 (35 - 25) = 1652,86 \text{ Вт.} \quad (5.87)$$

Удельная потеря тепла

$$q_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{п}} \cdot 3600}{W} = \frac{1652,86 \cdot 3600}{161,7} = 36,8 \text{ кДж/кг влаги.} \quad (5.88)$$

Расходы воздуха  $L$ , тепла  $Q_{\text{к}}$  и пара  $G_{\text{п}}$ .

Для определения расхода воздуха и тепла на сушку брусники строим диаграмму сушильного процесса I-x (рис. 5.2).

Для нахождения точки A задается  $t_0=25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_0=50\%$ . Из диаграммы определяем  $I_0=50,7$  кДж/кг сухого воздуха и  $x_0=0,01$  кг влаги/кг сухого воздуха.

Точку B находим по заданной температуре  $t_1=110\text{ }^\circ\text{C}$  и  $x_1=x_0$ , из диаграммы определяем  $I_1=143$  кДж/кг сухого воздуха. Точку C (окончание идеального сушильного процесса) находим по заданной температуре  $t_2=60\text{ }^\circ\text{C}$  и  $I_2=I_1$ . Чтобы найти направление реального процесса в сушилке из произвольной точки e, лежащей на линии теоретического процесса (точка e должна лежать ближе к точке C, чтобы величина отрезков, которые участвуют в графическом расчете сушилки, были по возможности больше), опускаем перпендикуляр ef на линию AB, измеряем его и определяем величину отрезка eE по формуле

$$eE=ef\Delta, \quad (5.89)$$

где  $\Delta=c_B t'_M+q_d - \sum q$  кДж/кг влаги;

$C_B$  – теплоемкость воды, кДж/(кг·К);

$q_d$  – дополнительный подвод тепла, кДж/кг влаги (в барабанной сушилке  $q_d=0$ );

$\sum q$  – сумма потерь тепла (с высушенным сырьем, в окружающую среду и с транспортными приспособлениями), кДж/кг влаги.

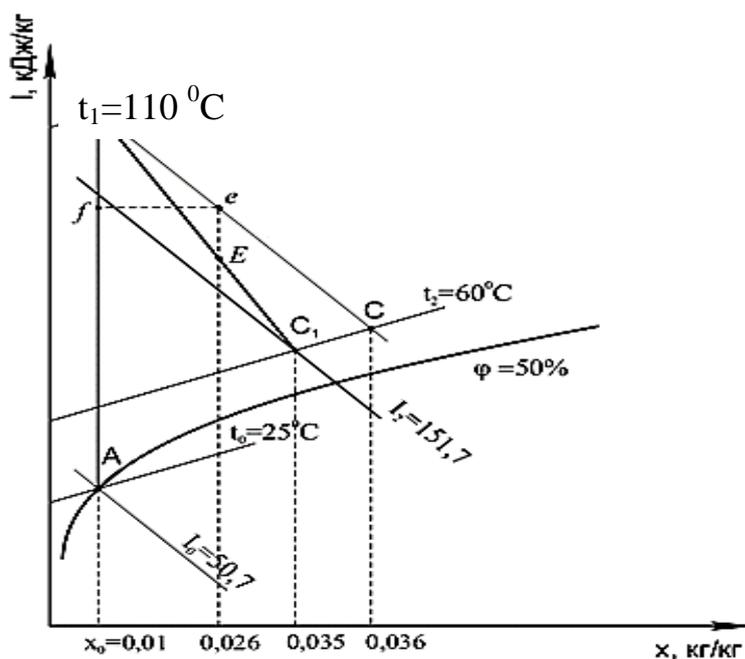


Рисунок 5.2 – Схема определения расхода воздуха и тепла в калорифере

В барабанной сушильной установке потерь тепла, связанных с транспортными потерями, нет.

Потери тепла с высушенной брусникой

$$q_M = \frac{G c''_M (t''_M - t'_M)}{W}, \quad (5.90)$$

где  $C''_M = 1,293$  кДж/(кг·К) – теплоемкость сухой брусники (табл. П.2).

После подстановки получаем

$$q_M = \frac{638,3 \cdot 1,293 \cdot (60 - 25)}{161,7} = 178,6 \text{ Дж/кг влаги.}$$

Определяем отрезок  $eE$

$$\begin{aligned} eE &= ef \Delta = (x'_2 - x_0) \cdot [C_B t'_M - (q_M + q_{II})] = \\ &= (0,026 - 0,01) \cdot [4,19 \cdot 19 - (174,5 + 36,8)] = -2,1 \text{ кДж/кг сухого воздуха,} \end{aligned} \quad (5.91)$$

где  $ef = x'_2 - x_0$  берется для произвольно выбранной точки  $e$  на линии  $I_1 = \text{const}$  (рис. 5.2);

$C_B = 4,19$  кДж/(кг·К) – теплоемкость влаги при  $t'_M = 19$  °С.

Если  $\Delta > 0$ , происходит дополнительный подогрев, и отрезок  $eE$  откладывается от точки  $e$  вертикально вверх; в данном случае  $\Delta < 0$ , поэтому отрезок  $eE$  откладываем вниз. Точку  $B$  соединяем с полученной точкой  $E$  и продолжаем прямую до пересечения с заданной изотермой  $t_2$ . Полученная точка  $C_1$  характеризует состояние воздуха после процесса сушки:

- $I_2 = 141,7$  кДж/кг сухого воздуха;
- $x_2 = 0,030$  кг влаги/кг сухого воздуха.

Расход сухого воздуха

$$L = W \cdot l = W \frac{1}{x_2 - x_0} = 161,7 \frac{1}{0,030 - 0,01} = 8085 \text{ кг/ч.} \quad (5.92)$$

Объем влажного воздуха  $V$  ( $\text{м}^3$ ), проходящего через сушильную установку за 1 ч, рассчитываем по формуле

$$V = L v_{уд}, \quad (5.93)$$

где  $v_{уд}$  – удельный объем влажного воздуха, отнесенный к 1 кг сухого воздуха,  $\text{м}^3/\text{кг}$  сухого воздуха

$$v_{уд} = \frac{R_B T}{P_{об} - \varphi P_{нас}} = \frac{R_B T}{P_{об} - P_{п}}, \quad (5.94)$$

где  $R$  – газовая постоянная для воздуха, равная  $287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;

$T$  – абсолютная температура воздуха,  $\text{К}$ ;

$P_{об}$  – общее давление паровоздушной смеси,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$P_{п} = \varphi \cdot P_{нас}$  – парциальное давление водяного пара,  $\text{Н}/\text{м}^2$ .

Принимаем общее давление  $P_{об} = 745 \text{ мм рт. ст.}$

На входе в калорифер  $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $x_0 = 0,010 \text{ кг влаги}/\text{кг сухого воздуха}$ ,  $P_{п} = 11,5 \text{ мм рт. ст.}$

$$V_1 = 8085 \frac{287 \cdot (273 + 25)}{(745 - 11,5) \cdot 133,3} = 7077 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

На выходе из калорифера  $t_1 = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $x_1 = x_2 = 0,010 \text{ кг влаги}/\text{кг сухого воздуха}$ ,  $P_{п} = 11,5 \text{ мм рт. ст.}$

$$V_2 = 8085 \frac{287 \cdot (273 + 110)}{(745 - 11,5) \cdot 133,3} = 9095 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

При выходе из барабана сушильной установки  $t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $x_2 = 0,030 \text{ кг влаги}/\text{кг сухого воздуха}$ ,  $P_{п} = 41 \text{ мм рт. ст.}$

$$V_3 = 8085 \frac{287 \cdot (273 + 60)}{(745 - 41) \cdot 133,3} = 7908 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Расход тепла в калорифере

$$Q_K = W q_K = W \frac{I_1 - I_0}{x_2 - x_0} = 161,7 \frac{143 - 50,7}{(0,030 - 0,010)} = 743820 \text{ кВт}\cdot\text{ч}. \quad (5.95)$$

Расход пара в калорифере

$$G_{п} = \frac{Q_K}{r} = \frac{743820}{2208} = 336,8 \text{ кг}\cdot\text{ч}, \quad (5.96)$$

где  $r = 2208$  кДж/кг – теплота парообразования при  $P = 2$  атм.

*Выбор и расчет калорифера.* Для подогрева до  $110$  °С воздуха, поступающего в сушильную установку, применяют воздухонагреватели с большой поверхностью теплообмена и малым гидравлическим сопротивлением. Наиболее подходят для этого кожухотрубные и пластинчатые (с ребристой структурой) калориферы, применяемые для подогрева воздуха.

Применяют для расчета кожухотрубный калорифер. Расчет такого калорифера ничем не отличается от типового расчета кожухотрубного теплообменника.

Необходимая поверхность нагрева  $F$  ( $\text{м}^2$ ), определяется по формуле

$$F = \frac{Q_K}{K \Delta t_{cp}}, \quad (5.97)$$

где  $K$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ );

$\Delta t_{cp}$  – средняя разность температур между теплоносителями, °С.

Принимают в качестве источника тепла насыщенный водяной пар:  $P = 2$  атм;  $t_{п} = 119,6$  °С.

Температурные условия процесса:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\begin{array}{c} 119,6 \text{ °С} \text{ ————— } 119,6 \text{ °С;} \\ 25 \text{ °С} \text{ ————— } 110 \text{ °С;} \\ (119,6 - 25) - (119,6 - 110) \end{array}}{2,3 \lg \frac{94,6}{96}} = 37,1 \text{ °С.}$$

Принимают турбулентный режим движения воздуха по трубному пространству. Диаметр труб  $d = 25 \times 2$  мм. Для предварительного расчета полагают  $Re = 20000$ .

Из выражений

$$Re = \frac{w d \rho}{\mu} \text{ и } w = \frac{G_B}{3600 \cdot 0,785 d^2 n \rho} \quad (5.98)$$

определяют

$$n = \frac{G_B}{3600 \cdot 0,785 d Re \mu} = \frac{8085}{3600 \cdot 0,785 \cdot 0,021 \cdot 0,025 \cdot 10^{-3} \cdot 20000} = 264, \quad (5.99)$$

где  $G_B = L \cdot (1 + 0,010) = 6468(1 + 0,010) = 6532,7$  кг влажного воздуха/ч;  
 $\mu = 0,025 \times 10^{-3}$  Н·с/м<sup>2</sup> – вязкость воздуха при

$$t_{cp} = \frac{t_0 + t_1}{2} = \frac{25 + 110}{2} = 67,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Выбираем 2-ходовой теплообменник типа «ТК» с общим числом труб  $n=442$  и диаметром  $D=600$  мм.

Уточняем значение критерия Рейнольдса

$$Re = \frac{G_B}{3600 \cdot 0,785 \cdot d \cdot n \cdot \mu} = \frac{8085}{3600 \cdot 0,785 \cdot 0,021 \cdot 0,025 \cdot 10^{-3} \cdot 221} = 21244. \quad (5.100)$$

Для турбулентного движения воздуха в трубах

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8}, \quad (5.101)$$

откуда

$$Nu = 0,018 \cdot 21244^{0,8} = 52,1, \\ \alpha_B = \frac{Nu \cdot \lambda}{\alpha} = \frac{52,1 \cdot 0,03}{0,021} = 74,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (5.102)$$

где  $\lambda = 0,03025$  Вт/(м·К) – теплопроводность воздуха при  $67,5$  °С.

Так как коэффициент теплоотдачи со стороны пара, конденсирующегося на наружной поверхности труб в межтрубном пространстве, достаточно велик и основное термическое сопротивление будет сосредоточено со стороны воздуха ( $\alpha_k \gg \alpha_B$ ), то можно принять  $\alpha_k = 12000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Принимают тепловую проводимость загрязнений со стороны накипи  $\left( \frac{1}{r_{загр1}} \right)$  и со стороны нагреваемого воздуха  $\left( \frac{1}{r_{загр2}} \right)$  равными соответственно 5000 и 2320 Вт/(м<sup>2</sup>·К), а теплопроводность стали  $\lambda_{ст} = 46,4$  Вт/(м·К). Тогда

$$\Sigma r_{ст} = r_{загр1} + r_{ст} + r_{загр2} = \frac{1}{5000} + \frac{0,002}{46,4} + \frac{1}{2320} = 0,000674 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}. \quad (5.103)$$

Общий коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum r_{\text{ст}} + \frac{1}{\alpha_{\text{к}}}} = \frac{1}{\frac{1}{74,5} + 0,000674 + \frac{1}{12000}} = 63 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (5.104)$$

Необходимая поверхность нагрева калорифера

$$F = \frac{Q_{\text{к}}}{K \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{743820}{63 \cdot 37,1} = 308 \text{ м}^2. \quad (5.105)$$

Устанавливают один 2-ходовой кожухотрубный теплообменник типа «ТК» со следующей характеристикой: поверхность  $F = 312 \text{ м}^2$ , диаметр кожуха  $D = 800 \text{ мм}$ , число труб  $n = 442$ , длина трубы  $l = 9,0 \text{ м}$ , диаметр трубы  $d = 25 \times 2 \text{ мм}$ .

*Расчет циклона.* Выбираем циклон типа ЦН-15.

Принимая  $\Delta p / \rho_{\text{г}} = 740$ , диаметр циклона найдем по формуле

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785 w_{\text{ц}}}}, \quad (5.106)$$

предварительно определив условную скорость газа в цилиндрической части циклона  $w_{\text{ц}}$  из уравнения,  $\frac{\Delta p}{\rho_{\text{г}}} = \frac{\zeta_0 w_{\text{ц}}^2}{2}$ , где  $\zeta_0 = 160$  [4, 10].

$$w_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{740 \cdot 2}{160}} = 3,04 \text{ м/с}.$$

Плотность воздуха

$$\rho_{\text{г}} = 1,293 \cdot \left(\frac{273}{373}\right) = 1,05 \text{ кг/м}^3.$$

Следовательно,

$$D = \sqrt{\frac{8085}{0,785 \cdot 3,04 \cdot 1,05 \cdot 3600}} = 0,95 \text{ м}.$$

Принимаем диаметр циклона равным 0,9 м.

Гидравлическое сопротивление циклона

$$\Delta p_{\text{ц}} = \frac{\zeta_0 (\rho_{\text{г}} \cdot w_{\text{ц}}^2)}{2} = \frac{160 \cdot (1,05 \cdot 3,04^2)}{2} = 776 \text{ Па}. \quad (5.107)$$

*Расчет гидравлического сопротивления калорифера.* Средняя температура газа по теплообменнику  $t=92,5$  °С;  $\mu=0,021 \cdot 10^{-3}$  Па·с. Абсолютное давление воздуха в калорифере принимают 800-810 мм рт. ст. Находим плотность воздуха при данной температуре

$$\rho = \rho_0 \frac{P T_0}{P_0 T} = 1,29 \frac{1,06 \cdot 10^5 \cdot 273}{1,013 \cdot 10^5 \cdot 365,5} = 1,01 \text{ кг/м}^3. \quad (5.108)$$

Скорость воздуха в трубах  $w_{тр}$ , м/с, находим по уравнению

$$w_{тр} = \frac{4 \cdot G_e \cdot Z}{\pi \cdot d^2 \cdot n \cdot \rho_e}, \quad (5.109)$$

где  $Z$  – число ходов,  
 $n$  – число труб.

$$w_{тр} = \frac{4 \cdot 6532,7 \cdot 1}{3,14 \cdot 0,021^2 \cdot 221 \cdot 1,01 \cdot 3600} = 20 \text{ м/с.}$$

При  $Re_{тр} > 2300$  коэффициент трения  $\lambda$  определяется по формуле

$$\lambda = 0,25 \cdot \left\{ \lg \left[ \frac{e}{3,7} + \left( \frac{6,81}{Re_{тр}} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2}. \quad (5.110)$$

Принимаем  $\Delta=0,2$  мм.

$$e = \frac{\Delta}{d} = \frac{0,2}{21} = 0,0095. \quad (5.111)$$

Тогда

$$\lambda = 0,25 \cdot \left\{ \lg \left[ \frac{0,0095}{3,7} + \left( \frac{6,81}{17133} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2} = 0,04.$$

Коэффициент местных сопротивлений потоку, движущемуся в трубном пространстве:

$\xi_1=1,5$  – входная и выходная камеры;

$\xi_2=1,0$  – вход в трубы и выход из них.

$$\sum \xi = 1,5 + 1 \cdot 1 = 2,5.$$

Скорость газа в штуцерах

$$w_{шт.} = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot d^2 \cdot \rho}, \quad (5.112)$$

$d = 200$  мм,

$$w_{шт.} = \frac{4 \cdot 6532,7}{3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 1,01 \cdot 3600} = 57 \text{ м/с.}$$

Гидравлическое сопротивление трубного пространства

$$\begin{aligned} \Delta P_{тр} = & \left( \lambda \frac{LZ}{d} + \sum \xi \right) \cdot \frac{w_{тр}^2 \cdot \rho_{тр}}{2} + \\ & + [2,5 \cdot (Z - 1) + 2Z] \cdot \frac{\rho_{тр} w_{тр}^2}{2} + 3 \frac{\rho_{тр} \cdot w_{шт}^2}{2} = 7370 \text{ Па.} \end{aligned} \quad (5.113)$$

*Расчет рукавного фильтра.* Поверхность фильтрования  $F_{рф}$  ( $m^2$ ), определяют по формуле

$$F_{рф} = \frac{V_{г} + V_{пр} + V_{пв}}{w_{г}}, \quad (5.114)$$

где  $V_{г}$  – расход запыленного газа,  $m^3/c$ ;

$V_{г} = V_3$ ;  $V_{пр}$  – расход продувочного газа,  $m^3/c$ ;

$V_{пр} = (0,1 \div 0,2) V_{г}$ ;

$V_{пв}$  – расход подсасываемого в аппарат воздуха,  $m^3/c$ , принимается на 10% больше расхода газа;

$V_{пв} = (1,05 \div 1,1) V_{г}$ ;

$W_{г} = (0,8 \div 1,0) \cdot 10^{-2} m^3/m^2 \cdot c$  – допустимая удельная нагрузка тканевого фильтра по газу.

$V_{г} = V_3 = 8085 m^3/ч$ ;

$V_{пр} = 0,15 \cdot 8085 = 988 m^3/ч$ ;

$V_{пв} = 1,05 \cdot 8085 = 6916 m^3/ч$ ;

$w_{г} = 0,9 \cdot 10^{-2} m^3/m^2 \cdot c$ ,

тогда

$$F_{\text{рф}} = \frac{8085 \cdot 988 \cdot 6916}{3600 \cdot 0,9 \cdot 10^{-2}} = 516 \text{ м}^2.$$

Принимаем фильтр с обратной посекционной продувкой ФР-518 с фильтрующей поверхностью  $F=518 \text{ м}^2$  [4, 10].

Обычно для рукавных фильтров  $\Delta P=1-3 \text{ кПа}$ .

*Выбор вентилятора.* Мощность, потребляемая вентилятором  $N(\text{кВт})$ , определяется по формуле

$$N = \frac{\Delta P V}{1000 \eta}, \quad (5.115)$$

где  $V$  – подача вентилятора,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\Delta P$  – полное сопротивление сушильной установки с учетом скоростного напора,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$\eta=\eta_{\text{в}}\eta_{\text{пр}}$  – общий КПД вентиляторной установки.

$$V=V_2=8085 \text{ м}^3/\text{ч}=2,2 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\Delta P = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{м.с}} + \Delta P_{\text{суш}} + \Delta P_{\text{кал}} + \Delta P_{\text{ц}} + \Delta P_{\text{ск}} + \Delta P_{\text{р.ф.}}, \quad (5.116)$$

где  $\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{w_{\text{в}}^2 \rho}{2}$  – сопротивление трения воздухопроводов,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$\Delta P_{\text{м.с.}} = \sum \xi \frac{w_{\text{в}}^2 \rho}{2}$  – местные сопротивления,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$\Delta P_{\text{суш}}$  – сопротивление сушильной установки,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$\Delta P_{\text{кал}}$  – сопротивление калориферов,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$\Delta P_{\text{ц}}$  – сопротивление циклонов,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$\Delta P_{\text{ск}} = \frac{w_{\text{в}}^2 \rho}{2}$  – скоростное давление,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$\Delta P_{\text{р.ф.}}$  – сопротивление рукавного фильтра,  $\text{Н}/\text{м}^2$ .

В соответствии со схемой сушильной установки принимают следующие исходные данные для расчета:

Общая длина воздухопроводов – 25 м.

Количество задвижек – 2 шт.

Количество отводов под углом  $90^\circ$  – 5 шт.

Диафрагма с модулем 0,5 – 1 шт.

Скорость газов в трубопроводах допускается в пределах 10-20 м/с; принимают  $w_B=15$  м/с.

Из уравнения расхода находим диаметр воздухопровода между аппаратами

$$d' = \sqrt{\frac{V_2}{0,785w_B}} = \sqrt{\frac{2,2}{0,785 \cdot 15}} = 0,42 \text{ м.} \quad (5.117)$$

Принимаем трубопровод из углеродистой стали диаметром  $426 \times 11$  мм [4, 10].

Уточняем скорость движения воздуха

$$w = \frac{V}{0,785d^2} = \frac{2,2}{0,785 \cdot (0,404)^2} = 16,4 \text{ м/с,} \quad (5.118)$$

скоростное давление

$$\Delta P_{\text{ск}} = \frac{w_B^2 \rho}{2} = \frac{16,4^2 \cdot 0,988}{2} = 133 \text{ Н/м}^3, \quad (5.119)$$

где  $\rho = \frac{G_B}{0,5(V_1 + V_2)} = \frac{7075}{0,5(8085 + 995)} = 0,988 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха при  $t_{\text{ср}}=67,5$  °С,

$$\Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{м.с.}} = \frac{w_B^2 \rho}{2} \left( \lambda \frac{L}{d} + \sum \xi_i \right) = 133 \left( \lambda \frac{L}{d} + \sum \xi_i \right),$$

и предварительно подсчитывается критерий Re

$$\text{Re} = \frac{w_B d \rho}{\mu} = \frac{16,4 \cdot 0,404 \cdot 0,988}{0,025 \cdot 10^{-3}} = 261843, \quad (5.120)$$

где  $\mu=0,025 \cdot 10^{-3}$  Н·с/м<sup>2</sup> – вязкость воздуха при 67,5 °С.

При Re=261843 коэффициент трения  $\lambda=0,018$ .

Для отводов под углом 90° и задвижек находят, что  $\xi_i=0,15$ , для диафрагмы  $\xi=4,00$ , следовательно,

$$\Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{м.с.}} = 133 \cdot \left( 0,018 \cdot \frac{25}{0,404} + 2 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 1 \cdot 4,00 \right) = 820 \text{ Н/м}^2. \quad (5.121)$$

Сопротивление барабанных сушилок колеблется в пределах 10-20 мм вод. ст.

Принимаем

$$\Delta P_{\text{суш}} = 15 \text{ мм вод. ст.} = 15 \cdot 9,81 = 147 \text{ Н/м}^2.$$

Сопротивление циклона

$$\Delta P_{\text{ц}} = 703 \text{ Н/м}^2.$$

Сопротивление калорифера

$$\Delta P_{\text{кал}} = 7370 \text{ Н/м}^2.$$

Сопротивление рукавного фильтра

$$\Delta P_{\text{р.ф.}} = 1000 \text{ Н/м}^2.$$

Тогда полное сопротивление сушильной установки

$$\Delta P = 820 + 147 + 7370 + 703 + 133 + 1000 = 10173 \text{ Н/м}^2.$$

Мощность, потребляемая вентилятором,

$$N = \frac{\Delta P \cdot V}{1000 \eta} = \frac{2,1 \cdot 10173}{1000 \cdot 0,94} = 22,7 \text{ кВт}, \quad (5.122)$$

где  $\eta = 0,94$  – принятый КПД вентилятора.

Устанавливаем газодувку марки ТВ-150-1.12 со следующей характеристикой:

Производительность –  $2,5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Давление –  $12000 \text{ Па}$ .

Число оборотов –  $48,3 \text{ с}^{-1}$ .

Мощность –  $55 \text{ кВт}$ .

*Мощность привода барабанной сушилки*

Ориентировочно необходимая для вращения барабана сушильной установки мощность (кВт) может быть определена по формуле

$$N = 0,078 d^3 L \rho_m \sigma n \quad (5.123)$$

где  $d$  – диаметр барабана сушильной установки, м;

$L$  – длина барабана сушильной установки, м;

$\rho_m$  – насыпная плотность брусники,  $\text{кг/м}^3$ ;

$n$  – число оборотов барабана сушильной установки в 1 с;

$\sigma$  – коэффициент, зависящий от типа насадки и степени заполнения барабана сушильной установки.

Подставляем значения и находим

$$N=0,078 \cdot 1,2^3 \cdot 6 \cdot 635 \cdot 0,038 \cdot 0,053=1,03 \text{ кВт.}$$

*Пример расчета сушилки «кипящего» слоя*

Задание. Рассчитать сушилку «кипящего» слоя для сушки брусники.

*Данные для расчета*

Производительность (по высушенной бруснике)  $G_k=900$  кг/ч.

Влажность брусники (на общую массу брусники):

– начальная –  $U_1=25$  %;

– конечная –  $U_2=8$  %.

Температура брусники (на общую массу брусники):

– начальная –  $t_1=18$  °С;

конечная –  $t_2=55$  °С.

Температура воздуха:

– до входа в калорифер ( $\varphi=70\%$ ) –  $t_0=19$  °С;

– после калорифера –  $t_1=110$  °С;

– на выходе из сушильной установки –  $t_2=60$  °С.

Теплоемкость сухой брусники –  $C_m=1,291$  кДж/(кг·К).

Плотность брусники –  $\rho_m=770$  кг/м<sup>3</sup>.

Тепловые потери принимаем равными 15% от расхода тепла на нагрев брусники и испарение влаги.

Для выбора конструкции сушильной установки и условий ее работы устанавливаются факторы, влияющие на конструкцию сушильной установки.

1. Брусника сбивается в комки во влажном состоянии.

2. Отношение максимального размера частичек брусники к минимальному

$$\frac{d_{\text{макс}}}{d_{\text{мин}}} = \frac{2}{1} = 2.$$

3. Влага, подлежащая удалению, в основном поверхностная.

4. Решетку выбирают беспровальную в виде двух параллельно расположенных решеток ( $d_{\text{отв}}=6$  мм и  $S=10\%$ ), оси отверстий которых

смещены одна относительно другой. Живое сечение  $S$  рекомендуется в пределах 3-10%.

5. Допускается некоторая неравномерность высушенного растительного сырья (брусники) по конечному влагосодержанию, поскольку при хранении все частички брусники приобретают одинаковую влажность.

Для расчета выбирают однокамерную сушильную установку с вертикальными стенками прямоугольного сечения. Влажную бруснику подают с помощью разбрасывателя, чтобы обеспечить равномерное «кипение» и предотвратить комкование влажной брусники.

Расход влажной брусники, кг/ч

$$G_H = G_K \cdot \frac{100 - U_2}{100 - U_1} = 900 \cdot \frac{100 - 8}{100 - 25} = 1104, \quad (5.124)$$

где  $U_1, U_2$  – соответственно начальная и конечная влажность брусники, %;

$G_K$  – производительность сушильной установки по высушенной бруснике, кг/ч.

Количество испаряемой влаги за 1 секунду

$$W = G_H - G_K = 1104 - 900 = 204 \text{ кг/ч} = 0,056 \text{ кг/с}. \quad (5.125)$$

Расход тепла

$$Q = Q_{\text{исп}} + Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{пот}} = 1,15 \{ W \cdot [r + c_n(t_2 - t_1)] + G_K \cdot c_m \cdot (t_2 - t_1) \} = \\ = 1,15 \{ 204 \cdot [2446,2 + 1,97 \cdot (55 - 18)] + 900 \cdot 1,291 \cdot (55 - 18) \} = 623401,2 \text{ кДж/ч}, \quad (5.126)$$

где  $r$  – теплота парообразования при 18 °С кДж/кг;

$c_n$  – теплоемкость пара, кДж/(кг·К).

Удельный расход тепла

$$q = \frac{Q}{W} = \frac{623401,2}{204} = 3055,9 \text{ кДж/кг влаги}. \quad (5.127)$$

Расход воздуха

$$L = \frac{Q}{C_в(t_1 - t_2)} = \frac{623901,2}{1,01 \cdot (110 - 60)} = 12354,4 \text{ кг/ч} = 3,43 \text{ кг/с}. \quad (5.128)$$

Теплоемкость воздуха  $C_v$  взята при  $t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{(110 + 60)}{2} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Удельный расход воздуха  $l = \frac{L}{W} = \frac{12354,4}{204} = 60,5 \text{ кг сухого воздуха/кг влаги}$ .

*Скорость воздуха.* Предварительно рассчитывают критическую скорость псевдооживления для частичек брусники среднего размера, пользуясь графиками  $Lu = f(Ar)$  (рис. 5.3) для температуры в слое брусники, которую можно считать равной температуре уходящих газов, т.е.  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Рассчитываем критерий Архимеда

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_m \cdot g}{v^2 \rho_v} = \frac{15^3 \cdot 10^{-12} \cdot 770 \cdot 9,81}{1,94 \cdot 10^{-10} \cdot 1,03} = 6560, \quad (5.129)$$

где  $\rho_v$  – плотность воздуха, рассчитывается по формуле

$$\rho_v = 1,293 \frac{273}{273 + 60} = 1,03 \text{ кг/м}^3,$$

где  $v$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха при температуре  $70 \text{ }^\circ\text{C}$

$$v = \frac{\mu_k}{\rho_v} = \frac{0,021 \cdot 10^{-3}}{1,09} = 1,94 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, \quad (5.130)$$

где  $\mu_k = 0,021 \cdot 10^{-3}$  – вязкость воздуха при  $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ .

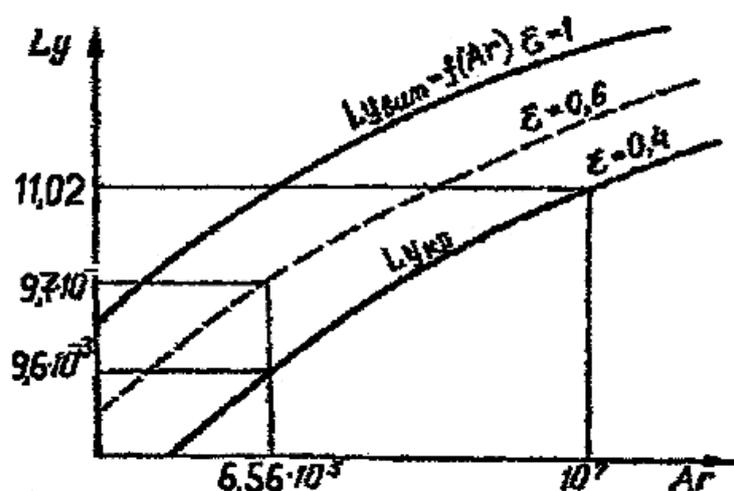


Рисунок 5.3 – Определение критерия Лященко  $Lu$

Средний диаметр частичек брусники

$$d = \frac{d_{\text{макс}} + d_{\text{мин}}}{2} = \frac{1+2}{2} = 1,5 \text{ мм} = 15 \cdot 10^{-4} \text{ м.} \quad (5.131)$$

Критическое значение критерия Лященко  $Ly_{\text{кр}} = 9,6 \cdot 10^{-3}$  при  $Ar = 6560$ .

Критическая скорость псевдоожижения

$$W_{\text{кр}} = 3 \sqrt{\frac{Ly_{\text{кр}} \cdot v \cdot g \cdot \rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{в}}}} = 3 \sqrt{\frac{9,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,94 \cdot 10^{-5} \cdot 9,81 \cdot 768}{1,03}} = 0,14 \text{ м/с.} \quad (5.132)$$

Рабочее значение критерия Лященко выбирают при  $\varepsilon = 0,6$  (процесс идет в основном в первом периоде) [4, 10], при  $Ar = 6560$   $Ly \approx 9,7 \cdot 10^{-1}$ , тогда коэффициент псевдоожижения

$$K_{\omega} = 3 \sqrt{\frac{Ly}{Ly_{\text{кр}}}} = 3 \sqrt{\frac{9,7 \cdot 10^{-1}}{9,6 \cdot 10^{-3}}} = 3,2. \quad (5.133)$$

Скорость воздуха (считая на полное сечение решетки)

$$w = K_{\omega} \cdot w_{\text{кр}} = 3,2 \cdot 0,14 = 0,448 \text{ м/с.} \quad (5.134)$$

Скорость воздуха непосредственно у решетки увеличивается за счет более высокой температуры

$$w_{\text{реш}} = w \cdot \frac{273+t_1}{273+t_2} = 0,448 \cdot \frac{273+110}{273+60} = 0,515 \text{ м/с.} \quad (5.135)$$

При принятом живом сечении решетки 10% скорость воздуха в отверстиях решетки будет

$$w_{\text{отв}} = \frac{w_{\text{реш}}}{0,1} = \frac{0,515}{0,1} = 5,15 \text{ м/с.} \quad (5.136)$$

Эта скорость достаточна для псевдооживления слоя брусники не только с частичками наибольшего диаметра ( $d_{\max}=2$  мм), но и с более крупными образованиями (комками), что видно из следующего расчета.

Если принять число псевдооживления для укрупненных частиц брусники небольшим, лишь достаточным для их перемещения, например  $K_{\omega}=4$ , то критическая скорость псевдооживления для этих частичек будет равна

$$w_{\text{кр.отв}} = \frac{w_{\text{отв}}}{K_{\omega}} = \frac{5,515}{4} = 1,29 \text{ м/с.} \quad (5.137)$$

Тогда

$$L_{y_{\text{кр.отв}}} = \frac{w_{\text{кр.отв}}^3 \cdot \rho_{\text{в}}}{\nu \cdot g \cdot \rho_{\text{м}}} = \frac{1,29^3 \cdot 0,9}{2,55 \cdot 10^{-5} \cdot 9,81 \cdot 770} = 11,02, \quad (5.138)$$

где  $\rho_{\text{в}} = 1,293 \cdot \frac{273}{273 + 110} = 0,92 \text{ кг/м}^3$ ;

$$\nu = \frac{\mu_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} = \frac{0,023 \cdot 10^{-3}}{0,9} = 2,55 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, \quad (5.139)$$

где  $\mu_{\text{в}} = 0,023 \cdot 10^{-3}$  – вязкость воздуха при 110 °С, Н·с/м<sup>2</sup>.

Значению  $L_{y_{\text{кр}}} = 11,02$  соответствует  $Ar = 10^6$ . Тогда диаметр укрупненных частичек (комков) брусники

$$d = \sqrt[3]{\frac{Ar \cdot \nu^2 \cdot \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{м}} \cdot g}} = \sqrt[3]{\frac{10^7 \cdot 2,55^2 \cdot 10^{-10} \cdot 0,9}{768 \cdot 9,81}} = 9,2 \text{ мм.} \quad (5.140)$$

Таким образом, около решетки могут перемещаться даже комки брусники диаметром  $\approx 9$  мм.

Расход тепла в калорифере

$$Q = L_{\text{сек}} C_{\text{в}} \cdot (t_1 - t_0) = 3,06 \cdot 1,01 \cdot (130 - 19) = 343 \text{ кВт}, \quad (5.141)$$

где  $C_{\text{в}}$  – теплоемкость воздуха при  $t_{\text{ср}} = 100$  °С, кДж/(кг·К).

## Размер решетки для сушильной установки

Полная площадь решетки

$$S_{\text{реш}} = \frac{L_{\text{сек}}}{\rho_{\text{в}} \cdot w} = \frac{3,43}{1,03 \cdot 0,448} = 7,4 \text{ м}^2; \quad (5.142)$$

диаметр решетки – 3,0 м.

*Сепарационное пространство.* Высота зоны действия струй (зоны гидродинамической стабилизации)

$$h_{\text{стр}} = 20 \cdot d_{\text{отв}} = 20 \cdot 6 = 120 \text{ мм}. \quad (5.143)$$

Высота «кипящего слоя»

$$h = (2 \div 4) \cdot h_{\text{стр}}. \quad (5.144)$$

Принимаем

$$h = 3 \cdot h_{\text{стр}} = 3 \cdot 120 = 360 \text{ мм}. \quad (5.145)$$

В свою очередь, высоту сепарационного пространства принимают в 4 раза больше высоты «кипящего» слоя

$$h_{\text{сеп}} = 4 \cdot 360 = 1440 \text{ мм}.$$

Проверяем, будут ли выноситься из сушильной установки наименьшие частички брусники, равные 1 мм

$$\text{Ar} = \frac{d^3 \cdot \rho_{\text{м}} \cdot g}{v^2 \cdot \rho_{\text{в}}} = \frac{(1 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 770 \cdot 9,81}{(1,94 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 1,03} = 377. \quad (5.146)$$

Критерий Лященко, соответствующий уносу частичек брусники, будет  $Lu_{\text{вит}} = 3,7$ , а скорость «витания» частичек сушеного сырья диаметром 1 мм.

$$w_{\text{вит}} = \sqrt[3]{\frac{Lu_{\text{вит}} \cdot v \cdot \rho_{\text{м}} \cdot g}{\rho_{\text{в}}}} = \sqrt[3]{\frac{3,7 \cdot 1,94 \cdot 10^{-5} \cdot 770 \cdot 9,81}{1,03}} = 0,72 \text{ м/с}. \quad (5.147)$$

Действительная скорость газа в сепарационном пространстве для сушильной установки с вертикальными стенками

$$w = \frac{L_{сек} + w_{сек}}{\rho_v \cdot S_{реш}} \cdot \frac{273 + t_2}{273} = \frac{(3,43 + 0,056) \cdot (273 + 60)}{1,03 \cdot 7,4 \cdot 273} = 0,56 \text{ м/с.} \quad (5.148)$$

Так как  $w_{вит} > w$ , то сечение сепарационного пространства принимают равным диаметру решетки – 7,4 м<sup>2</sup>.

Общая высота сушильной установки (над решеткой)

$$h + h_{сеп} = 360 + 1440 = 1800 \text{ мм} = 1,8 \text{ см.} \quad (5.149)$$

*Сопротивление сушильной установки с кипящим слоем.* Сопротивление сушильной установки с кипящим слоем равно

$$\Delta P_c = \Delta P_{сл} + \Delta P_p, \quad (5.150)$$

где  $\Delta P_{сл}$  – сопротивление взвешенного слоя растительного сырья;  
 $\Delta P_p$  – сопротивление решетки.

$$\Delta P_{сл} = \rho_m \cdot (1 - \varepsilon) \cdot g \cdot h = 770 \cdot (1 - 0,4) \cdot 9,8 \cdot 0,36 = 1625 \text{ Па;} \quad (5.151)$$

$$\Delta P_p = 0,503 \cdot \omega_0^2 \cdot \rho_v \cdot (1 - \varphi^2) \cdot c^2, \quad (5.152)$$

где  $\varphi$  – доля живого сечения решетки;

$\omega_0$  – скорость потока в отверстиях решетки, м/с;

$c$  – коэффициент сопротивления решетки, зависящий от отношения  $d_0/\delta$ , определяется по графику [4, 10].

Принимаем  $\delta = 2$  мм,  $c = 0,73$ , тогда

$$\Delta P_p = 0,503 \cdot 5,33^2 \cdot 1,03 \cdot (1 - 0,1^2) \cdot 0,73 = 10,6 \text{ Па.}$$

Сопротивление сушильной установки равно

$$\Delta P_c = 1625 + 10,6 = 1635,6 \text{ Па.}$$

*Расход сухого воздуха.* Рассчитываем плотность воздуха при  $t_0=19\text{ }^\circ\text{C}$

$$\rho_0=1,29 \cdot \frac{273}{273+19}=1,2 \text{ кг/м}^3.$$

Объемный расход воздуха, поступающего в калорифер, равен

$$V_0 = \frac{L_{\text{сек}}}{\rho_0} = \frac{3,43}{1,2} = 2,86 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5.153)$$

Объемный расход воздуха, выходящего из калорифера, равен

$$V_1 = \frac{L_{\text{сек}}}{\rho_1}, \quad (5.154)$$

где  $\rho_1$  – плотность воздуха на выходе из калорифера, рассчитывается по формуле

$$\rho_1=1,29 \cdot \frac{273}{273+110}=0,92 \text{ кг/м}^3.$$
$$V_1 = \frac{3,43}{0,92} = 3,7 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Объемный расход воздуха, выходящего из сушильной установки, равен

$$V_2 = \frac{L_{\text{сек}}}{\rho_2} = \frac{3,43}{1,03} = 3,33 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5.155)$$

*Выбор и расчет калорифера.* Для подогрева воздуха до  $130\text{ }^\circ\text{C}$  применяют воздухонагреватели с большой поверхностью теплообмена. Наиболее подходят для этого кожухотрубные калориферы. Расчет такого калорифера ничем не отличается от типового расчета кожухотрубного теплообменника.

Необходимая поверхность нагрева  $F$ , м, определяется по формуле

$$F = \frac{Q_k}{K\Delta t_{cp}}, \quad (5.156)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $\Delta t_{cp}$  – средняя разность температур между теплоносителями, К.  
 Принимаем в качестве источника тепла насыщенный водяной пар

$$P=4 \text{ атм}; t_{п}=142,9 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Температурные условия процесса:

$$\begin{aligned} &119,6 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ -----} 119,6 \text{ }^{\circ}\text{C}; \\ &19 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ -----} 110 \text{ }^{\circ}\text{C}, \\ \Delta t_{cp} &= \frac{(119,6-19) - (119,6-110)}{2,3 \lg \frac{119,6-19}{119,6-110}} = 37,1^{\circ}\text{C}. \end{aligned}$$

Количество тепла  $Q$ , Вт, необходимое для нагрева воздуха в калорифере, рассчитывается по формуле

$$Q = L_{сек} \cdot C_B \cdot (t_k - t_H), \quad (5.157)$$

где  $C_B$  – теплоемкость воздуха, определяется при средней температуре, равной

$$\begin{aligned} t_{cp} &= \frac{(t_H + t_K)}{2} = \frac{(110+19)}{2} = 65 \text{ }^{\circ}\text{C}. \\ Q &= 3,33 \cdot 1,014 \cdot 10^3 \cdot (110-19) = 438960 \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (5.158)$$

Принимаем коэффициент теплопередачи  $K=60$  Вт/м<sup>2</sup>·К. Тогда поверхность теплообмена равна

$$F = \frac{438960}{(60 \cdot 37,1)} = 197,2 \text{ м}^2.$$

Устанавливаем два одноходовых теплообменника с поверхностью  $F = 259 \text{ м}^2$ ; диаметр кожуха  $D = 800 \text{ мм}$ ; длина трубы  $l = 6,0 \text{ м}$ ; число труб  $n = 465$ ; диаметр трубы  $d = 25 \times 2 \text{ мм}$  [4, 10].

Рассчитываем сопротивление калорифера.

Сопротивление трубного пространства рассчитывается по формуле

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{\ell \cdot z}{d} \cdot \frac{\omega_{\text{тр}}^2 \cdot \rho_{\text{тр}}}{2} + [2,5 \cdot (z-1) + 2z] \cdot \frac{\omega_{\text{тр}}^2 \cdot \rho_{\text{тр}}}{2} + 3 \cdot \frac{\rho_{\text{тр}} \cdot \omega_{\text{тр.ш}}^2}{2}, \quad (5.159)$$

где  $z$  – число ходов;

$\omega_{\text{тр}}$  – скорость воздуха в трубном пространстве теплообменника;

$\rho_{\text{тр}}$  – плотность воздуха в трубном пространстве при  $t_{\text{ср}}$  в теплообменнике;

$\omega_{\text{тр.ш}}$  – скорость воздуха в штуцере трубного пространства.

Средний объем воздуха, проходящего через калорифер, равен

$$V_{\text{ср.т}} = \frac{V_0 + V_1}{2} = \frac{3,3 + 3,7}{2} = 3,5 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5.160)$$

Рассчитываем скорость воздуха в трубах теплообменника

$$\omega_{\text{тр}} = \frac{V_{\text{ср.т}}}{0,785 \cdot d^2 \cdot n} = \frac{3,5}{0,785 \cdot 0,021^2 \cdot 465} = 13,63 \text{ м/с}. \quad (5.161)$$

Рассчитываем критерий Рейнольдса для воздуха

$$\text{Re} = \frac{\omega_{\text{тр}} \cdot d \cdot \rho_{\text{тр}}}{\mu_{\text{тр}}} = \frac{23,2 \cdot 0,021 \cdot 1}{0,021 \cdot 10^{-3}} = 23200. \quad (5.162)$$

Определяем коэффициент трения. Принимаем среднюю шероховатость стальных труб  $e = 0,2$  мм. Для  $d/e = 21/0,2 = 105$  и  $\text{Re} = 23200$  находим коэффициент трения  $\lambda = 0,039$ .

Принимаем диаметр штуцера  $D_{\text{ш}} = 300$  мм. Тогда скорость воздуха в штуцере равна

$$\omega_{\text{тр.ш}} = \frac{V_{\text{ср.т}}}{0,785 \cdot D_{\text{ш}}^2} = \frac{3,5}{0,785 \cdot 0,3^2} = 49,8 \text{ м/с}; \quad (5.163)$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{тр}} = 0,039 \cdot \frac{6 \cdot 1}{0,021} \cdot \frac{23,2^2 \cdot 1}{2} + [2,5 \cdot (1-1) + 2 \cdot 1] \cdot \frac{23,2^2 \cdot 1}{2} + \\ + 3 \cdot \frac{1 \cdot 49,8^2}{2} = 5620 \text{ Па}. \end{aligned}$$

*Расчет циклона.* Циклон служит для разделения газовых смесей под действием центробежной силы. Широкое распространение получили циклоны НИИОГАЗ (Научно-исследовательский институт по промышленной и санитарной очистке газов). Отличительной особенностью циклонов НИИОГАЗ является наклонный патрубок для поступающего газа. Широко применяют три типа одиночных циклонов:

– ЦН-24 – обеспечивает повышенную производительность при наименьшем гидравлическом сопротивлении; предназначен для улавливания крупной пыли,  $\xi_0=60$ ;

– ЦН-15 – обеспечивает хорошую степень улавливания при сравнительно небольшом гидравлическом сопротивлении,  $\xi_0=160$ ;

– ЦН-11 – обеспечивает повышенную эффективность и рекомендуется в качестве унифицированного пылеуловителя,  $\xi_0=250$ .

Расчет циклона производится методом последовательных приближений в следующем порядке:

1. Выбирают циклон типа ЦН-15 с коэффициентом местного сопротивления  $\xi_0=160$ .

2. Принимают  $\Delta\rho/\rho_g=740$ . Диаметр циклона  $D$  определяют по условной скорости газа  $w_{ц}$ , отнесенной к полному поперечному сечению цилиндрической части циклона

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785w_{ц}}}, \quad (5.164)$$

где  $V$  – объемный расход газа, проходящего через циклон,  $V=11165 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

$w_{ц}$  – условная скорость газа в цилиндрической части циклона.

$$\Delta\rho/\rho_g = \xi_0 w_{ц}^2 / 2, \quad (5.165)$$

где  $\xi_0=160$ .

$$w_{ц} = \sqrt{\frac{740 \cdot 2}{160}} = 3,04 \text{ м/с.}$$

Плотность воздуха:  $\rho_g = 1,293 \cdot (273/343) = 1,026 \text{ кг/м}^3$ .

Следовательно

$$D = \sqrt{\frac{3,3}{1,03 \cdot 0,785 \cdot 3,04}} = 1,3 \text{ м.}$$

Согласно ГОСТ 9617-67, для одиночных циклонов не рекомендуется диаметр выше 1000 мм. Принимаем диаметр циклона 800 мм, рассчитываем объем воздуха, проходящего через стандартный циклон

$$V_{\text{ст}} = 0,785 \cdot D_{\text{ст}}^2 \cdot w_{\text{ц}} = 0,785 \cdot 0,8^2 \cdot 3,04 = 1,53 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5.166)$$

Рассчитываем число одиночных циклонов

$$n = \frac{V_2}{V_{\text{ст}}} = \frac{3,3}{1,53} = 2,15. \quad (5.167)$$

Устанавливаем два одиночных циклона диаметром 800 мм.  
Гидравлическое сопротивление циклона

$$\Delta p_{\text{ц}} = \xi_0 (\rho_{\text{в}} w_{\text{ц}}^2) / 2 = 160 \cdot (1,03 \cdot 3,04^2) / 2 = 761 \text{ Па}. \quad (5.168)$$

Общее сопротивление равно  $761 \cdot 2 = 1523 \text{ Па}$ .

*Расчет рукавного фильтра.* Для очистки газов от пыли методом фильтрования широко применяют тканевые фильтры, в частности рукавные или мешочные, самовстряхивающиеся с обратной принудительной продувкой фильтровальной ткани.

Во избежание конденсации водяных паров температура газов на выходе должна быть на 15-20 °С выше температуры точки росы. Поверхность фильтрования  $F_{\text{рф}}$ , м<sup>2</sup>, определяют по формуле

$$F_{\text{рф}} = \frac{V_2 + V_{\text{пр}} + V_{\text{нв}}}{w_2}, \quad (5.169)$$

где  $V_2$  – расход запыленного газа, м<sup>3</sup>/с,  $V_{\text{р}} = 11880 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

$V_{\text{пр}}$  – расход продувочного газа, м<sup>3</sup>/с;  $V_{\text{пр}} = (0,1-0,2) \cdot V_2 = 0,15 \cdot 11880 = 1782 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $V_{\text{нв}}$  – расход подсасываемого в аппарат воздуха, м<sup>3</sup>/с, принимается на 10% больше расхода газа

$$V_{не} = (1,05-1,1) \cdot V_2 = 1,05 \cdot 11880 = 12474 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$w_2 = (0,8-1,0) \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{м}^2\text{с}$  – допустимая удельная нагрузка тканевого фильтра по газу;  $w_2 = 0,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{м}^2$ .

$$F_{рф} = \frac{11880 + 1782 + 12474}{3600 \cdot 0,9 \cdot 10^{-2}} = 802 \text{ м}^2.$$

Рассчитанная поверхность фильтрации должна быть проверена на допустимую запыленность ткани

$$F_{рф} \geq G_{1н} / G_{\delta}, \quad (5.170)$$

где  $G_{1н}$  – исходное количество пыли в газе, кг/с, поступающем в рукавный фильтр;

$G_{\delta} = (0,2-0,3)$  – допустимая удельная запыленность ткани.

По каталогу ОСТ 26-14-2005-77 выбираем фильтр типа СМЦ-101 с поверхностью  $800 \text{ м}^2$  [4, 10].

Рукавные фильтры работают практически в режиме постоянной скорости фильтрования, поэтому промежутки времени между встряхиванием рукавов определяются располагаемыми перепадами давлений, возрастающими по мере увеличения толщины слоя осевшей пыли, обычно  $\Delta p = 1-3 \text{ КПа}$ . Принимаем гидравлическое сопротивление фильтра  $1500 \text{ Па}$ .

*Сопротивление трубопровода.* Средний объемный расход воздуха в установке равен

$$V_{ср} = (V_0 + V_2) / 2 = (3,3 + 3,7) / 2 = 3,0 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5.171)$$

Рассчитываем диаметр трубопровода по формуле

$$d = \sqrt{\frac{V_{ср}}{0,785 \cdot w}}, \quad (5.172)$$

где  $w$  – скорость воздуха в трубопроводе.

Принимаем  $w = 15 \text{ м/с}$ .

$$d = \sqrt{\frac{3}{0,785 \cdot 15}} = 0,48 \text{ м.}$$

Принимаем стандартный диаметр трубопровода, равный  $d = 530 \times 15$  мм. Корректируем скорость воздуха в трубопроводе

$$w = \frac{3,0}{0,785 \cdot 0,5^2} = 14,06 \text{ м/с.}$$

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{14,06 \cdot 0,5 \cdot 1,11}{19,3 \cdot 10^{-6}} = 404316. \quad (5.173)$$

Плотность и вязкость воздуха определены при средней температуре в трубопроводе,  $t_{cp} = (19+70)/2 = 44,5$  °С.

Определяем коэффициент трения. Принимаем шероховатость стальных труб с незначительной коррозией  $e = 0,2$  мм. Для  $d/e=500/0,2 = 2500$  и  $Re = 404316$  находим  $\lambda=0,017$ .

Таблица 5.2 – Коэффициенты местных сопротивлений

Вид сопротивления	$\Sigma \xi$
Вход воздуха в трубопровод	0,2
Диафрагма ( $m=0,4$ )	8,25
Задвижка	$2 \times 0,15$
Отвод (при $\varphi = 90^0$ и $R_0/d=4$ )	$0,11 \times 5$

Общее гидравлическое сопротивление трубопровода

$$\Delta P = \frac{\rho \omega^2}{2} \left( 1 + \frac{\lambda L}{d} + \Sigma \xi \right) \quad (5.174)$$

где  $L$  – длина трубопровода, принимаем  $L = 30$  м.

Тогда

$$\Delta P = \frac{1,11 \cdot 14,06^2}{2} \left( 1 + \frac{0,017 \cdot 30}{0,5} + 9,4 \right) = 1253 \text{ Па.}$$

Общее сопротивление установки равно

$$\begin{aligned} \Delta P_{уст} &= \Delta P_{суш} + \Delta P_{к} + \Delta P_{цикл} + \Delta P_{ф} + \Delta P_{тр} = \\ &= 4596 + 1635,6 + 1523 + 1500 + 1252 = 10506,6 \text{ Па.} \end{aligned} \quad (5.175)$$

*Выбор газодувки.* Мощность, потребляемая газодувкой,  $N$ , кВт, определяется по формуле

$$N = \frac{V \cdot \Delta P_{уст}}{1000 \cdot \eta}, \quad (5.176)$$

где  $V$  – производительность газодувки,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\Delta P_{уст}$  – полное сопротивление сушильной установки,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$\eta$  – КПД вентиляторной установки.

$$V = V_0 = 3,3 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5.177)$$

Полное сопротивление сушильной установки

$$N = \frac{3,3 \cdot 10506,6}{1000 \cdot 0,8} = 43,3 \text{ кВт}.$$

Принимаем газодувку [10] марки ТВ-200-1.12 со следующими характеристиками:

- Производительность –  $3,33 \text{ м}^3/\text{с}$ .
- Давление –  $12000 \text{ Па}$ .
- Число оборотов –  $48,3 \text{ с}^{-1}$ .
- Мощность –  $75 \text{ кВт}$ .

### 5.3. Расчет сублимационных сушилок

Вне зависимости от условий (режима) сушки растительного сырья будет преобладать теплообмен излучением. Передача тепла к растительному сырью в период сублимации осуществляется радиацией от нагретых плит, контактным путем или теплопроводностью от противня, на котором лежит растительное сырье, и конвекцией от движущейся около сушеного сырья паровоздушной смеси. Наибольшее количество тепла (75-85%) передается растительному сырью тепловой радиацией. Второе место занимает контактный подвод тепла к сушеному сырью противней от плит, на которых они лежат. Наименьшее количество тепла передается конвекцией от испаряющихся

паров и паровоздушной смеси из-за их малой плотности. Количество тепла, передаваемое третьим способом, составляет около 3-5%. В приближенных расчетах передачу тепла контактным и конвективным путем можно учесть коэффициентом  $k=1,2-1,25$  [7].

В материальном балансе определяют количество сушеного растительного сырья, поступающего на сушильную установку за один цикл.

$$G_1 = W \frac{100 + U_1}{U_1 - U_2}, \quad (5.178)$$

где  $W$  – количество испаряемой влаги при сушке растительного сырья;

$U_1$  – начальная влажность сушеного растительного сырья, приведенная к абсолютно сухому состоянию;

$U_2$  – конечная влажность сушеного растительного сырья.

Затем рассчитывается количество испаряемой влаги за каждый период (всего их три) в зависимости от процента удаления влаги в каждом периоде.

*Тепловой расчет сублимационной сушильной установки.* В сублимационной сушильной установке, в отличие от конвективной, отсутствуют потери тепла с транспортными приспособлениями, в окружающую среду и с уходящим воздухом. Отличительной особенностью теплового расчета сублимационной сушильной установки является также то, что тепло, выделяемое в процессе самозамораживания сушеного растительного сырья, соответствует теплу, затраченному на испарение из сушеного сырья влаги в этот период. Количество тепла при сублимационной сушке определяется из уравнения теплового баланса, кДж/цикл

$$Q = (Q_{сз} + Q_{сб} + Q_{ов}) - (Q' + Q''), \quad (5.179)$$

где  $Q_{сз}$  – тепло, потребляемое в процессе самозамораживания сушеного растительного сырья, кДж;

$Q_{сб}$  – тепло, потребляемое в период сублимации сушеного растительного сырья, кДж;

$Q_{ов}$  – тепло на испарение остаточной влаги в сушеном растительном сырье, кДж;

$Q'$  – тепло, выделяемое из сушеного растительного сырья в период его замораживания при охлаждении его от начальной температуры до температуры сублимации, ккал;

$Q''$  – тепло, выделяемое в период самозамораживания сушеного растительного сырья, ккал.

Так как  $Q' + Q''$  целиком расходуются на испарение влаги в период самозамораживания сушеного растительного сырья, то

$$Q_{сз} = Q' + Q'' \quad (5.180)$$

Соответственно это уравнение может быть представлено в следующем виде:

$$Q = Q_{сб} + Q_{об} \text{ кДж/цикл.} \quad (5.181)$$

Тепло в сушильной камере установки передается к сушеному растительному сырью лучеиспусканием, теплопроводностью и конвекцией (кДж/цикл)

$$Q = Q_{луч} + Q_T + Q_{конв} \quad (5.182)$$

Для определения поверхности нагрева сублиматора ( $m^2$ ) используем формулу

$$F = \frac{Q}{k * 4,9 \varepsilon_{np} \left| \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right| H}, \quad (5.183)$$

где  $k=1,2-1,25$  – коэффициент, учитывающий контактный и конвективный подвод тепла к сушеному растительному сырью;

$T_1$  и  $T_2$  – температуры горячих плит и сушеного растительного сырья, К;

$H$  – взаимная излучающая поверхность плит и сушеного растительного сырья для данной конструкции, принимаем  $H=1$ ;

$\varepsilon_{np}$  – приведенная степень черноты для данной системы

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad (5.184)$$

где  $F_1$  – излучающая поверхность плит,  $m^2$ ;

$F_2$  – поверхность сушеного растительного сырья, воспринимающая лучистое тепло,  $m^2$ .

*Расчет конденсатора.* В конденсаторе сублимационной сушильной установки происходит не только конденсация водяных паров, но и замораживание влаги (кристаллизация). Необходимость замораживания влаги обусловлена тем, что вакуумные насосы, используемые в сублимационных установках в целях экономии электроэнергии, должны откачивать только воздух, проникающий через неплотности и неконденсирующиеся газы, выделяющиеся при сушке растительного сырья. Попадание влаги в насос ухудшает его работу, может вывести его из строя или ухудшить работу конденсаторов, от которых зависит работа всей сублимационной сушильной установки.

Общее количество тепла, отнимаемое в конденсаторе, кДж/ч

$$Q_k = W'(r + r_l) + W'c(t_n - t_l), \quad (5.185)$$

где  $W'$  – количество замерзающей влаги, кг/ч;

$r$  – теплота конденсации влаги, кДж/кг;

$r_l$  – теплота плавления или затвердевания влаги, кДж/кг;

$c$  – теплоемкость пара, кДж/кг·град;

$t_n$  и  $t_l$  – температура пара и замороженного льда, °С.

$S$  другой стороны

$$Q_k = kF\Delta t \text{ кДж/с}, \quad (5.186)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи от хладагента к пару, кДж/м<sup>2</sup>·град;

$\Delta t$  – разность температур испаряющегося аммиака и замерзающих паров, °С.

Поверхность конденсатора

$$F_k = \frac{Q_k}{k\Delta t}, \quad (5.187)$$

где  $Q_k$  – количество тепла, передаваемое в конденсаторе, кДж/с;

$\Delta t$  – разность температур среды и поверхности охлаждения конденсатора, °С;

$k$  – коэффициент теплопередачи, кДж/м<sup>3</sup>·с·град

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}} + \frac{\delta_l}{\lambda_l} + \frac{1}{a_2}}, \quad (5.188)$$

где  $\delta_{CT}$  – толщина стенок трубок конденсатора, м;  
 $\lambda_{CT}$  – теплопроводность материала трубок, кДж/м·с·град;  
 $\delta_l$  – средняя толщина льда на трубках, м;  
 $\lambda_l$  – теплопроводность льда, кДж/м·с·град.

В запроектированных в настоящее время схемах конденсатор сублимационной сушильной установки является испарителем холодильной установки, поэтому в этой формуле  $a_1$  – коэффициент теплообмена между испаряющимся аммиаком и стенками конденсатора – можно приближенно определить по следующей формуле Г.К. Кружилина:

$$a_1 = 4,2(1 + 0,007t_o)q^{0.7} \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град}, \quad (5.189)$$

которая справедлива в диапазоне температур кипения аммиака от -40 до 0 °С. Необходимо предварительно задаться поверхностью нагрева конденсатора, а также  $t_o$  – температурой трубок конденсатора, °С, так как

$$q = \frac{Q}{F}. \quad (5.190)$$

Коэффициент теплообмена между конденсирующимися и замерзающими парами влаги и образующейся на стенках трубки поверхностью льда можно определить из уравнения, кДж/м<sup>2</sup>·с·град

$$a_2 = \frac{2,75\lambda q'}{\mu g * 3600} \cdot \left(\frac{T_c - T_l}{T_c}\right)^{-1,1}, \quad (5.191)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность паровоздушной смеси, кДж/м·с·град;  
 $\mu$  – коэффициент динамической вязкости водяного пара, Па·с;  
 $q'$  – интенсивность конденсации, кг/м<sup>2</sup>·с;  
 $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  
 $T_c$  – температура насыщенного пара, К;  
 $T_l$  – температура поверхности охлаждения или льда, К.  
 Интенсивность испарения

$$q' = \frac{W}{nF_K}, \quad (5.192)$$

где  $W$  – количество влаги, замораживаемой в конденсаторе, кг/с;  
 $n$  – число конденсаторов.

Намораживание льда на поверхности трубок конденсатора приводит к ухудшению его работы, что отрицательно сказывается на работе всей сушильной установки. Для бесперебойной работы устанавливают два или четыре конденсатора, которые работают попеременно. Оттаивание льда может осуществляться или горячими парами аммиака, которые могут иметь температуру от 30 до 35 °С (в этом случае конденсатор-замораживатель превращается как бы в конденсатор холодильной установки), или острым паром, выпускаемым непосредственно в замороженную область конденсатора, что быстрее, но требует расхода греющего пара. Количество тепла, необходимое для оттаивания льда в конденсаторе, кДж/период

$$Q_o = G_{\text{л}}r_{\text{л}} + G_{\text{л}}c_{\text{л}}(t_{\text{в}} - t_{\text{л}}) + G_{\text{Т}}c_{\text{Т}}(\vartheta_{\text{СТ}}^{\prime\prime} - \vartheta_{\text{СТ}}^{\prime}), \quad (5.193)$$

где  $G_{\text{л}}$  – количество намороженного льда, кг;  
 $r_{\text{л}} = 335,2$  – теплота плавления льда, кДж/кг;  
 $c_{\text{л}} = 2,18$  – теплоемкость льда, кДж/кг·град;  
 $t_{\text{в}}$  – температура воды, образующейся после таяния льда, °С;  
 $t_{\text{л}}$  – температура таяния льда, °С;  
 $G_{\text{Т}}$  – вес трубок конденсатора-замораживателя, кг;  
 $\vartheta_{\text{СТ}}^{\prime\prime}$  и  $\vartheta_{\text{СТ}}^{\prime}$  – начальная и конечная температуры стенок, °С;  
 $c_{\text{Т}}$  – теплоемкость стальных трубок, кДж/кг·град.  
 Количество намороженного льда, кДж/период

$$G_{\text{л}} = F_{\text{Т}}\delta_{\text{л}}\gamma_{\text{л}}, \quad (5.194)$$

где  $F_{\text{Т}}$  – поверхность трубок, на которой образовался лед, м<sup>2</sup>;  
 $\delta_{\text{л}}$  – толщина слоя льда, м (обычно не допускают более 6-8 мм);  
 $\gamma_{\text{л}} = 920$  – удельный вес льда, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент теплопередачи от конденсирующихся паров аммиака к тающему льду

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{\delta_{\text{СТ}}}{\lambda_{\text{СТ}}} + \frac{\delta_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}}}}, \quad (5.195)$$

где  $\delta_{\text{СТ}}$  и  $\lambda_{\text{СТ}}$ ,  $\delta_{\text{л}}$  и  $\lambda_{\text{л}}$  – соответственно толщины и теплопроводности стенок и льда;

$a_1$  – коэффициент теплоотдачи от конденсирующихся паров аммиака к стенкам трубки, кДж/м<sup>2</sup>·с·град

$$a_1 = 1,177 \sqrt[3]{\frac{r\gamma^2\lambda^3}{\mu q_F}} = 1,177\beta \frac{1}{\sqrt[3]{q_F}}, \quad (5.196)$$

где  $r$  – теплота конденсации паров аммиака при заданных параметрах, ккал/кг;

$\gamma$  – удельный вес аммиака, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  – теплопроводность паров аммиака, кДж/м·с·град;

$\mu$  – динамическая вязкость паров аммиака, Па·с;

$q_F$  – тепловая нагрузка конденсатора в нормальных условиях его работы, кВт/м<sup>2</sup>.

$$q_F = \frac{Q}{F}, \quad (5.197)$$

где  $Q$  – количество тепла, воспринимаемое конденсатором, кВт.

Время, необходимое для оттаивания конденсатора при обогреве конденсирующимися парами аммиака, ч

$$\tau_{OT} = \frac{Q_o}{kF_k\Delta t}, \quad (5.198)$$

где  $Q_o$  – количество тепла, необходимое для оттаивания льда, кВт;

$\Delta t$  – температурный напор, °С.

Время откачки парогазовой среды для создания вакуума в сублиматоре можно определить по формуле, ч

$$\tau_k = K \frac{V}{V_3} 2,3 \lg \frac{p_6 - p_0}{p_c - p_0}, \quad (5.199)$$

где  $V$  – объем сублиматора, м<sup>3</sup>;

$V_3$  – действительная скорость откачки, м<sup>3</sup>/с;

$p_6$  – барометрическое давление, Па;

$p_0$  – предельное давление, создаваемое насосом, Па;

$p_c$  – заданное давление в сублиматоре, Па;

$K$  – коэффициент запаса.

Определение времени откачки позволяет правильно выбрать необходимые размеры сублиматора и производительность вакуум-насоса [12].

### *Контрольные вопросы*

1. Что необходимо достичь при проектировании сушильных установок?
2. Что предусматривает технико-экономическое проектирование?
3. От чего зависит методика теплового расчета?
4. С какой целью составляется тепловой баланс?
5. Какие условия необходимо выполнить при проектировании конвективных сушилок?

## Глава 6. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО НОВОМУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ОБОРУДОВАНИЮ ДЛЯ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Для обеспечения ресурсосберегающего технологического процесса сушки растительного сырья было разработано и запатентовано новое инновационное технологическое оборудование.

*Устройство для сушки высоковлажного растительного сырья<sup>1</sup>*

Техническим результатом изобретения является повышение качества продукции из-за снижения механического повреждения сырья.

Технический результат достигается тем, что устройство содержит сушильную камеру, загрузочное устройство, вентиляторы и калориферы, притом в сушильной камере установлены полки-воздуховоды с возможностью регулирования угла наклона, которые выполнены полыми, с перфорированной верхней поверхностью, притом вентиляторы и калориферы подключены отдельно к полкам, а на нижней поверхности полок между полкой и устройством регулирования угла наклона полки расположены датчики веса, устройство снабжено вибрационным загрузочным устройством, контуром обогрева, в котором отработанный агент сушки используется в качестве теплоносителя для предварительного подогрева сырья.

На рисунке 6.1 изображена схема устройства, общий вид.

Устройство содержит напорные вентиляторы 1, воздуховоды холодного воздуха 2, калориферы 3, воздуховоды горячего воздуха 4, датчики температуры воздуха 5, бункер 6 загрузочного устройства 7 с вибратором 8 и контуром обогрева 9 с выходным отверстием 10, трубопровод отработанного воздуха 11, подключенный к отверстию 12.

---

<sup>1</sup>Патент РФ № 2379607 С1 МПК F26В 17/12 Устройство для сушки высоковлажного растительного сырья / Чирухин А.А., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Красноярский государственный аграрный университет. – Заявл. 30.09.2008, опубл. 20.01.2010.

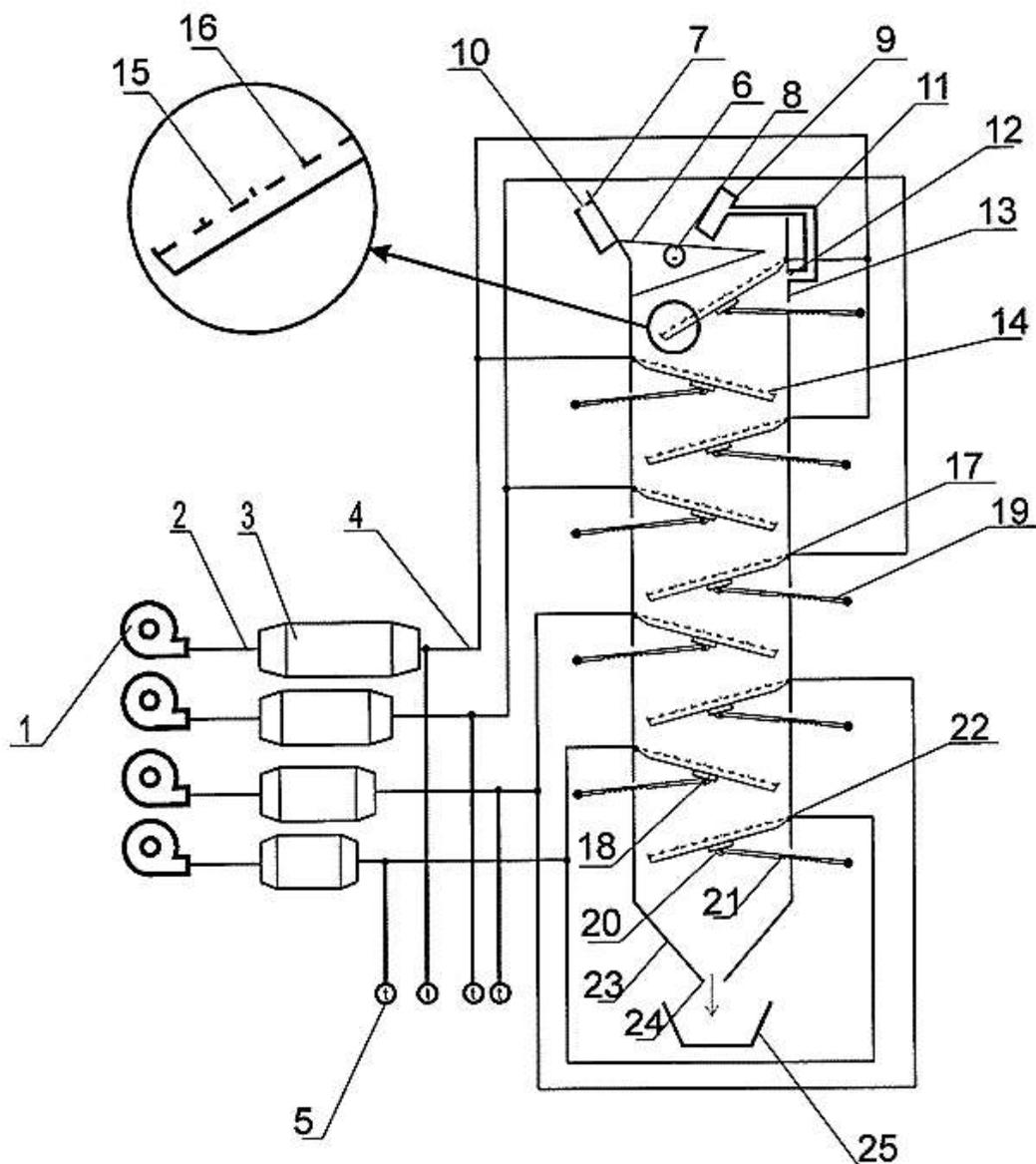


Рисунок 6.1 – Устройство для сушки высоковлажного растительного сырья

В сушильной камере 13 установлены наклонные полки-воздуховоды 14 с возможностью регулирования их угла наклона, которые выполнены полыми с перфорированной верхней поверхностью 15 и поперечными порожками 16, соединенные шарниром 17 с сушильной камерой 13. Устройство содержит электронные датчики веса 18, расположенные на нижней поверхности полок-воздуховодов 14 между полкой и устройством регулирования угла наклона 19, шарнир 20, размерные вырезы 21, отверстие 22, для ввода воздуха в полки-воздуховоды 14, коническую обечайку 23, отверстие для выхода продукта 24 и приемный бункер 25. При этом вентиляторы 1 и калориферы 3 подключены отдельно к полкам-воздуховодам 14.

Устройство работает следующим образом.

С помощью напорных вентиляторов *1* через трубопроводы *2* воздух подается в калориферы *3*. Далее по трубопроводам *4* нагретый воздух подается в полости полок-воздуховодов *14*. При этом температура воздуха в воздуховоде *4* контролируется датчиком температуры *5*.

Нагретый воздух через отверстия *22* попадает в полость полок-воздуховодов *14*, откуда, проходя сквозь перфорированную верхнюю поверхность *15* полка *14*, нагревает продукт и отбирает испаряющуюся влагу. Далее отработанный воздух через отверстие *12* в корпусе *13* по трубопроводу отработанного воздуха *11* поступает в контур обогрева *9*. Пройдя данный контур, воздух осуществляет предварительный подогрев продукта до поступления его на полки *14* и выходит в атмосферу через отверстие *10*, что позволяет снизить расход энергии, затрачиваемой на сушку.

Высушиваемый продукт засыпается в бункер *б* загрузочного устройства *7* и с помощью вибратора *8* подается на верхнюю полку-воздуховод *14*, угол наклона которой отрегулирован в соответствии с углом естественного наклона данного сырья при данной влажности. От немедленного скатывания сырье оберегают поперечно расположенные порожки *16*, расположенные равномерно по длине полки-воздуховода *14*. Агент сушки, подводимый непосредственно под слой материала, в свою очередь препятствует чрезмерному застою сырья на полке. После прохождения всех ступеней продукт заданной влажности ссыпается в приемный бункер *25*.

Контроль влажности материала осуществляется посредством использования датчиков веса *18*, установленных под каждой полкой-воздуховодом *14*. Для этого устройство останавливается, с датчиков снимаются показания, показывающие вес сырья на каждой полке. Полученные данные сравниваются с эталонными, и принимается решение о соответствующем изменении того или иного параметра сушки для достижения продуктом необходимой влажности. После чего сушилка вновь запускается.

Причем в зависимости от выбранного режима сушки вентиляторы *1* и калориферы *2*, которые, соответственно, имеют различную производительность и мощность, подключаются к разным полкам.

В изобретении возможно разделение процессов удаления свободной и связанной влаги, реализованное в одной камере. Свободная

влага удаляется на верхней ступени сушилки при нагреве до максимально безопасной для данного сырья температуры. На последующих этапах сушки температура ее агента снижается, что создает градиент температуры внутри сырьевой фракции и на ее поверхности. Причем при данном градиенте температуры (внутри горячий, снаружи холодный) перенос влаги внутри продукта осуществляется от центра к периферии, что приводит к интенсивному удалению связанной влаги. Непрерывный поток материала и его перемешивание достигаются за счет применения полок с регулируемым углом наклона и подаваемого под поверхность материала агента сушки. Действительно, при совпадении угла наклона полки и угла естественного уклона материала последний неизбежно будет скатываться с нее. С целью уменьшения скорости движения материала на полках в сушилке применены поперечно расположенные порожки равномерно по длине полки. Агент сушки, подводимый непосредственно под слой материала, в свою очередь препятствует чрезмерному застою сырья на полке, так как, проходя сквозь слой продукта, перемешивает его и частично переваливает через порожки. На последующие полки материал поступает уже с изменившейся влажностью и, соответственно, изменившимся углом естественного уклона, что нивелируется соответствующим изменением угла наклона полок. Кроме того, отработанный сушильный агент посредством особого устройства нагревает сырье до его поступления в сушильную камеру, снижая тем самым расход энергии и времени сушки. Изобретение позволит повысить качество сушки растительного сырья и увеличить производительность процесса сушки.

*Автономное устройство для сушки высоковлажного растительного сырья<sup>2</sup>*

Технический результат достигается тем, что автономное устройство для сушки высоковлажного растительного сырья содержит сушильную камеру, лоток для размещения продукта, трубопроводы для подвода и отвода сушильного агента и вентилятор, притом паровая турбина, центробежный вентилятор и генератор расположены после-

---

<sup>2</sup>Патент РФ № 2381429 С1 МПК F26В 9/06 Автономное устройство для сушки высоковлажного растительного сырья / Невзоров В.Н., Чирухин А.А., Чирухина Н.М., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Красноярский государственный аграрный университет. – Заявл. 01.12.2008, опубл. 10.02.2010.

довательно на одном валу, паровая турбина соединена паропроводом с паровым котлом, а центробежный вентилятор соединен воздухопроводами с сушильной камерой и топкой, при этом на дымовой трубе установлен перепускной клапан, проходя через который дымовая труба разветвлена на две трубы, расположенные горизонтально одна над другой в сушильной камере, между которыми параллельно им установлен сетчатый лоток, а генератор снабжен блоком управления. Электронный блок управления снабжен датчиками расхода воздуха и датчиком температуры. Воздуховод, отходящий в сторону топки, снабжен клапаном плавной регулировки расхода воздуха. Паропровод, отходящий от верхней части парового котла, снабжен клапаном плавной регулировки расхода пара.

На рисунке 6.2 изображена схема устройства, общий вид.

Устройство содержит топку 1 с дверцей для загрузки топлива 2, паровой котел 3, расположенный сверху топки 1. Котел 3 в верхней части имеет отверстие 4 для заливки воды с герметично закрывающейся крышкой 5. Паропровод 6, отходящий от верхней части котла 3, снабжен клапаном плавной регулировки расхода пара 7. Паропроводом 6 соединены паровой котел 3, паровая турбина 8, имеющая отверстие 9 для выпуска отработанного пара, и рабочее колесо 10 паровой турбины 8, которое закреплено на одном валу 11 с рабочим колесом 12 центробежного вентилятора 13 и генератора электрической энергии 14. Следовательно, паровая турбина 8, центробежный вентилятор 13 и генератор 14 расположены последовательно на одном валу 11. Центробежный вентилятор 13 соединен воздухопроводом 15 с сушильной камерой 16 и через воздухопровод 22 с топкой 1. Паровая турбина 8 соединена паропроводом 6 с паровым котлом 3. На дымовой трубе 21 топки 1 установлен перепускной клапан 20, проходя через который дымовая труба разветвляется на 2 трубы 18 и 19, расположенные горизонтально одна над другой в сушильной камере 16. Между дымовыми трубами 18 и 19 расположен параллельно им сетчатый лоток 17 для размещения высоковлажного растительного сырья. Воздуховод 22, отходящий в сторону топки 1, снабжен клапаном плавной регулировки расхода воздуха 23.

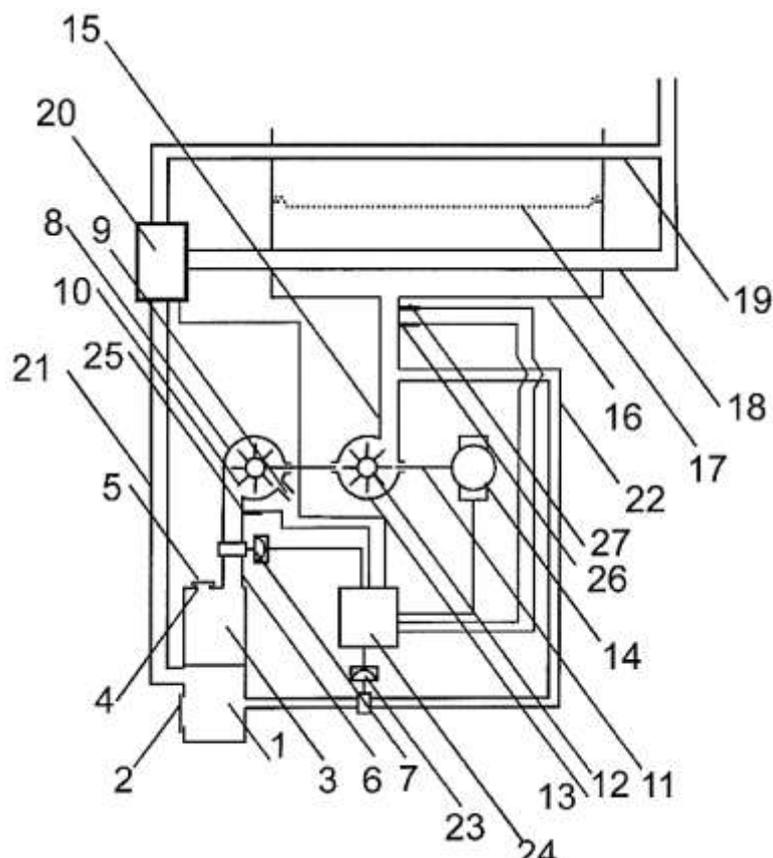


Рисунок 6.2 – Автономное устройство для сушки высоковлажного растительного сырья

Устройство также снабжено электронным блоком управления 24, имеющим датчики расхода воздуха 25 и 26 и датчик температуры 27.

Устройство работает следующим образом.

В топке 1 разжигаются дрова. Паровой котел 3 заполняется водой. Когда вода в котле 3 нагревается, часть ее в виде пара поступает по паропроводу 6 через клапан плавной регулировки расхода 7 в паровую турбину 8, где передает свою кинетическую энергию рабочему колесу 10 паровой турбины 8 и выходит в окружающую среду через отверстие для выпуска отработанного пара 9. Вращаясь, рабочее колесо 10 через вал 11 передает крутящий момент на рабочее колесо 12 центробежного вентилятора 13 и генератор электрической энергии 14. Центробежный вентилятор 13 через воздухопровод 15 подает воздух в сушильную камеру 16, где воздух, соприкасаясь с дымовой трубой 18, нагревается и проходит сквозь сетчатый лоток для размещения продукта 17, нагревая продукт и унося с собой выделяющуюся влагу. Кроме того, дымовая труба 19, проходя над лотком с продуктом 17, нагревает его посредством инфракрасного излучения. От центробежного вентилятора 13 отходит воздухопровод 22, проходит через клапан

плавной регулировки расхода 20 и приходит к топке 1. Электронный блок управления 24 питается от генератора 14 и, получая данные о расходе воздуха от датчиков расхода воздуха 25 и 26 и температуре от датчика температуры 27, вырабатывает управляющие сигналы, поступающие на клапаны 7, 20, 23. Клапан 7 регулирует подачу пара на турбину 8 и, соответственно, скорость ее вращения. Клапан 20 регулирует распределение дыма между дымовыми трубами 18 и 19, следовательно, температуру воздуха, подающегося в сушильную камеру 16. Клапан 23 регулирует подачу воздуха в топку 1, что позволяет поддерживать в топке 1 режим горения топлива.

Конструкция устройства позволяет организовать эффективный подвод и отвод сушильного агента, равномерный прогрев высушиваемого материала, а также реализовать автономный режим работы.

### *Автономное устройство для сушки растительного сырья<sup>3</sup>*

Технический результат заключается в повышении производительности, снижении потребления энергии для сушки, обеспечении мобильности.

Указанный технический результат достигается тем, что автономное устройство для сушки растительного сырья, содержащее сушильную камеру, воздухопроводы для подвода и отвода сушильного агента и вентилятор, включает в себя самоходную технологическую машину, снабженную двигателем внутреннего сгорания с термостатом и радиатором, который оборудован конфузуром, соединенным воздухопроводом с тройником, при этом вторым воздухопроводом тройник соединен с вентилятором, а третий воздухопровод тройника выполнен открытым, причем в тройнике между воздухопроводом конфузуратора и открытым воздухопроводом установлена заслонка, связанная приводом с термостатом, при этом вентилятор четвертым воздухопроводом соединен с корпусом сушильной камеры, внутри которого размещен решетчатый бункер, а вентилятор соединен приводом с двигателем внутреннего сгорания.

На рисунке 6.3 изображена схема автономного устройства для сушки растительного сырья.

---

<sup>3</sup>Патент РФ № 2450226С1 МПК F26В 9/06, F26В 20/00 Автономное устройство для сушки растительного сырья / Холопов В.Н., Невзоров В.Н., Ярум А.И., Самойлов В.А., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный технологический университет» (СибГТУ). – Заявл. 09.11.2010, опублик. 10.05.2012.

Автономное устройство для сушки растительного сырья содержит самоходную технологическую машину, снабженную двигателем внутреннего сгорания с термостатом (на рис. 6.3 технологическая машина с двигателем и термостатом не показана). Радиатор 1 двигателя снабжен конфузуром 2, соединенным воздухопроводом 3 с тройником 4, при этом воздухопроводом 5 тройник 4 соединен с вентилятором 6, а воздухопроводом 7 – с атмосферой. В тройнике 4 между воздухопроводом 3 конфузора и связанным с атмосферой воздухопроводом 7 установлена заслонка 8, связанная приводом с термостатом (привод заслонки на рис. 6.3 не показан). Вентилятор 6 воздухопроводом 9 соединен с корпусом 10 сушильной камеры 11, установленной на технологической машине (технологическая машина на рис. 6.3 не показана). Внутри корпуса 10 размещен решетчатый бункер 12. Вентилятор 6 соединен приводом с двигателем внутреннего сгорания (привод вентилятора 6 на рис. 6.3 не показан). Сушильная камера 11 снабжена крышкой 13, задвижкой 14 и патрубком 15, расположенным на крышке 13.

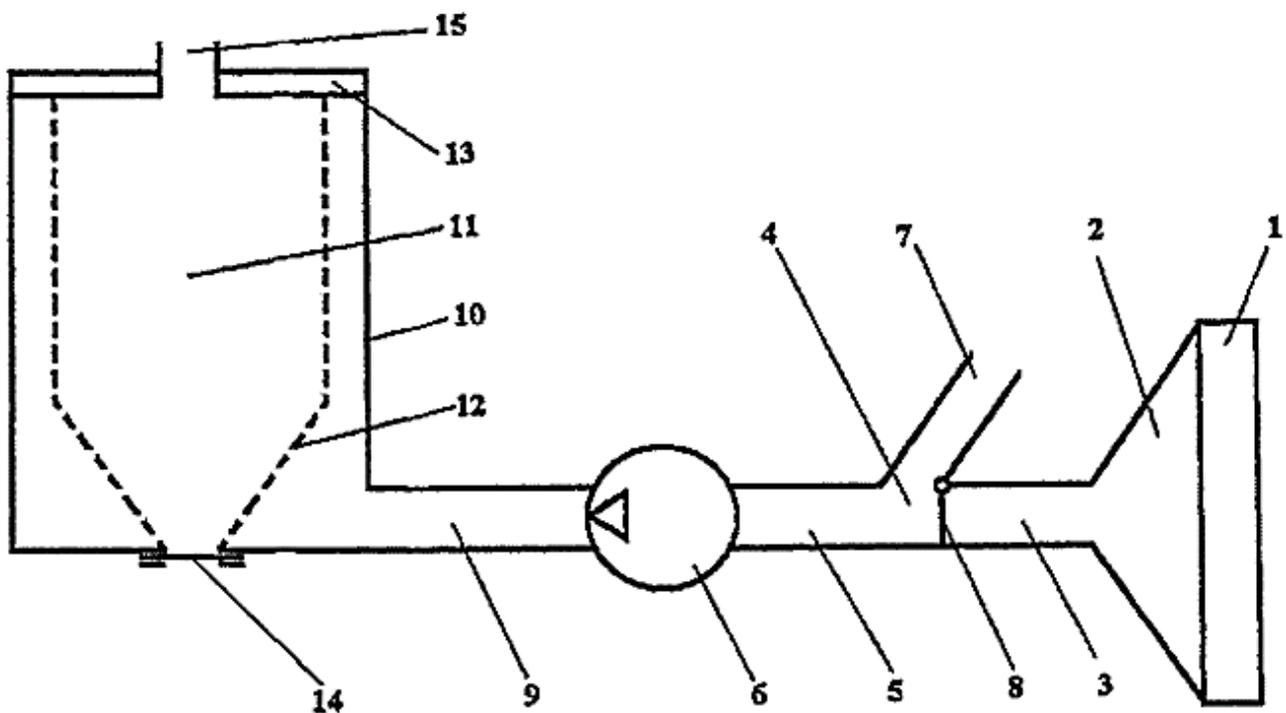


Рисунок 6.3 – Автономное устройство для сушки растительного сырья

Автономное устройство для сушки растительного сырья работает следующим образом. Самоходная технологическая машина выполняет работы, связанные с заготовкой растительного сырья, которое загружается в бункер 12 сушильной камеры 11. По воздухопроводу 9 от вентилятора 6 в корпус 10 сушильной камеры 11 подается воздух, который поступает в решетчатый бункер, сушит сырье и через распо-

ложенный на крышке 13 патрубок 15 выходит в атмосферу. Воздух к вентилятору 6 поступает по воздухопроводу 5 от тройника 4. Заслонка 8 перекрывает воздухопровод 7, связанный с атмосферой, при этом к воздухопроводу 5 горячий воздух поступает от радиатора 1 через конфузор 2 и воздухопровод 3.

При понижении температуры двигателя внутреннего сгорания, например, на стоянке технологической машины термостат включает привод заслонки 8, которая перекрывает воздухопровод 3, прекращая просасывание воздуха через радиатор 1 двигателя внутреннего сгорания. Воздух к вентилятору 6 поступает по воздухопроводам 5 и 7 из атмосферы. Процесс сушки не прекращается. При достижении же двигателем нормального температурного режима термостат через привод поворачивает заслонку 8, перекрывает воздухопровод 7 и сообщает вентилятор 6 через воздухопроводы 5 и 3 с радиатором 1. В сушильную камеру вновь поступает горячий воздух. Таким образом, сушка сырья осуществляется в процессе его заготовки. Высушенное сырье выгружается из бункера через задвижку 14.

Повышение производительности происходит за счет совмещения технологических операций заготовки и сушки растительного сырья. Снижение потребления энергии для сушки происходит за счет полезного использования отводимого от двигателя внутреннего сгорания тепла. Обеспечение мобильности и автономности происходит за счет установки устройства на самоходную технологическую машину.

#### *Автономное устройство для сушки растительного сырья<sup>4</sup>*

Задача изобретения – упрощение конструкции и повышение качества сушки.

Технический результат достигается тем, что автономное устройство для сушки растительного сырья, содержащее печь, электронный блок управления, сушильную камеру с размещенным в ней лотком для сырья, воздухоподувку с воздухопроводами, снабжено двигателем Стирлинга, включающим в себя вал, горячую и холодную полости, причем горячая полость соединена с печью, а вал механически связан с генератором, электрически соединенным через электронный блок

---

<sup>4</sup>Патент РФ № 2463537С1 МПК F26В 9/06, F26В 20/0 Автономное устройство для сушки растительного сырья / Холопов В.Н., Невзоров В.Н., Ярум А.И., Самойлов В.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный технологический университет». – Заявл. 29.03.2011, опубл. 10.10.2012.

управления с электромотором привода воздуходувки, которая воздуховодами через расположенные в печи трубы нагрева воздуха соединена с сушильной камерой, лоток которой связан с вибратором, при этом привод вибратора через электронный блок управления электрически соединен с генератором, а сушильная камера и печь снабжены соединенными с электронным блоком управления датчиками температуры, причем между печью и горячей полостью двигателя Стирлинга установлена заслонка с приводом, связанным через электронный блок управления с генератором, а система возбуждения генератора связана с электронным блоком управления.

На рисунке 6.4 изображена схема автономного устройства для сушки растительного сырья.

Устройство содержит печь 1, двигатель Стирлинга 2, горячей полостью (на рисунке 6.4 горячая и холодная полости двигателя Стирлинга не показаны) соединенный с печью 1. Между печью 1 и двигателем Стирлинга 2 размещена заслонка 3, соединенная приводом 4 через электронный блок управления 5 с генератором 6, механически связанным с валом 7 двигателя Стирлинга 2. Генератор 6 электрически через электронный блок управления 5 связан с электромотором 8 привода воздуходувки 9. Воздуходувка 9 соединена воздуховодом 10 с трубами нагрева воздуха 11, расположенными внутри печи 1, а жаровые трубы 11 воздуховодами 12 – с сушильной камерой 13. Сушильная камера 13 снабжена лотком 14 для растительного сырья, причем лоток 14 соединен с вибратором 15, который электрически через электронный блок управления 5 соединен с генератором 6. В сушильной камере 13 расположен датчик температуры 16, а в печи 1 расположен датчик температуры 17, при этом датчики температуры 16 и 17 соединены с электронным блоком управления 5. Система возбуждения генератора (на рис. 6.4. система возбуждения генератора не показана) связана с электронным блоком управления 5.

Автономное устройство для сушки растительного сырья работает следующим образом. В печи 1 разжигается топливо, имеющееся на месте сбора растительного сырья. Между горячей и холодной полостями двигателя Стирлинга 2 возникает разность температур. Вал 7 двигателя Стирлинга 2 начинает вращаться и приводит в движение ротор генератора 6. Выработанная генератором 6 энергия через электронный блок управления передается электромотору 8 привода воздуходувки 9, которая через воздуховод 10, трубы нагрева воздуха 11 и воздуховод 12 подает нагретый в печи 1 воздух в сушильную камеру

13. Проходя через лоток 14 для размещения сырья, горячий воздух нагревает растительное сырье и уносит с собой выделяющуюся влагу. Вибратор 15 периодически встряхивает лоток 14 с сырьем по заданной программе от блока управления 5. Блок управления 5, получая данные о температуре лотка 14 от датчика температуры 16, изменяет режим работы электродвигателя 8 привода воздуходувки 9, при этом изменяется объем подаваемого горячего воздуха в сушильную камеру 13.

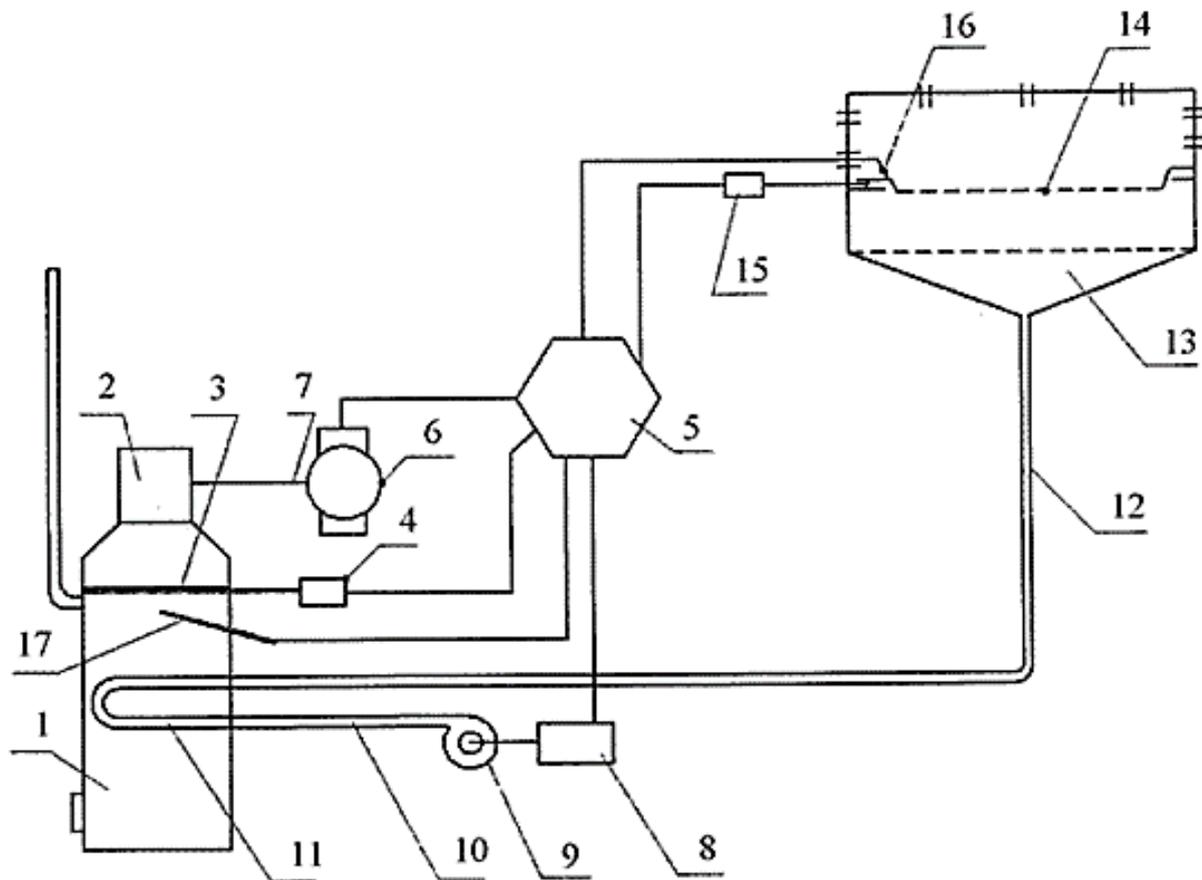


Рисунок 6.4 – Автономное устройство для сушки растительного сырья

Необходимая для получения требуемой мощности двигателя Стирлинга 2 разность температур между его горячей и холодной полостями определяется положением заслонки 3, регулирующей нагрев горячей полости двигателя Стирлинга 2. Привод 4 заслонки 3 получает сигналы от блока управления 5 в зависимости от температуры печи 1, определяемой датчиком температуры 17, и режима работы генератора 6.

Комбинация печь – двигатель Стирлинга с автоматической электронной системой управления режимами сушки позволит обеспечить высокое качество сушки растительного сырья непосредственно на месте его сбора с использованием любого твердого топлива,

имеющегося на месте сбора растительного сырья. Кроме этого, наличие генератора позволит освещать место работы сушилки и обеспечивать возможность работы обслуживающего сушилку и в темное время суток, благодаря чему суточная производительность устройства будет максимальной.

Устройство для сушки растительного сырья может быть использовано в сельскохозяйственном и лесохозяйственном производствах, а также и в других отраслях промышленности. Автономность работы устройства позволит использовать его непосредственно на месте сбора сырья, значительно снижая расходы на транспортировку сырья.

#### *Устройство для сушки растительного сырья<sup>5</sup>*

Техническая задача, на решение которой направлена полезная модель, заключается в повышении мобильности устройства и повышении качества сушки.

Задача решается тем, что в устройстве для сушки растительного сырья, содержащем размещенную в кожухе топку с дымовой трубой, снабженную дымовой дроссельной заслонкой, в кожухе над топкой расположена сушильная камера с датчиком температуры и решетчатыми лотками, при этом между топкой и сушильной камерой расположен дымовой канал, начало которого через первую дроссельную заслонку соединено дымовой трубой ниже дымовой дроссельной заслонки, а через вторую дроссельную заслонку – с наружным воздухом, выход дымового канала соединен с дымовой трубой выше дымовой дроссельной заслонки.

На рисунке 6.5 показан вид сбоку на устройство для сушки растительного сырья; на рисунке 6.6 показан разрез устройства для сушки растительного сырья по А-А.

Устройство для сушки растительного сырья содержит топку 1 с дымовой трубой 2 с дымовой дроссельной заслонкой 3. Топка 1 размещена в кожухе 4, в котором над топкой 1 расположена сушильная камера 5 с датчиком температуры 6 и решетчатыми лотками 7. Между топкой 1 и сушильной камерой 5 расположен дымовой канал 8, начало 9 которого через дроссельную заслонку 10 соединено с дымовой трубой 2 ниже дымовой дроссельной заслонки 3 и через дрос-

---

<sup>5</sup>Патент РФ № 184650U1 МПК F26B 9/00, F24B 1/02 Устройство для сушки растительного сырья / Невзоров В.Н., Холопов В.Н., Кожухарь Е.Н., Дидур Е.А., Олейникова Е.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет». – Заявл. 26.02.2018, опубл. 02.11.2018.

сельную заслонку *11* – с наружным воздухом. Конец *12* дымового канала *8* соединен с дымовой трубой *2* выше дымовой дроссельной заслонки *3*.

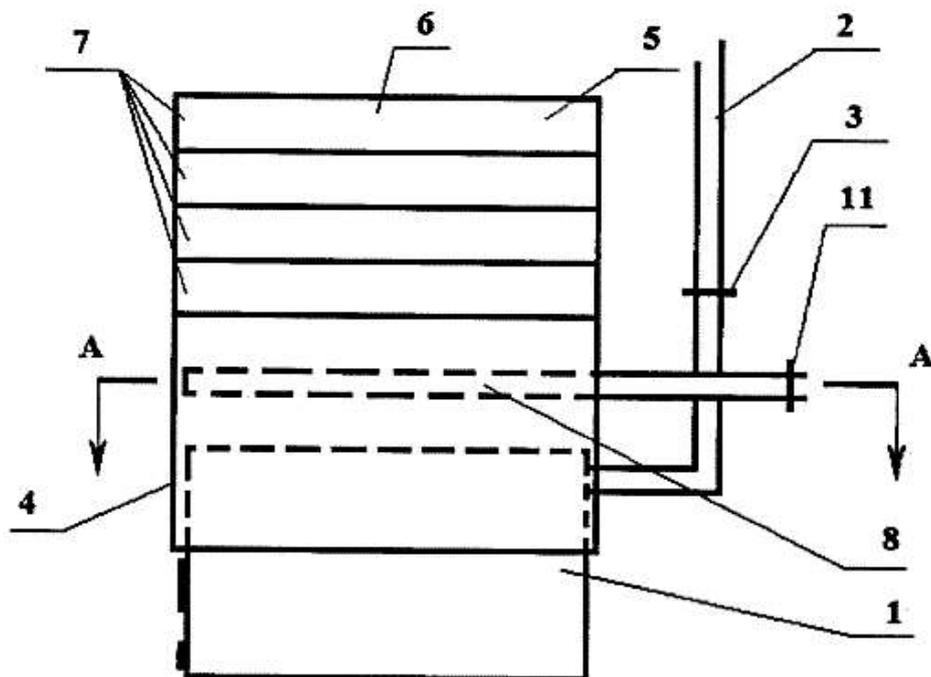


Рисунок 6.5 – Вид сбоку на устройство для сушки растительного сырья

A – A

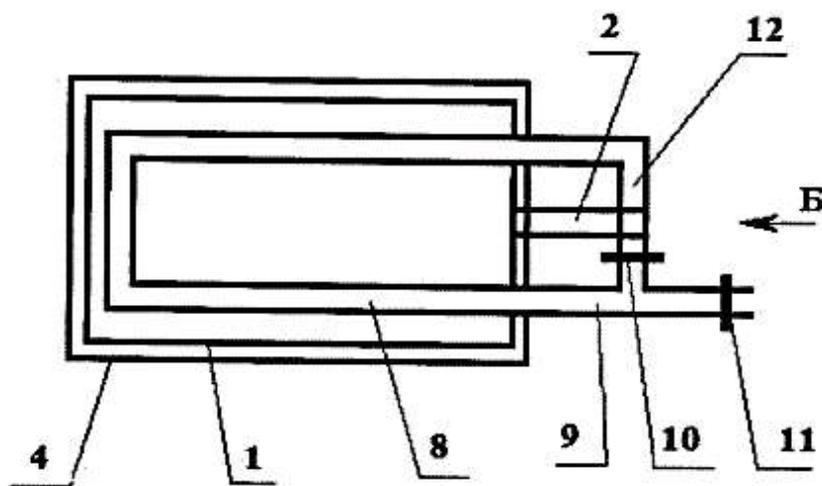


Рисунок 6.6 – Разрез устройства для сушки растительного сырья по А-А

Устройство для сушки растительного сырья работает следующим образом. При розжиге топki дымовая дроссельная заслонка *3* открыта, а дроссельные заслонки *10* и *11* закрыты. С появлением устойчивой тяги дымовую дроссельную заслонку *3* закрывают, а дроссельную заслонку *10* открывают. Дым от сгорания топлива в топке *1* за счет тяги в дымовой трубе через дроссельную заслонку *10* попада-

ет в начало 9 дымового канала 8. Из дымового канала 8 через его конец 12 дым попадает в дымовую трубу 2 выше дымовой дроссельной заслонки 3. При нагреве топки 1 наружный воздух снизу проходит между топкой 1 и кожухом 4 и далее проходит через сушильную камеру 5 и решетчатые лотки 7 и выходит наружу. При закрывании дымовой дроссельной заслонки 3 и открывании дроссельной заслонки 10 горячий дым, проходя через дымовой канал 8, способствует более быстрому прогреванию сушильной камеры 5. При превышении оптимальной температуры в сушильной камере 5, которая контролируется датчиком температуры 6, для сушки конкретного вида растительного сырья дроссельную заслонку 10 закрывают, а дымовую дроссельную заслонку 3 открывают. Горячий дым не проходит теперь через дымовой канал 8. Температура в сушильной камере 5 снижается. При необходимости дальнейшего снижения температуры сушильной камеры 5 открывается дроссельная заслонка 11. Наружный воздух за счет тяги в дымовой трубе 2 проходит через дымовой канал 8, уменьшая его температуру и, следовательно, температуру в сушильной камере 5. При понижении температуры в сушильной камере 5 дроссельную заслонку 11 закрывают и открывают дымовую дроссельную заслонку 3. Наружный воздух теперь не проходит через дымовой канал 8 и не охлаждает его. Температура в сушильной камере 5 повышается. Для дальнейшего повышения температуры в сушильной камере 5 закрывают дымовую дроссельную заслонку 3 и открывают дроссельную заслонку 10.

#### *Мобильное устройство для сушки<sup>6</sup>*

Техническая задача, на решение которой направлена полезная модель, заключается в повышении мобильности устройства и качества сушки.

Задача решается тем, что в мобильном устройстве для сушки, содержащем размещенную в кожухе топку с дымовой трубой и тепловой аккумулятор, в кожухе над топкой расположена сушильная камера с датчиком температуры и решетчатыми лотками, при этом между топкой и сушильной камерой расположен тепловой аккумулятор,

---

<sup>6</sup>Патент РФ № 185021U1 МПК F26B 9/00, F24B 1/02 Мобильное устройство для сушки / Невзоров В.Н., Холопов В.Н., Кожухарь Е.Н., Янова М.А., Олейникова Е.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет». – Заявл. 02.03.2018, опубл. 19.11.2018.

выполненный воздухопроницаемым, в виде послойно расположенных камней.

На рисунке 6.7 показана схема мобильного устройства для сушки.

Мобильное устройство для сушки растительного сырья содержит топку 1 с дымовой трубой 2. Топка 1 размещена в кожухе 3, в котором над топкой 1 расположена сушильная камера 4 с датчиком температуры 5 и решетчатыми лотками 6. Между топкой 1 и сушильной камерой 4 расположен тепловой аккумулятор 7, выполненный в виде послойно расположенных камней 8.

Мобильное устройство для сушки растительного сырья работает следующим образом. При розжиге топки дым за счет тяги проходит по дымовой трубе 2. Воздух между кожухом 3 и топкой 1, нагреваясь, поднимается вверх и проходит через тепловой аккумулятор 7. В тепловом аккумуляторе 7 нагретый воздух частично отдает тепло камням 8. Далее воздух проходит через сушильную камеру 4 с решетчатыми лотками 6, в которой температура воздуха контролируется датчиком температуры 5, и сушит растительное сырье. При уменьшении температуры в топке 1 проходящий через тепловой аккумулятор 7 воздух получает от нагретых камней 8 дополнительное тепло, при увеличении же температуры в топке 1 воздух частично отдает тепло тепловому аккумулятору 7, увеличивая температуру камней 8.

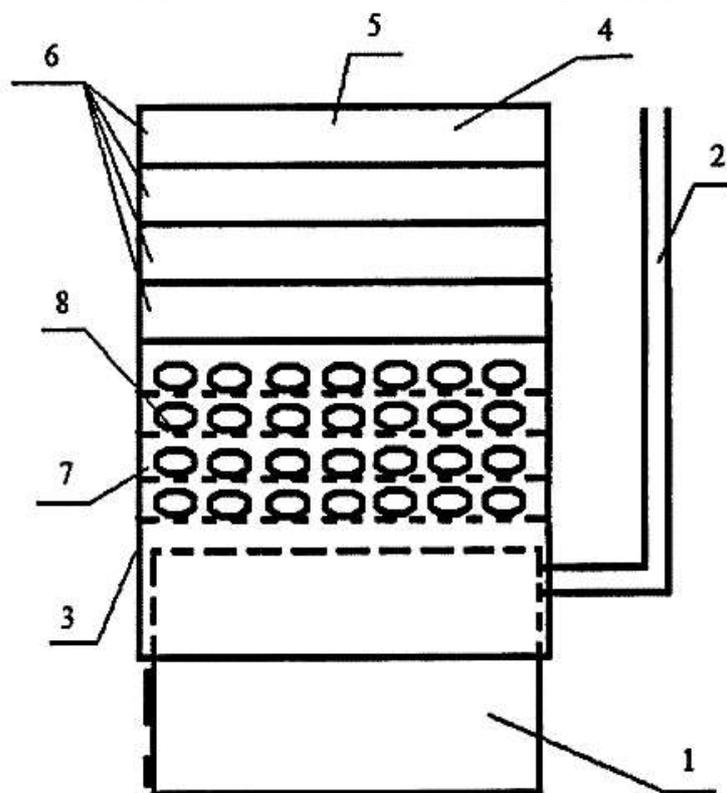


Рисунок 6.7 – Схема мобильного устройства для сушки

Таким образом, при изменении температуры в топке температура в сушильной камере будет изменяться в более узких пределах, что способствует повышению качества сушки сырья.

Представленные в разделе конструкции и принцип работы нового запатентованного технологического оборудования позволят осуществить модернизацию технологического процесса сушки дикорастущего сырья с целью повышения производительности и качества получаемого сушеного материала для дальнейшего использования в пищевой промышленности при производстве различных продуктов питания.

### *Контрольные вопросы*

1. За счет чего достигается технический результат устройства для сушки высоковлажного растительного сырья?
2. В чем преимущество автономного устройства для сушки растительного сырья?
3. В чем заключается задача автономного устройства для сушки растительного сырья?
4. В чем новизна мобильного устройства для сушки?
5. На что необходимо обращать внимание при проектировании нового устройства для сушки растительного сырья?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии «Технологии и оборудование для сушки растительного сырья» представлены материалы по технологиям и оборудованию для сушки дикорастущего сырья из труднодоступных районов Сибири.

Учитывая большие запасы дикорастущего растительного сырья, предназначенного для использования в пищевой перерабатывающей промышленности, в представленном пособии рассмотрена классификация трав, корней, ягод и грибов с указанием используемых частей изучаемого сырья для определения основных методов воздействия процесса сушки с целью получения всего комплекса технологии переработки растительного сырья.

В имеющихся главах пособия также даны теоретические основы сушки растительного сырья, учитывающие методы консервирования, формы связи влаги с материалом, периоды и скорости процесса сушки, особенности технологии тепловой сушки с примерами технологических схем, приведены типы и конструкции сушильных установок, методы расчета контактных, конвективных и сублимационных сушилок, примеры расчета сушильных аппаратов на основе использованного в пищевой промышленности дикорастущего сырья Сибири.

В работе также представлено новое инновационное техническое оборудование для сушки растительного сырья, разработанное авторами лично, получившее патент Российской Федерации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Атаназевич, В.И. Сушка пищевых продуктов / В.И. Атаназевич. – М.: Делц, 2000. – 296 с.
2. Борисова, Т.В. Основные свойства пищевого сырья, полуфабрикатов продуктов / Т.В. Борисова, В.Г. Зологина, Б.Д. Левин. – Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2008. – 98 с.
3. Васильев, В.Н. Технология сушки. Основы тепло- и массообмена / В.Н. Васильев, В.Е. Куцакова, С.В. Фролов. – СПб.: Гиорд, 2013. – 224 с.
4. Лебедев, П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок / П.Д. Лебедев. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 319 с.
5. Лебедев, П.Д. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий (курсовое проектирование) / П.Д. Лебедев, А.А. Щукин. – М.: Энергия, 1970. – 408 с.
6. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия. – 472 с.
7. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – 10-е изд. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.
8. Семенов, Г.В. Сушка сырья: мясо, рыба, овощи, фрукты, молоко / Г.В. Семёнов, Г.И. Касьянов. – Ростов н/Д: МарТ, 2002. – 112 с.
9. Чагин, О.В. Оборудование для сушки пищевых продуктов / О.В. Чагин, Н.Р. Кокина, В.В. Пастин. – Иваново: Иван. хим.-технол. ун-т, 2007. – 138 с.
10. Ченцова, Л.И. Процессы и аппараты пищевых производств: учеб. пособие / Л.И. Ченцова, М.Н. Шайхутдинова, Т.В. Борисова. – Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2004. – 112 с.
11. Черепнин, В.Я. Пищевые растения Сибири / В.Я. Черепнин. – Новосибирск, 1987. – 188 с.
12. Шумский, К.П. Основы расчета вакуумной сублимационной аппаратуры / К.П. Шумский, А.И. Мялкин. – М.: Машиностроение, 1967. – 224 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Теплофизические характеристики дикорастущих ягод по данным А.Н. Расшепкина

Таблица П.1 – Теплофизические свойства свежих ягод

Вид ягод	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Тепло- емкость, Дж/(кг·К)	Тепло- проводность, Вт/(м·к)	Температуро- проводность, 10 <sup>7</sup> м <sup>2</sup> /с
Брусника	1065	3731	0,52	1,32
Жимолость	980	3755	0,53	1,43
Ирга	1052	3440	0,52	1,41
Черная смородина	1059	3767	0,52	1,32
Облепиха масленичная	969	3837	0,55	1,52

Таблица П.2 – Теплофизические свойства высушенных ягод

Вид ягод	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Тепло- емкость, Дж/(кг·К)	Тепло- проводность, Вт/(м·к)	Температуро- проводность, 10 <sup>7</sup> м <sup>2</sup> /с
Брусника	770	1291	0,13	1,35
Жимолость	490	1267	0,15	2,70
Ирга	650	1268	0,19	2,00
Черная смородина	750	1141	0,09	1,70
Облепиха масленичная	450	1239	0,13	3,40

Таблица П.3 – Теплофизические свойства замороженных ягод

Вид ягод	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Тепло- емкость, Дж/(кг·К)	Тепло- проводность, Вт/(м·к)	Температуро- проводность, 10 <sup>7</sup> м <sup>2</sup> /с
Брусника	984	2138	1,90	9,05
Жимолость	911	2144	1,94	10,37
Ирга	982	2032	1,75	8,75
Черная смородина	978	2154	1,93	9,15
Облепиха мас- леничная	900	2173	2,00	10,24

Таблица П.4 – Физические свойства воды

Свойства	Вода	Лед
Удельная теплоемкость, ккал/(кг·°С)	1,01	0,5007
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1000,0	917
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , ккал/м·ч·°С	0,475	1,91

Таблица П.5 – Теплота сублимации для температур от 10 до 30 °С

Температура		Теплота сублимации	
°С	К	Ккал/кг	кДж/кг
-10	263,16	682,5	2857,5
-12	261,16	683,6	2862,1
-14	259,16	684,7	2866,7
-16	257,16	685,9	2871,7
-18	255,16	687,0	2876,3
-20	253,16	688,1	2880,9
-22	251,16	688,9	2884,3
-24	249,16	690,0	2888,9
-26	247,16	691,2	2892,3
-28	245,16	692,3	2898,8
-30	243,16	693,4	2903,4

Таблица П.6 – Основные характеристики водяного пара при температурах от 100 до -60 °С

$t$ , °С	$\rho$ , н/м <sup>2</sup>	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$i'$	$i''$	$r$
				ккал/кг		
1	2	3	4	5	6	7
100	101300	1,67	0,598	100,04	638,9	539,0
95	86200	1,98	$5,05 \cdot 10^{-1}$	95,07	637,2	542,1
90	71400	2,36	$4,26 \cdot 10^{-1}$	89,98	635,1	545,1
85	58900	2,83	$3,54 \cdot 10^{-1}$	85,02	6333,3	548,3
80	48500	3,41	$2,93 \cdot 10^{-1}$	79,95	631,3	551,3
75	39300	4,13	$2,42 \cdot 10^{-1}$	74,99	629,3	554,3
70	32200	5,05	$1,98 \cdot 10^{-1}$	69,93	627,3	557,4
65	25500	6,20	$1,61 \cdot 10^{-1}$	64,98	625,2	560,2
60	20200	7,68	$1,3 \cdot 10^{-1}$	59,94	623,2	563,3
55	16200	9,58	$1,04 \cdot 10^{-1}$	54,94	621,1	566,2
50	12500	12,05	$8,3 \cdot 10^{-2}$	49,95	619,0	569
45	9800	15,28	$6,54 \cdot 10^{-2}$	44,96	616,8	571,8
40	7400	19,55	$5,11 \cdot 10^{-2}$	39,98	614,7	574,7
35	5500	25,3	$3,96 \cdot 10^{-2}$	34,99	612,5	577,5

## Окончание таблицы П.6

1	2	3	4	5	6	7
32	4850	29,57	$3,38 \cdot 10^{-2}$	32	611,3	579,3
30	4350	32,9	$3,04 \cdot 10^{-2}$	30,0	610,4	580,4
28	3850	36,7	$2,72 \cdot 10^{-2}$	28,0	609,5	581,5
26	3430	41,0	$2,44 \cdot 10^{-2}$	26,0	608,6	582,6
24	3040	45,9	$2,18 \cdot 10^{-2}$	24,0	607,8	583,8
22	2690	51,5	$1,94 \cdot 10^{-2}$	22,0	606,9	584,9
20	2340	57,8	$1,73 \cdot 10^{-2}$	20,03	606	586
18	2120	65,1	$1,54 \cdot 10^{-2}$	18,03	605,1	587,1
16	1860	73,4	$1,36 \cdot 10^{-2}$	16,03	604,2	588,2
14	1650	82,9	$1,21 \cdot 10^{-2}$	14,04	603,4	589,4
12	1450	93,9	$1,07 \cdot 10^{-2}$	12,04	602,5	590,5
10	1250	106,4	$9,40 \cdot 10^{-3}$	10,04	601,6	591,6
8	1090	121,0	$8,27 \cdot 10^{-3}$	8,64	600,8	592,8
7	1021	129,1	$7,75 \cdot 10^{-3}$	7,03	600,4	593,4
6	955	137,8	$7,26 \cdot 10^{-3}$	6,03	599,9	593,9
5	889	147,2	$6,79 \cdot 10^{-3}$	5,03	599,5	594,5
4	830	157,3	$6,36 \cdot 10^{-3}$	4,02	599,1	595,1
3	772	168,2	$5,94 \cdot 10^{-3}$	3,02	598,6	595,6
2	720	179,9	$5,56 \cdot 10^{-3}$	2,01	598,2	596,2
1	669	192,6	$5,19 \cdot 10^{-3}$	1,0	597,7	596,6
0	611	206,3	$4,85 \cdot 10^{-3}$	0	597,2	597,3
0	610 (611 <sup>*</sup> )	206,3	$4,85 \cdot 10^{-3}$	0	597,2	676,5 <sup>**</sup>
-1	562 (567 <sup>*</sup> )	222	$4,48 \cdot 10^{-3}$	-	-	677,5 <sup>**</sup>
-2	517 (527 <sup>*</sup> )	241	$4,15 \cdot 10^{-3}$	-	-	678,6 <sup>**</sup>
-4	437 (454 <sup>*</sup> )	283	$3,53 \cdot 10^{-3}$	-	-	681 <sup>**</sup>
-6	370 (390 <sup>*</sup> )	332	$3,02 \cdot 10^{-3}$	-	-	683 <sup>**</sup>
-10	260 (286 <sup>*</sup> )	457	$2,19 \cdot 10^{-3}$	-	-	687,5 <sup>**</sup>
-15	165 (190 <sup>*</sup> )	747	$1,34 \cdot 10^{-3}$	-	-	692,5 <sup>**</sup>
-20	103	1110	$9,0 \cdot 10^{-4}$	-	-	698 <sup>**</sup>
-25	63	1720	$5,8 \cdot 10^{-4}$	-	-	703,5 <sup>**</sup>
-30	37,3	2810	$3,6 \cdot 10^{-4}$	-	-	709 <sup>**</sup>
-40	12,4	8100	$1,23 \cdot 10^{-4}$	-	-	720,6 <sup>**</sup>
-45	6,6	15800	$6,3 \cdot 10^{-5}$	-	-	726,3 <sup>**</sup>
-50	3,87	25800	$3,88 \cdot 10^{-5}$	-	-	730 <sup>**</sup>
-55	2,0	50500	$1,98 \cdot 10^{-5}$	-	-	736 <sup>**</sup>
-60	1,08	106000	$9,45 \cdot 10^{-6}$	-	-	742 <sup>**</sup>

\* Над переохлажденной водой.

\*\* Теплота сублимации, равная сумме теплоты плавления и теплоты испарения (начиная от 0 °С и ниже).

Таблица П.7 – Зависимость температуры насыщенного водяного пара от давления (в диапазоне давлений от 760 до  $1,4 \cdot 10^{-22}$  мм рт. ст.)

$\rho$ , н/м <sup>2</sup> (мм рт. ст.)	t, °С	$\rho$ , н/м <sup>2</sup> (мм рт. ст.)	t, °С
1	2	3	4
101300 (760)	100	600 (4,5)	-0,2 (надо льдом)
100000 (760)	99,6		
80000 (600)	93,5	586 (4,4)	-0,6
60000 (450)	85,5	573 (4,3)	-0,85
40000 (300)	75	560 (4,2)	-1,1
20000 (150)	60,1	546 (4,1)	-1,4
10000 (75)	45,7	534 (4,0)	-1,7
8000 (60)	41	520 (3,9)	-2,0
6000 (45)	36,4	506 (3,8)	-2,3
5000 (37,5)	32,5	493 (3,7)	-2,6
4000 (30)	29	480 (3,6)	-2,9
3000 (22,5)	24	466 (3,5)	-3,25
2340 (17,53)	20	454 (3,4)	-3,6
2000 (15)	17,2	440 (3,3)	-3,9
1600 (12)	14	426 (3,2)	-4,3
1200 (9)	9,7	400 (3)	-5,0
1000 (7,5)	7	386 (2,9)	-5,5
800 (6)	3,8	373 (2,8)	-5,9
611 (4,58)	0	360 (2,7)	-6,3
346 (2,6)	-6,7	8,0 (0,06)	-43,8
333 (2,5)	-7,15	6,66 (0,05)	-45,4
320 (2,4)	-7,6	5,33 (0,04)	-47,0
306 (2,3)	-8,1	4,0 (0,03)	-49,8
294 (2,2)	-8,6	2,66 (0,02)	-52,7
280 (2,1)	-9,2	1,33 (0,01)	-57,6
266 (2,0)	-9,8	1,07 (0,008)	-59
254 (1,9)	-10,45	1,0 (0,0075)	-60,5
240 (1,8)	-11,1	0,8 (0,006)	-62
226 (1,7)	-11,75	0,4 (0,003)	-67
213 (1,6)	-12,40	0,1 ( $7,5 \cdot 10^{-4}$ )	-76,3
200 (1,5)	-13,15	0,08 ( $6,0 \cdot 10^{-4}$ )	-77,8
186 (1,4)	-13,9	0,04 ( $3,0 \cdot 10^{-4}$ )	-82
173 (1,3)	-14,75	0,01 ( $7,5 \cdot 10^{-5}$ )	-90
160 (1,2)	-15,60	$8 \cdot 10^{-3}$ ( $6,0 \cdot 10^{-5}$ )	-91,5
146 (1,1)	-16,55	$4 \cdot 10^{-3}$ ( $3,0 \cdot 10^{-5}$ )	-96
133 (1,0)	-17,5	$1 \cdot 10^{-3}$ ( $7,5 \cdot 10^{-6}$ )	-101,5
120 (0,9)	-18,1	$8 \cdot 10^{-4}$ ( $6 \cdot 10^{-6}$ )	-103

## Окончание табл. П.7

1	2	3	4
107 (0,8)	-19,7	$4 \cdot 10^{-4}$ ( $3 \cdot 10^{-6}$ )	-106
100 (0,75)	-20,3	$1 \cdot 10^{-4}$ ( $7,5 \cdot 10^{-7}$ )	-112
97,7 (0,735)	-20,7	$8 \cdot 10^{-5}$ ( $6,0 \cdot 10^{-7}$ )	-113
93 (0,7)	-21,1	$4 \cdot 10^{-5}$ ( $3,0 \cdot 10^{-7}$ )	-116
80,0 (0,6)	-22,5	$1 \cdot 10^{-5}$ ( $7,5 \cdot 10^{-8}$ )	-121,5
66,6 (0,5)	-24,4	$8 \cdot 10^{-6}$ ( $6,0 \cdot 10^{-8}$ )	-122
60,0 (0,45)	-25,4	$4 \cdot 10^{-6}$ ( $3,0 \cdot 10^{-8}$ )	-124,5
53,3 (0,4)	-26,6	$1 \cdot 10^{-6}$ ( $7,5 \cdot 10^{-9}$ )	-129,5
40,0 (0,3)	-29,5	$8 \cdot 10^{-7}$ ( $6 \cdot 10^{-9}$ )	-130
26,6 (0,2)	-33,5	$4 \cdot 10^{-7}$ ( $3 \cdot 10^{-9}$ )	-132,5
20,0 (0,15)	-36	$1 \cdot 10^{-7}$ ( $7,5 \cdot 10^{-10}$ )	-137
13,33 (0,1)	-39,3	$8 \cdot 10^{-8}$ ( $6,0 \cdot 10^{-10}$ )	-137,5
12 (0,09)	-40,8	$4 \cdot 10^{-8}$ ( $3,0 \cdot 10^{-10}$ )	-139
10,7 (0,08)	-41,4	$1 \cdot 10^{-8}$ ( $7,5 \cdot 10^{-11}$ )	-143,5
10,0 (0,075)	-42	$9,9 \cdot 10^{-13}$ ( $7,4 \cdot 10^{-15}$ )	-150,0
9,3 (0,07)	-42,6	$1,86 \cdot 10^{-20}$ ( $1,4 \cdot 10^{-22}$ )	-183,0

# **ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Учебное пособие

**Тепляшин Василий Николаевич**

**Ченцова Лилия Ивановна**

**Невзоров Виктор Николаевич**

*Электронное издание*

Редактор Т.М. Мастрич

Подписано в свет 28.10.2019. Регистрационный номер 313  
Редакционно-издательский центр Красноярского государственного аграрного университета  
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117  
e-mail: rio@kgau.ru