

# **Технология производства сухого молока**

## **Выпаривание и распылительная сушка**

Вагн Вестергаард

**Niro A/S**

Копенгаген, Дания



## Предисловие к пятому изданию

Основу первого издания этой книги, вышедшего в 1980 году, составил учебный материал семинара, который проводился в 1978 году в Монтевидео, Уругвай, под эгидой UNIDO (Организации объединенных наций по промышленному развитию).

Разработка технологий выпаривания и распылительной сушки и связанного с ними оборудования в компании Niro ведется постоянно. Это новое пятое издание было переработано, чтобы познакомить читателей с коаксиальными сепараторами, разработанными ради уменьшения размеров и увеличения эффективности выпарных аппаратов. Кроме того, появилась новая глава, в которой излагаются принципы проектирования выпарных установок, позволяющие избежать роста термофильных бактерий и их спор.

Компания Niro также значительно усовершенствовала технологию испарительной сушки. В этой новой редакции описываются допускающие безразборную мойку рукавные фильтры, которые заменяют циклоны, что повышает общую эффективность сушки. Помимо этого, в издание включено описание совершенно новой экологически безопасной установки распылительной сушки со встроенными воздушными фильтрами и аппаратами псевдоожженного слоя.

Я хочу выразить благодарность коллегам за их ценные замечания, редактирование и печать этой новой публикации и надеюсь, что она окажется полезной при обучении технологов молочной и пищевой промышленности, а также послужит в качестве справочника для операторов распылительных сушилок.

Книга будет доступна на английском, немецком, испанском, итальянском, русском, а позднее также на польском и китайском языках. Английскую версию в электронной форме можно найти на сайте Niro [www.niro.com](http://www.niro.com).

Niro A/S, Копенгаген, октябрь 2003 г.

Vagn Westergaard

# Содержание

---

<b>Введение.....</b>	<b>13</b>
Выпаривание:.....	13
Распылительная сушка:.....	13
Сушка в виброкипящем слое: .....	13
Распылительная сушка со встроенным псевдоожженным слоем: .....	13
Сушка со встроенным транспортером: .....	13
<b>Выпаривание.....</b>	<b>15</b>
Выпарные аппараты с падающей пленкой .....	17
Термокомпрессия .....	23
Механическая компрессия пара.....	28
Сравнение расхода энергии в разных выпарных аппаратах.....	31
Конструкция промышленных выпарных аппаратов.....	33
Вспомогательное оборудование выпарных аппаратов .....	35
<b>Сепараторы.....</b>	<b>37</b>
Сепараторы с тангенциальной подачей пара .....	37
Коаксиальный сепаратор .....	37
<b>Система распределения продукта.....</b>	<b>37</b>
Динамическая система распределения.....	37
Статическая система распределения.....	39
<b>Подогреватели .....</b>	<b>39</b>
Сpirальные подогреватели .....	39
Подогреватели с прямыми трубами.....	41
<b>Оборудование для пастеризации и выдержки.....</b>	<b>41</b>
Выполнение бактериологических требований.....	41
Сухое обезжиренное молоко с ограниченной термической денатурацией....	43
Поддержание качества цельного молока.....	43
Термоустойчивое сухое молоко для высокотемпературной обработки .....	43
Быстрорастворимое цельное сухое молоко .....	43
<b>Подогревающее оборудование для снижения роста термофильных бактерий.....</b>	<b>47</b>
Промежуточная чистка .....	49
Сверхвысокотемпературная обработка.....	49
Сдвоенная система подогрева .....	49
Контактный подогрев инжекцией пара.....	49
Регенерация тепла в контактном подогревателе .....	49
<b>Оборудование для конденсации.....</b>	<b>51</b>
Конденсатор смешения .....	53

Поверхностный конденсатор . . . . .	53
<i>Вакуумное оборудование . . . . .</i>	53
Вакуумный насос . . . . .	55
Пароструйный вакуумный насос . . . . .	55
<i>Градирни . . . . .</i>	55
<i>Специальные концентраторы . . . . .</i>	55
<i>Охладители мгновенного действия . . . . .</i>	57
<i>Оборудование для водяного уплотнения . . . . .</i>	57
<i>Контрольно-измерительные приборы и автоматика . . . . .</i>	57
Расход исходного продукта . . . . .	59
Температура пастеризации . . . . .	59
Давление пара в термокомпрессоре . . . . .	59
Содержание сухих веществ . . . . .	59
Вакуум и температура кипения в последнем корпусе . . . . .	61
<i>Свойства сгущенного продукта . . . . .</i>	63
Обезжиренное молоко . . . . .	65
Цельное молоко . . . . .	65
Сыворотка . . . . .	67
<b>Распылительная сушка . . . . .</b>	<b>69</b>
<i>Сушильная камера . . . . .</i>	71
<i>Система нагрева и распределения воздуха . . . . .</i>	73
<i>Фильтрование воздуха . . . . .</i>	73
<i>Система нагрева воздуха . . . . .</i>	75
Поверхностный нагрев . . . . .	75
Контактный нагрев . . . . .	75
<i>Распределение воздуха . . . . .</i>	79
С вращающимся воздушным потоком . . . . .	81
С поршневым воздушным потоком . . . . .	81
<i>Система подачи . . . . .</i>	81
<i>Танки подачи . . . . .</i>	81
<i>Танк для воды . . . . .</i>	83
<i>Насос концентрата . . . . .</i>	83

## NIRO A/S

<i>Система подогрева</i> . . . . .	83
Пластинчатый теплообменник . . . . .	83
Теплообменник “труба в трубе” . . . . .	83
Скребковый теплообменник . . . . .	85
Прямая инжекция пара (ПИП) . . . . .	85
Мягкая инжекция пара (МИП) . . . . .	85
<i>Фильтр</i> . . . . .	85
<i>Гомогенизатор/насос высокого давления</i> . . . . .	87
<i>Подающая линия</i> . . . . .	87
<i>Распылитель</i> . . . . .	87
<i>Распыление струйными форсунками</i> . . . . .	89
<i>Распыление двойными форсунками</i> . . . . .	91
<i>Роторное распыление</i> . . . . .	93
Расход жидкости . . . . .	93
Окружная скорость . . . . .	93
Вязкость жидкости . . . . .	95
<i>Распыление при распылительной сушке молочных продуктов</i> . . . . .	97
Струйные форсунки . . . . .	97
Роторный распылитель(атомайзер) . . . . .	99
<i>Система сепарирования порошка</i> . . . . .	99
<i>Циклон</i> . . . . .	99
<i>Рукавные фильтры</i> . . . . .	105
<i>Скрубберы</i> . . . . .	105
Рециркуляция с водой . . . . .	107
Однократный проход с молоком или сывороткой . . . . .	107
<i>Рукавный фильтр с СИП</i> . . . . .	109
Сравнение различных сепараторов порошка . . . . .	113
<i>Система пневмотранспорта и охлаждения</i> . . . . .	113
<i>Двухступенчатая сушка и охлаждение в псевдоожженном слое</i> . . . . .	117
<i>Контрольно-измерительные приборы и автоматика</i> . . . . .	117
<b>Технология производства сухого молока</b> . . . . .	<b>121</b>
<i>Одноступенчатая сушка</i> . . . . .	121

Содержание влаги в готовом порошке . . . . .	125
Температура и влажность сушильного воздуха . . . . .	125
Содержание сухих веществ в концентрате . . . . .	125
Распыление . . . . .	125
Вязкость концентрата . . . . .	125
<i>Двухступенчатая сушка . . . . .</i>	129
<i>Двухступенчатая сушка в аппарате Vibro-Fluidizer (поршневой поток) . . . . .</i>	133
<i>Двухступенчатая сушка с неподвижным псевдоожженным слоем (с обратным смешением) . . . . .</i>	139
Кольцевой псевдоожженный слой (сушилки Compact) . . . . .	141
Циркуляционный псевдоожженный слой (сушилки MSD) . . . . .	145
Распылительная сушка с встроенным фильтрами и псевдоожженными слоями (IFD) . . . . .	147
<i>Агломерация . . . . .</i>	151
<i>Агломерация при распылительной сушке . . . . .</i>	151
Спонтанная первичная агломерация . . . . .	151
Принудительная первичная агломерация . . . . .	151
Спонтанная вторичная агломерация . . . . .	151
Принудительная вторичная агломерация . . . . .	151
Разделение . . . . .	153
Истирание . . . . .	155
Классификация . . . . .	155
Структура агломерата и свойства продукта . . . . .	155
<i>Увлажняющая агломерация . . . . .</i>	159
Увлажнение . . . . .	159
Агломерация . . . . .	159
Повторная сушка . . . . .	163
Охлаждение . . . . .	165
Сортировка . . . . .	165
<b>Экономия тепла в линии по производству сухого молока . . . . .</b>	<b>167</b>
<i>Подогрев . . . . .</i>	167
Подогрев сушильного воздуха конденсатом . . . . .	167
Подогрев сушильного воздуха вторичным паром из выпарного аппарата . . . . .	168
Рекуперация тепла . . . . .	169
Скруббер . . . . .	169
Рекуператоры тепла . . . . .	169
Рекуператор воздух-воздух . . . . .	172
Рекуператор воздух-жидкость-воздух . . . . .	172
<i>Другие средства экономии энергии . . . . .</i>	174

<b>Лабораторные методы контроля сырого молока, концентрата и сухого продукта .....</b>	<b>176</b>
Качество сырого молока .....	176
Обезжиренное молоко .....	176
Цельное молоко .....	177
Сладкая сыворотка .....	177
Лабораторный контроль молочного сырья .....	178
Кислотность ( <i>pH</i> ) .....	178
Титруемая кислотность .....	178
Лабораторный контроль концентрата молока .....	180
Содержание воздуха в концентрате молока .....	180
Растворимость .....	180
Пригорелые частицы .....	182
Лабораторный контроль сухого молока .....	182
Влагосодержание .....	182
Насыпная плотность .....	184
Плотность частиц, абсорбированный воздух .....	185
Количество воздуха в концентрате .....	187
Пенообразующая способность концентрата .....	187
Тип применяемого диска или размер форсунки .....	188
Содержание сухого вещества в концентрате .....	188
Условия сушки (одно- или двухступенчатый процесс) .....	188
Воздух между частицами .....	188
Сыпучесть .....	190
Растворимость .....	192
Пригорелые частицы .....	194
Общее содержание жир .....	195
Поверхностные свободные жиры .....	195

<i>Смачиваемость</i>	197
<i>Диспергируемость</i>	200
<i>Осадок</i>	202
<i>Медленно растворимые частицы (МРЧ)</i>	202
<i>Тест в горячей воде</i>	202
<i>Кофейный тест</i>	203
<i>Степень гидратации</i>	203
<i>Лабораторный контроль сухой сыворотки</i>	205
<i>Общая влажность и свободная влажность</i>	205
<i>Гигроскопичность и комкуемость</i>	205
<b>Дегидратация пищевых продуктов</b>	<b>207</b>
<i>Различные пищевые ингредиенты</i>	207
<i>Белки</i>	207
<i>Углеводы</i>	208
<i>Жиры</i>	208
<i>Крахмал</i>	210
<i>Другие компоненты</i>	210
<i>Сухое молоко обычной растворимости</i>	210
<i>Быстрорасторимое сухое молоко</i>	212
<i>Быстрорасторимое сухое обезжиренное молоко</i>	215
<i>Быстрорасторимое сухое цельное молоко</i>	217
<i>Сыворотка</i>	221
<i>Захоронение</i>	223
<i>Утилизация жидкой сыворотки в качестве корма</i>	223
<i>Сушка сыворотки при традиционном сыроварении</i>	225

<i>Выпаривание . . . . .</i>	225
Содержание молочной кислоты . . . . .	229
Содержание аморфной лактозы . . . . .	229
Содержание влаги . . . . .	229
<i>Кристаллизация концентрата сыворотки . . . . .</i>	231
Тепловая обработка перед выпариванием . . . . .	234
Содержание сухих веществ в концентрате . . . . .	234
Размер кристаллов лактозы . . . . .	234
<i>Частичная кристаллизация концентрата сыворотки . . . . .</i>	236
<i>Распылительная сушка концентрата сыворотки . . . . .</i>	238
Распылительная сушка в установке с пневмотранспортом . . . . .	238
Распылительная сушка в установке с псевдоожженным слоем . . . . .	240
Распылительная сушка в установке со встроенным транспортером . . . . .	240
Распылительная сушка концентрата сыворотки высокой концентрации . . . . .	242
<i>Производство сухой кислой сыворотки . . . . .</i>	242
<i>Сыворотка с добавкой жира . . . . .</i>	243
<i>Маточный раствор . . . . .</i>	247
<i>Сывороточные белки . . . . .</i>	247
<i>Пермеат . . . . .</i>	249
Сухой процесс . . . . .	251
Влажный процесс . . . . .	251
Процесс TIXOTHERM™ . . . . .	255
<i>Лактоза . . . . .</i>	257
<i>Деминерализованная сыворотка . . . . .</i>	258
Мембранный фильтрация . . . . .	258
Ионный обмен . . . . .	260
Электродиализ . . . . .	260
<i>Особые продукты . . . . .</i>	262
<i>Детское питание . . . . .</i>	262
Обычное сухое цельное молоко . . . . .	263
Сухое цельное молоко с добавкой углеводов . . . . .	263
Ферментированное молоко . . . . .	263
Человеческое молоко . . . . .	263
Продукты с крахмалом . . . . .	265
<i>Производство сухого детского питания . . . . .</i>	266
<i>Казеинаты . . . . .</i>	270

Периодический процесс .....	270
Непрерывный процесс.....	270
Распылительная сушка казеинатов.....	272
<i>Продукты, содержащие бактерии.....</i>	<i>273</i>
<i>Заменитель молока .....</i>	<i>274</i>
Сухое смешивание сухого обезжиренного молока и жира.....	274
Периодический процесс .....	275
Непрерывный процесс.....	276
<i>Сухое цельное молоко с высоким содержанием свободных жиров.....</i>	<i>278</i>
<i>Порошки для производства сыра .....</i>	<i>280</i>
Обезжиренное молоко.....	280
Ретентат.....	285
<i>Порошкообразный сыр.....</i>	<i>285</i>
<i>Смеси какао, молока и сахара.....</i>	<i>287</i>
<i>Забеливатель для кофе.....</i>	<i>287</i>
<i>Порошкообразный забеливатель-капучино.....</i>	<i>288</i>
<b>Список иллюстраций .....</b>	<b>290</b>
<b>Библиография.....</b>	<b>298</b>



# Введение

---

Для превращения жидкого продукта в сухой порошок требуется удалить практически всю воду, количества которой часто превосходит количество готового продукта.

При удалении воды из обрабатываемого продукта в нем происходят глубокие изменения физической структуры и внешнего вида – от водянистой жидкости до сухого порошка в конце процесса. Следовательно, единственный метод удаления воды не может быть оптимальным для всего процесса, тем более что пищевые продукты могут сильно отличаться по составу. В пищевой и молочной промышленности для этой цели применяются следующие методы удаления влаги

## **Выпаривание:**

- концентрирование молока от жидкости, близкой по вязкости к воде, до стущенного продукта.

## **Распылительная сушка:**

- превращение стущенного продукта в капли и испарение воды из этих капель для получения порошка, состоящего из сухих частиц.

## **Сушка в вибропароварочном слое:**

- Аппараты Vibro-Fluidizer были разработаны для досушивания и охлаждения, чтобы повысить эффективность сушки и улучшить качество порошка.

## **Распылительная сушка со встроенным псевдоожженным слоем:**

- делает сушку еще более экономичной и, к тому же, позволяет обрабатывать продукты, трудно поддающиеся сушке.

## **Сушка со встроенным транспортером:**

- сушилка с ленточным конвейером в нижней части сушильной камеры используется для переработки продуктов, практически не поддающихся сушке в обычной распылительной сушилке.

Каждый метод требуется приспособить к свойствам перерабатываемого материала на каждой стадии процесса. Чем труднее продукт для сушки, тем сложнее установка.

	Продукт / концентрат
	Конденсат
	Вторичный пар
	Пар

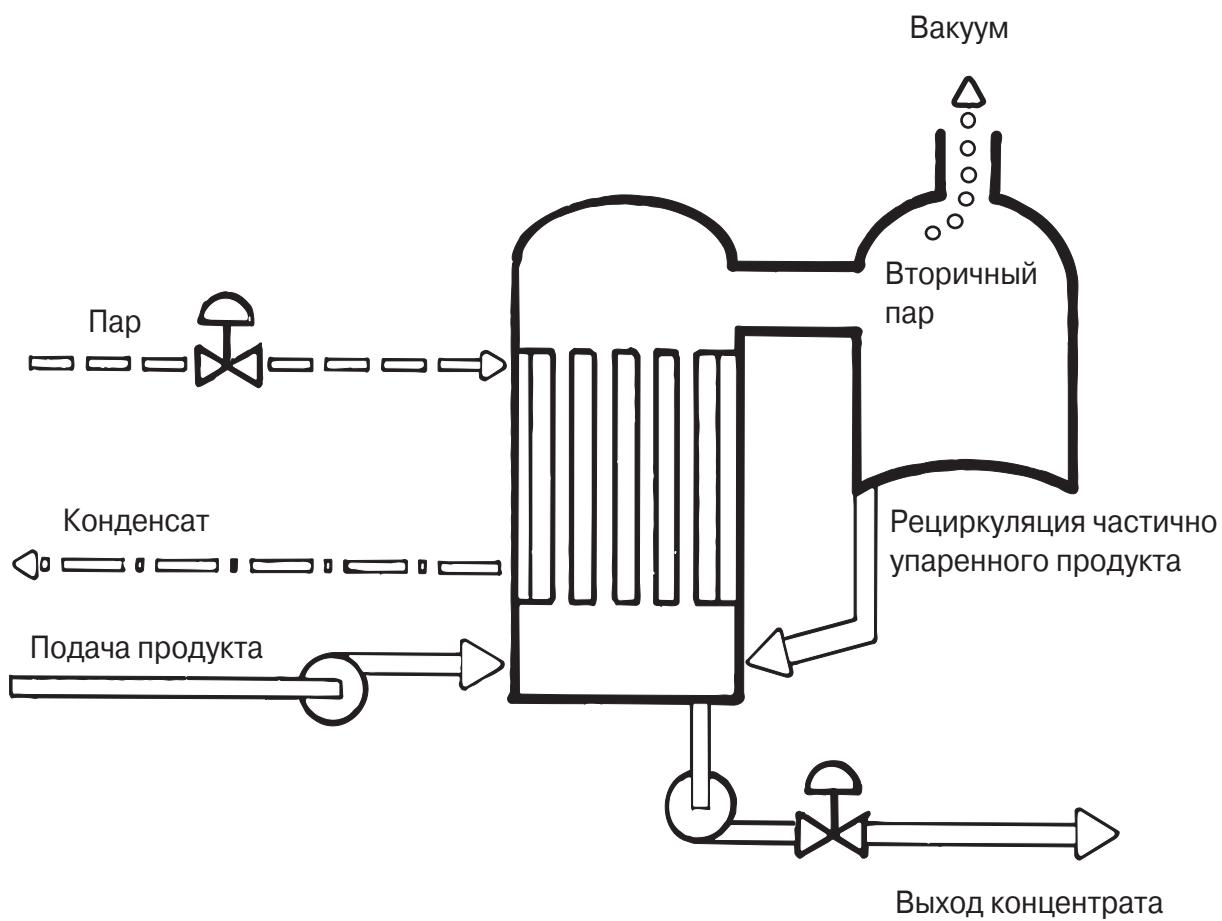


Рис. 1 Выпарной аппарат с принудительной циркуляцией

# Выпаривание

---

Процесс выпаривания молока известен давно: еще в 1200 г. Марко Поло описывал производство пастообразного молочного концентрата в Монголии. Следующее упоминание концентрированного молока встречается в литературе только через 600 лет, но после этого технология быстро развивалась и на нее получено множество патентов.

Простейший выпарной аппарат представляет собой обычный открытый котел, нагреваемый паром или напрямую газом. Испарение происходит с поверхности, а выпариваемая жидкость нагревается до температуры кипения, соответствующей атмосферному давлению. На уровне моря она равна 100 °C, а на высоте около 5000 м над уровнем моря – 85 °C.

Поскольку испарение происходит с поверхности, площадь которой мала относительно объема котла, выпаривание требует длительного времени. Молоко подвергается воздействию высокой температуры, что ведет к повреждению белка, химическим реакциям, таким как реакция Мейларда или даже к коагуляции.

Развитие технологии концентрирования привело к созданию выпарных аппаратов с принудительной циркуляцией. В этих аппаратах молоко течет вверх по многочисленным трубам – поверхность нагрева стала больше, но поверхность испарения все еще ограничена, так как трубы и каналы между пластинами по-прежнему наполнены продуктом, который поэтому перегревается относительно температуры кипения. Только в верхней части труб образуется соковый пар и температура продукта снижается. Для разделения жидкости и пара желательно использовать центробежные сепараторы. В таких системах для требуемого сгущения необходима циркуляция продукта. Поэтому концентрация регулируется изменением количества упаренного раствора, выгружаемого из установки. На рисунке 1 показана схема выпарного аппарата с принудительной циркуляцией.

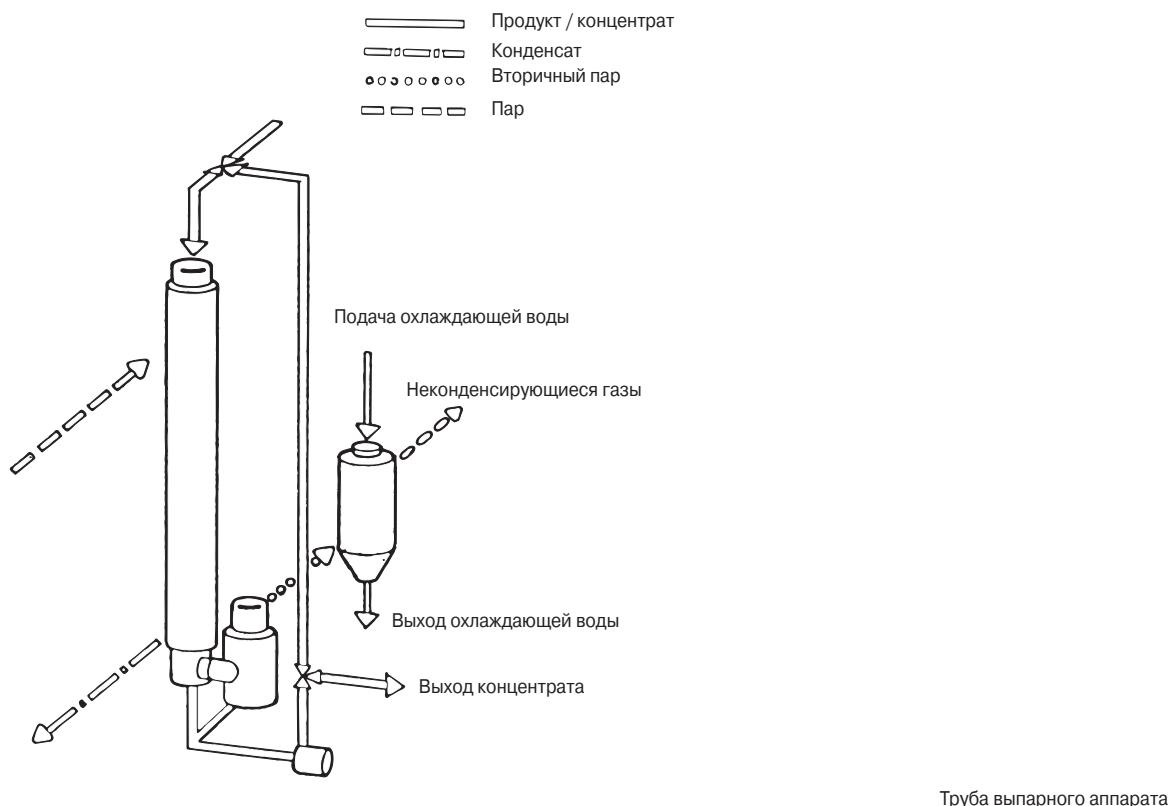


Рис. 2 Рециркуляционный выпарной аппарат с падающей пленкой.

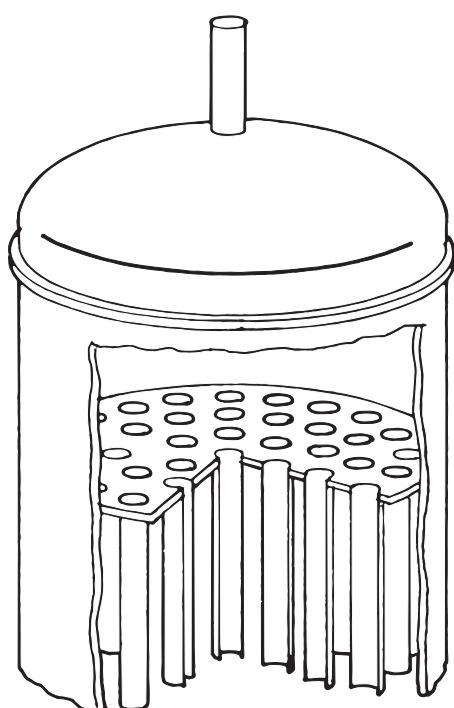


Рис. 3а Нагревательная камера выпарного аппарата.

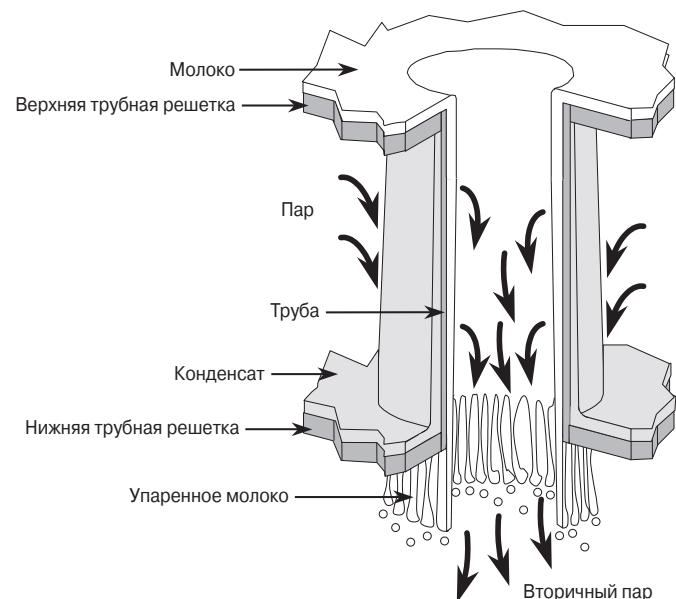


Рис. 3 Испарение в трубе выпарного аппарата с падающей пленкой.

## Выпарные аппараты с падающей пленкой

Более 40 лет назад выпарные аппараты с падающей пленкой практически вытеснили применявшиеся до того аппараты с принудительной циркуляцией. Этот тип аппаратов обеспечивает лучшее качество продукта, поскольку здесь сокращено время выдержки. Кроме того, количество продукта в аппарате уменьшилось, а поверхность испарения увеличилась. На рисунке 2 показана схема выпарного аппарата с падающей пленкой.

Выпариваемая жидкость равномерно распределяется по внутренней поверхности трубы (см. стр.2). Жидкость стекает, образуя тонкую пленку, в которой происходит кипение и испарение под действием теплоты греющего пара. См. рис. 3. Конденсат греющего пара стекает вниз по внешней поверхности трубы. В аппарате имеется много параллельно установленных труб. На обоих концах трубы заделаны в трубные решетки, а весь пучок труб заключен в кожух, см. рис. За. Пар подается внутрь кожуха. Поэтому пространство между трубами образует секцию нагрева. Внутренняя поверхность труб называется секцией кипения. Вместе они образуют так называемую выпарную колонну. Сгущенный продукт и вторичный пар выходят из нагревательной секции снизу, и большая часть продукта выгружается из аппарата. Остаток продукта и вторичный пар тангенциально подаются в сепаратор. Отделенный сгущенный продукт выгружается (обычно тем же насосом, что и основная часть продукта из нагревательной камеры), а пар отводится из верхней части сепаратора. Греющий пар конденсируется на внешней поверхности труб, и конденсат собирается в нижней части секции нагрева, откуда отводится насосом.

Чтобы разобраться в процессах тепло- и массообмена, составляющих основу выпаривания, нужно определить некоторые удельные величины.

Из данного количества исходного продукта (A) испаряется часть растворителя (B), в результате остается концентрат или сгущенный продукт (C). Таким образом

$$A = B + C \quad (1)$$

См. рис. 4, где представлены удельные величины и соответствующая схема тепловых потоков.

Коэффициент концентрирования ( $e$ ) является мерой интенсивности выпаривания и может быть определен как отношение исходного и сгущенного продуктов или отношение сухого вещества в сгущенном и исходном продуктах.

$$e = \frac{A}{C} = \frac{C - \text{Сгущеный}}{C - \text{Исходный}} \quad (2)$$

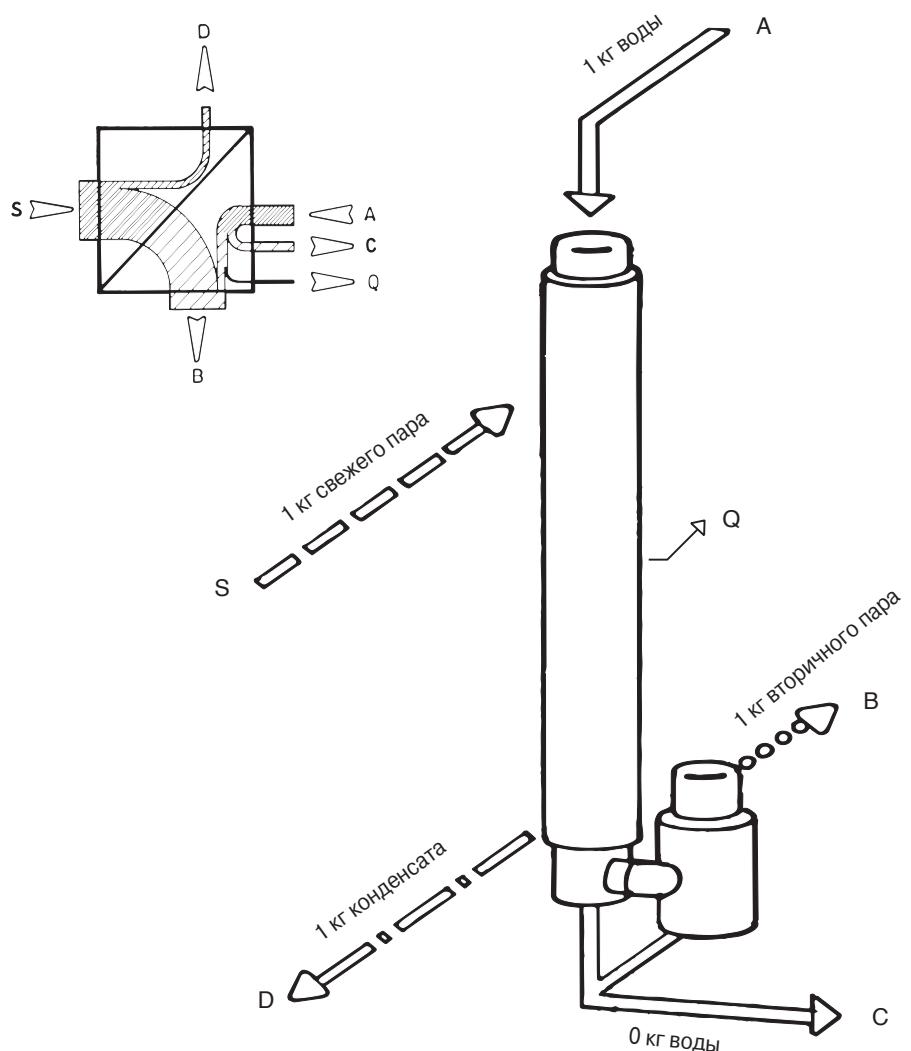


Рис. 4 Одноступенчатый выпарной аппарат. Определение различных удельных величин и соответствующая схема тепловых потоков

Если концентрации или коэффициент концентрирования известны, то по одной из величин А, В или С можно рассчитать остальные.

Данное количество	Искомое	Формула	
Исходный продукт А	B	$B = A \times \frac{e - 1}{e}$	(3)
	C	$C = A \times \frac{1}{e - 1}$	(4)
Растворитель В	A	$A = B \times \frac{e}{e - 1}$	(5)
	C	$C = B \times \frac{1}{e - 1}$	(6)
Концентрат С	A	$A = C \times e$	(7)
	B	$B = C \times (e - 1)$	(8)

где: А: исходный продукт в кг/ч

В: испаритель в кг/ч

С: концентрат в кг/ч

е: коэффициент концентрирования

См. формулу (2)

Поскольку молоко содержит белки, оно является термолабильным продуктом, и выпаривание (т.е. кипячение) при 100 °C приведет к такой степени денатурирования этих белков, что конечный продукт можно считать непригодным к употреблению. Поэтому секция кипения работает под вакуумом, т.е. кипение и испарение происходят при более низкой температуре, чем та, которая соответствует нормальному атмосферному давлению. Разрежение создается вакуумным насосом перед пуском выпарного аппарата и поддерживается за счет конденсации вторичного пара охлаждающей водой. При этом вакуумный насос или аналогичное устройство используется для удаления содержащихся в молоке неконденсирующихся газов.

При 100 °C энталпия выпаривания воды составляет 539 ккал/кг, а при 60 °C – 564 ккал/кг.

Поскольку молоко требуется нагреть от температуры, например, с 6 °C до точки кипения, а на поддержание вакуума, соответствующего температуре кипения 60 °C, требуется около 20 ккал/кг, получаем, если принять что тепловые потери составляют 2 %, следующую оценку потребности в энергии:

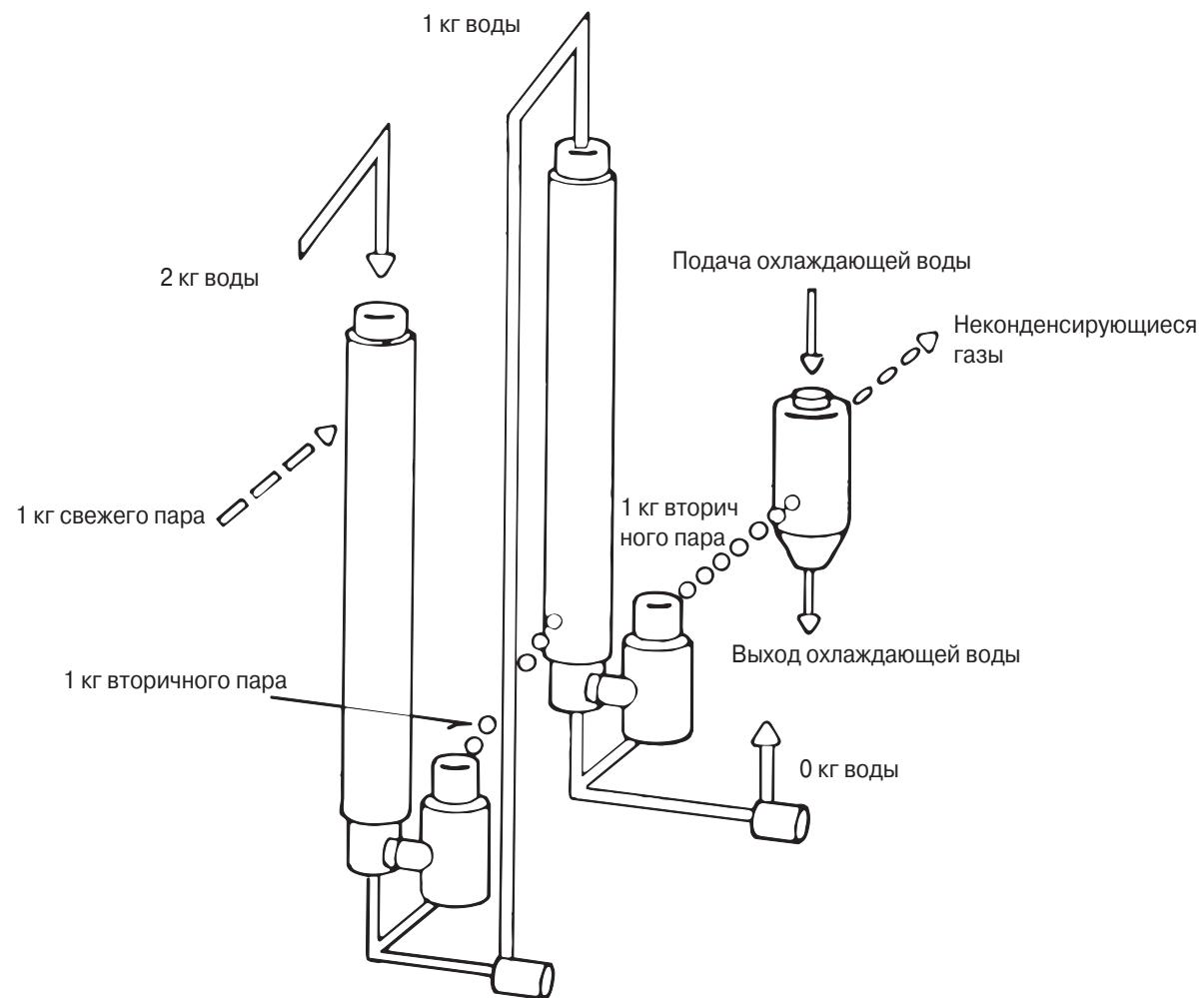


Рис. 5      Принцип двухступенчатого выпаривания воды

## NIRO A/S

Температура кипения	°C	100	60
Нагрев	ккал/кг	94	54
Выпаривание	ккал/кг	539	564
Вакуум	ккал/кг	-	20
Потребление энергии	ккал/кг	633	638
Потери тепла, около	ккал/кг	15	15
Общий расход энергии	ккал/кг	648	653

Что соответствует приблизительно 1,1 кг греющего пара на кг испаренной воды.

Для упрощения следующих примеров примем расход 1 кг греющего пара на кг испаренной воды.

Поскольку почти вся затраченная энергия заключена во вторичном паре, образовавшемся при испарении молока (см. рис. 4), очевидно, что ее можно использовать для дополнительного испарения воды за счет конденсации вторичного пара. Это достигается включением в выпарной аппарат еще одной нагревательной камеры. Эта вторая нагревательная камера – второй корпус аппарата, где температура кипения ниже, действует как конденсатор для вторичного пара из первого корпуса, и энергия этого пара используется при его конденсации.

Чтобы обеспечить во втором корпусе разность температур между продуктом и поступающим из первого корпуса вторичным паром, секция кипения второго корпуса должна работать при более высоком вакууме, соответствующем более низкой температуре кипения.

Точка кипения, °C	Разрежение, м вод.ст.	давление, мм рт.ст.	≈ высота над уровнем моря, м	Объем водяных паров, м <sup>3</sup> /кг
100	0	760	0	1,7
85	4,5	434	5 200	2,8
70	7,2	233	10 000	4,8
60	8,3	149	14 000	7,7
50	9,1	92	18 000	12,0
40	9,6	55	22 000	19,6

Конечно, можно добавить третий корпус, обогреваемый паром из второго, и т.д. Их число ограничено максимально достижимым разрежением, которое определяется количеством и температурой воды (обычно 20-30 °C), используемой для конденсации вторичного пара в последнем корпусе. Применение ледяной воды или непосредственного охлаждения фреоном для снижения температуры кипения в последнем корпусе, конечно, теоретически возможно, но другие факторы, такие как вязкость продукта, объем пара и кристаллизация лактозы определяют целесообразный предел – около 45 °C.

з рисунка 5 видно, что 1 кг пара позволяет выпарить 2 кг, а при использовании трех корпусов – 3 кг воды.

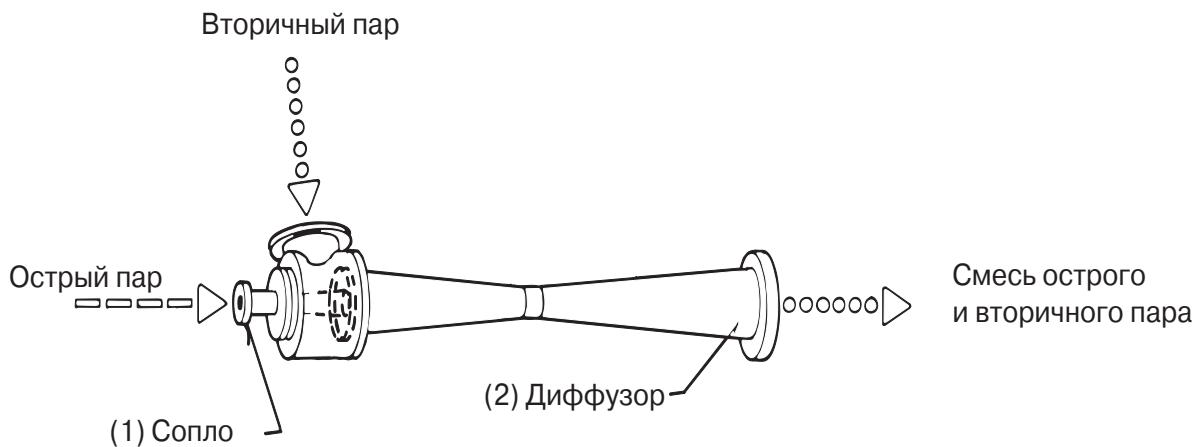


Рис. 6 Пароструйный компрессор

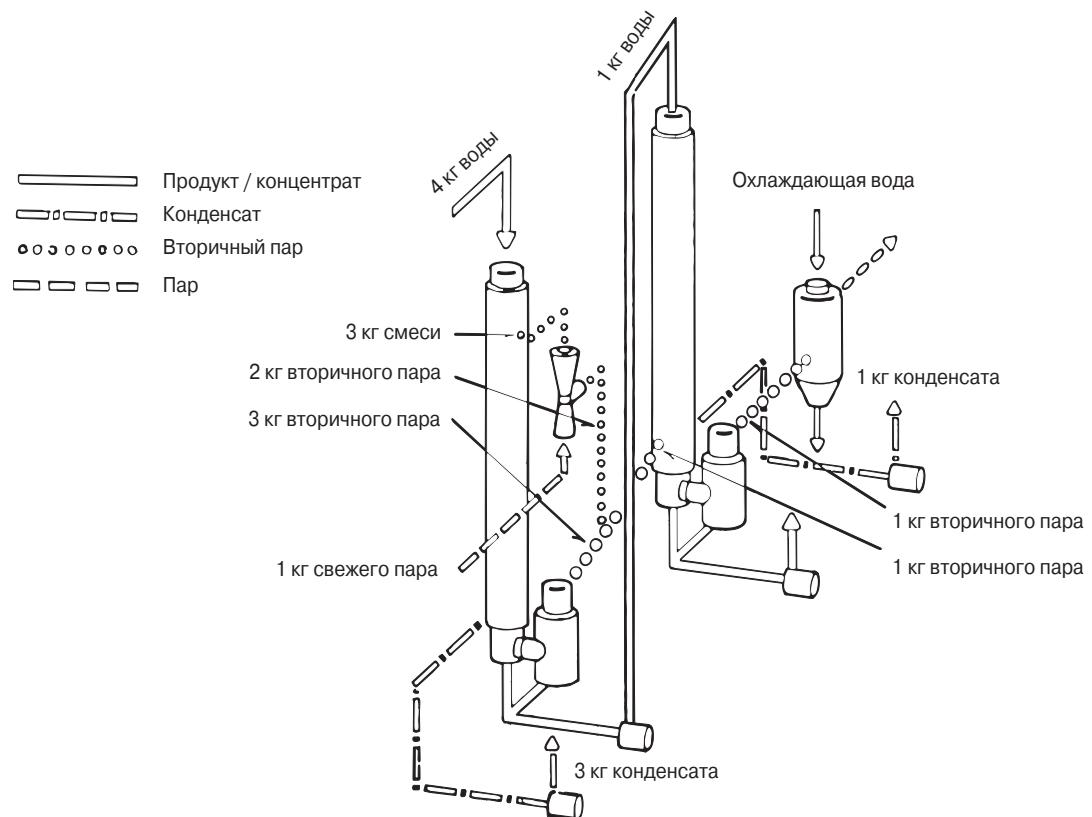


Рис. 7 Двухкорпусной выпарной аппарат с пароструйным компрессором

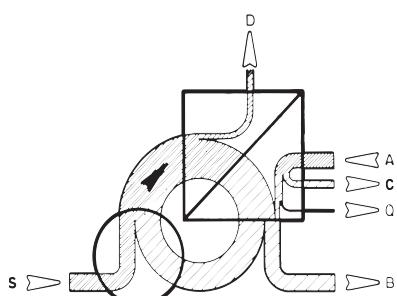


Рис. 8 Схема тепловых потоков. Двухкорпусной выпарной аппарат с пароструйным компрессором.

## Термокомпрессия

Другой способ экономии энергии состоит в применении термокомпрессора, т.е. увеличении температуры и давления вторичного пара в эжекторе с помощью греющего пара более высокого давления. Эжекторы работают при очень высоких скоростях потока и не имеют движущихся деталей. Они отличаются простотой конструкции, компактностью и низкой стоимостью.

На рисунке 6 показан принцип работы эжектора.

Острый пар проходит через сопло, где давление входящего пара преобразуется в скорость. В результате образуется струя, которая подсасывает часть вторичного пара из сепаратора выпарного аппарата. В диффузоре (2) образуется смесь острого и вторичного пара, имеющая первоначально высокую скорость, причем по мере снижения скорости давление (и температура) смеси возрастает. Эту смесь можно использовать в качестве греющего пара для выпарного аппарата. На рисунке 7 представлена технологическая схема двухкорпусного выпарного аппарата с термокомпрессором, а на рисунке 8 – соответствующая схема тепловых потоков.

Максимальная эффективность термокомпрессора, т.е. наибольшая скорость всасывания и, следовательно, высокая экономичность, достигается при низкой разности температур (давлений) между секциями нагрева и кипения.

Термокомпрессор необходимо приспосабливать к рабочим условиям. А эти условия могут меняться, например, тепловое сопротивление греющей поверхности увеличивается в процессе работы в результате отложений на греющих трубах. Это ведет к значительному снижению скорости всасывания. В выпарных аппаратах, которые должны работать с переменной производительностью, используется несколько эжекторов разной мощности. Кроме того, эжектор, рассчитанный на высокое давление острого пара, откачивает больше вторичного пара из сепаратора, чем эжектор, рассчитанный на меньшее давление. Для простоты примем в следующем примере, что эффективность эжектора равна 1:2, хотя современные эжекторы могут при определенных условиях работать с эффективностью 1:3.

Использование термокомпрессора в двухкорпусном выпарном аппарате позволяет испарить за счет 1 кг острого пара 4 кг воды, т.е. сэкономить столько же пара, как при добавлении двух корпусов в многокорпусной аппарат. Распределение общей разности температур  $\Delta t$ , существующей между первым и последним корпусами, по всем корпусам многокорпусного аппарата требует огромной поверхности нагрева и, соответственно, удорожает установку.

Общую поверхность нагрева можно сократить, увеличив  $\Delta t$  за счет более высокой температуры в секции нагрева первого корпуса, что увеличит температуру кипения. Но это приведет к загрязнению поверхности (образование микрослоя отложений, главным образом, молочных белков, на трубах снижает коэффициент К), особенно если молоко имеет высокую кислотность. Кроме того, при высокой температуре откладываются кристаллы фосфата кальция.

Обычно температура кипения в первом корпусе не превышает 66-68 °C (в зависимости от продукта и качества молока), если общая продолжительность обработки составляет 20 часов.

Поверхность одного корпуса выпарного аппарата рассчитывается по следующей формуле:

$$S = \frac{B \times h''}{K \times \Delta t} \quad (9)$$

где: S: поверхность нагрева, м<sup>2</sup>

B: производительность по выпаренной воде, кг/ч

h'': удельная теплопроводность, ккал/кг

K: коэффициент теплопередачи ккал х м<sup>-2</sup> х ч<sup>-1</sup> х °C<sup>-1</sup>

Δt: разность температур или движущая сила, °C  
(между греющей средой и кипящей жидкостью)

Важнейший фактор для конструирования выпарного аппарата – это коэффициент K, который определяется свойствами продукта и используемым уровнем температуры. Он зависит от...

температуры выпаривания

удельной теплоемкости

плотности

давления кипения

температурной депрессии

теплопроводности

вязкости

поверхностного натяжения

Другие факторы, влияющие на конструкцию:

термолабильность продукта

химические свойства продукта

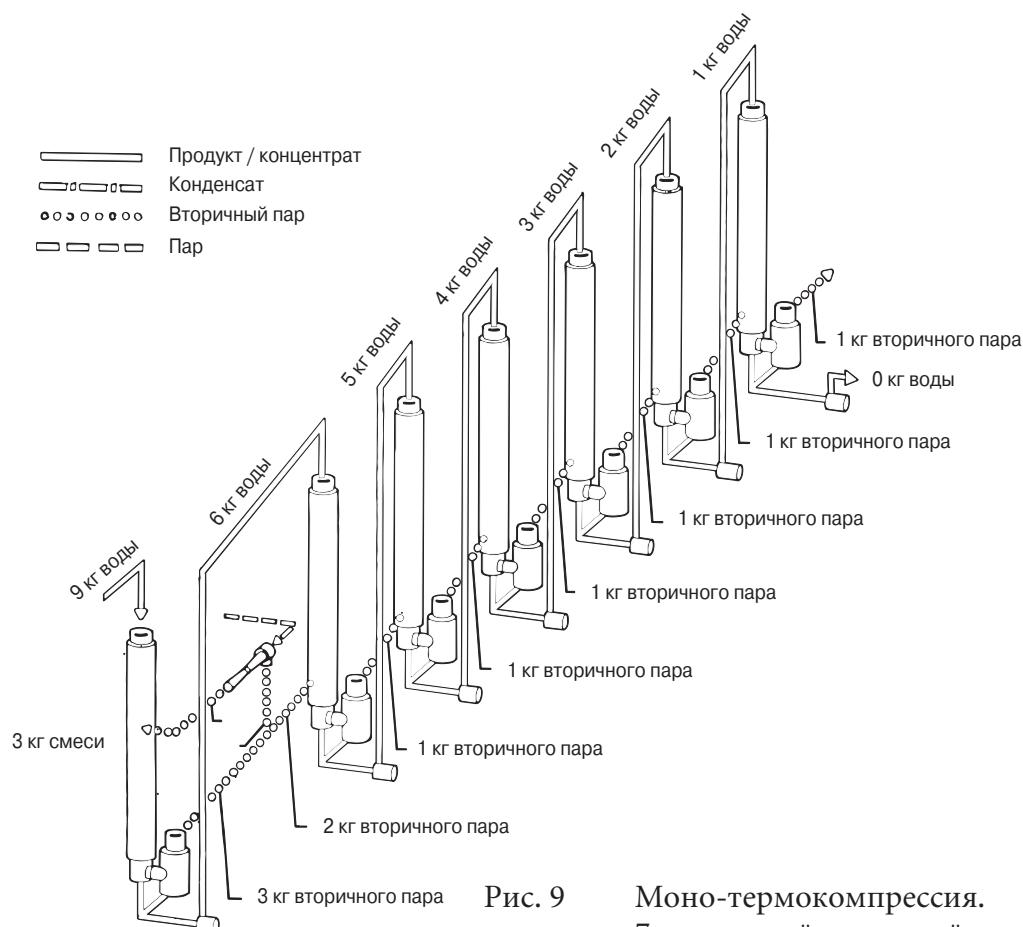


Рис. 9

Моно-термокомпрессия.  
7-корпусной выпарной аппарат  
с термокомпресором.

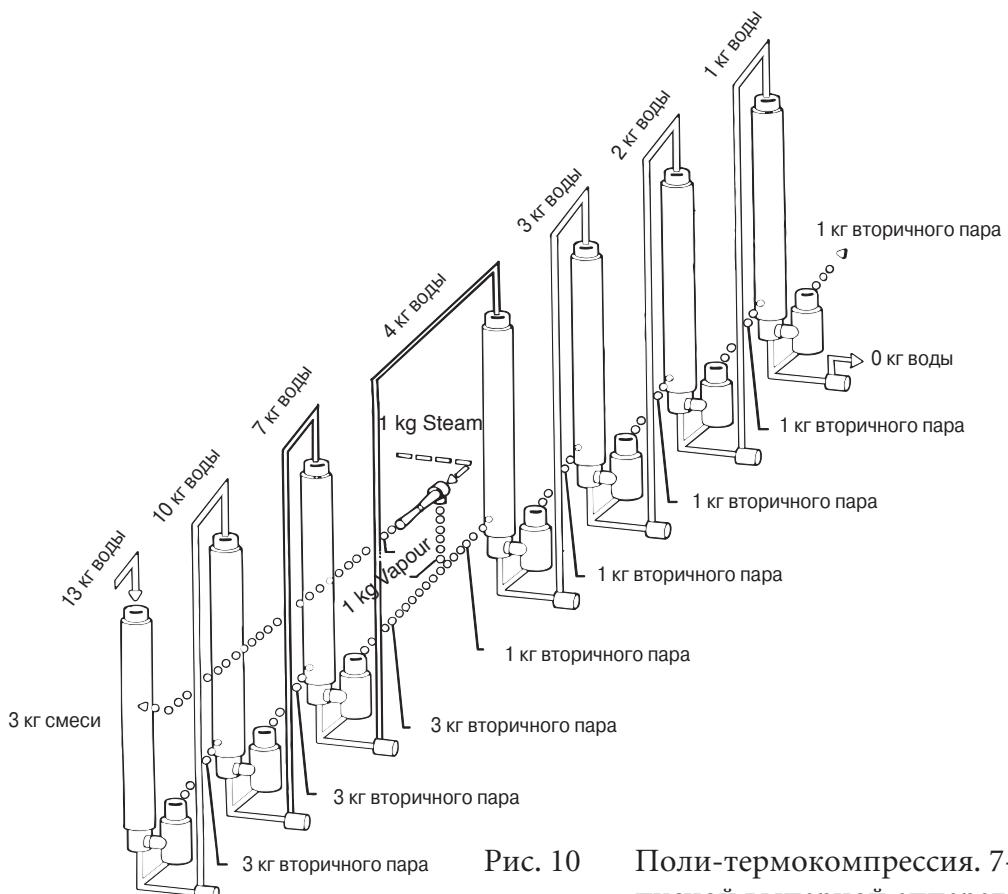


Рис. 10

Поли-термокомпрессия. 7-кор-  
пусной выпарной аппарат с  
термокомпресором.

Поэтому коэффициент К меняется от продукта к продукту, особенно в силу температурной депрессии, т.е. зависимости температуры кипения от концентрации молекул, а следовательно, от состава продукта и содержания сухого вещества. При 9 % сухого вещества, как в обезжиренном молоке, температурная депрессия меньше 1 °C, а при 48-50 % с.в. она достигает нескольких градусов. Только обширные лабораторные исследования позволяют сделать заключение об этом коэффициенте.

Производительность (С) выпарного аппарата равна

$$C = K \times S \times \Delta t \quad (9.1)$$

Таким образом, производительность выпарного аппарата можно повысить, увеличив поверхность или температуру кипения в первом корпусе. Как уже отмечалось, не рекомендуется использовать температуру выше 66-68 °C.

Общая  $\Delta t$  (обычно это 66 °C – 45 °C = 21 °C) распределяется между всеми корпусами. Это означает, что если в трехкорпусном выпарном аппарате на каждый корпус приходится большая  $\Delta t$  при относительно малой поверхности и небольших капитальных затратах, то с увеличением числа корпусов вместе со снижением расхода пара уменьшается доступная в каждом корпусе  $\Delta t$ . Это требует увеличения греющей поверхности, поэтому капитальная стоимость установки растет.

Термокомпрессор устанавливается между первым и вторым корпусом (моно-термокомпрессия), первым и третьим корпусом (би-термокомпрессия) или первым и четвертым корпусом (три-термокомпрессия). Он значительно влияет на экономию пара и капитальную стоимость. В 7-корпусном выпарном аппарате с моно-термокомпрессией (см. рис. 9) можно испарить 9 кг воды за счет 1 кг пара. В случае три-термокомпрессии термокомпрессор располагается между первым и четвертым корпусами (см. рис. 10). Здесь можно испарить 13 кг воды за счет 1 кг пара, поскольку весь вторичный пар из первого корпуса используется для нагрева второго корпуса, вторичный пар из второго корпуса – для нагрева третьего корпуса, а часть вторичного пара из третьего корпуса сжимается в термокомпрессоре.

Если термокомпрессор поднимает температуру пара на 9 °C, то для каждого из корпусов выпарного аппарата с три-термокомпрессией  $\Delta t$  равно 3 °C. Для того чтобы обеспечить испарение 9 кг воды в первых трех корпусах требуется увеличенная поверхность по сравнению, например, с моно-термокомпрессией.

Соответственно, можно при заданных длине и диаметре труб рассчитать число труб по вышеприведенной формуле (9).

Однако многокорпусные установки имеют один большой недостаток – длительная тепловая обработка продукта. И хотя это происходит при невысокой температуре, она отрицательно сказывается на вязкости сгущенного продукта. См. стр. ?????

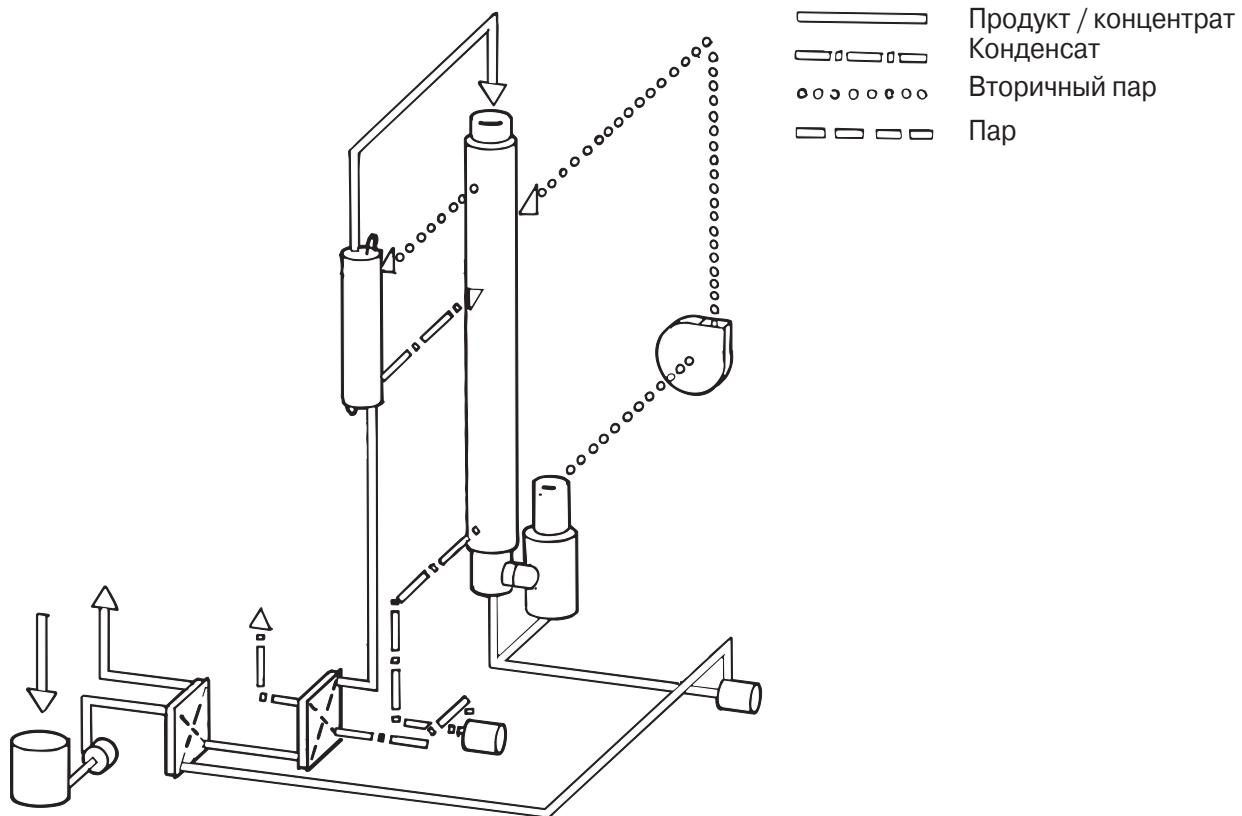


Рис. 11 Одноступенчатый выпарной аппарат с полным тепловым насосом.

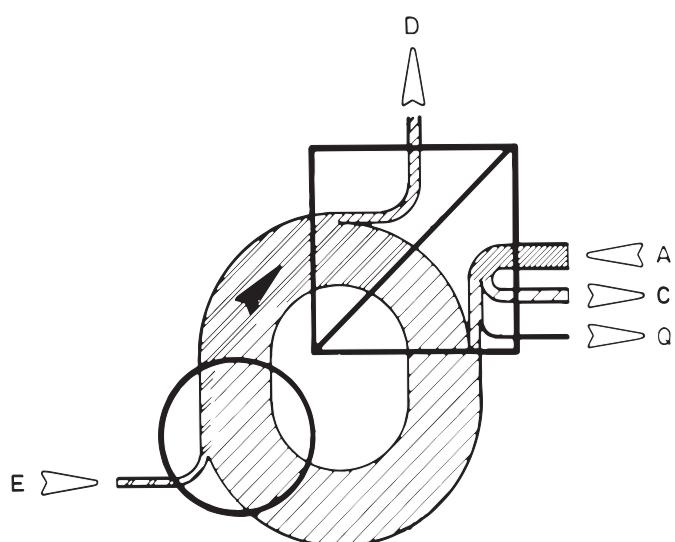


Рис. 12 Схема теплового потока в выпарном аппарате с полным тепловым

## Механическая компрессия пара

Механический компрессор с механическим сжатием вторичного пара в последние пятнадцать лет широко применяется в молочной промышленности в качестве альтернативы термокомпрессору. Компрессоры обычно работают от электрических двигателей, но могут применяться и дизельные. Если для других процессов требуется пар низкого давления, приводом компрессора может служить паровая турбина, которая действует как редукционный клапан. Выбор определяется местной ценовой политикой в отношении энергии. Согласно эмпирическому правилу, Механический компрессор рентабелен, если цена/кВт  $\leq$  цена/кг пара  $\times$  3. Однако выбор типа компрессора в наши дни определяется качеством готового продукта – сухого молока, а выпарные аппараты с механическим компрессором отличаются очень коротким временем обработки, что обеспечивает низкую вязкость сгущенного продукта.

Механический компрессор использует быстроходный ( $\approx 3000$  об/мин) вентилятор высокого давления, способный работать под вакуумом. При низкой температуре кипения объем вторичного пара очень велик (см. стр. 2). Это определяет нижнюю границу практически применимых температур. Поскольку потребляемая компрессором мощность наиболее эффективно используется при низком отношении давлений, увеличение температуры давления в компрессоре ограничено. Следовательно, требуется большая поверхность теплообмена, что ведет к увеличению капитальной стоимости оборудования.

И поскольку для работы механического компрессора важно, чтобы общая разность температур между вторичным паром и сжатой компрессором греющей средой была низкой, необходимо свести к минимуму температурную депрессию продукта, так как она еще больше снижает доступную для выпаривания разность температур. Это тоже ограничивает максимальную концентрацию, достижимую в выпарных аппаратах этого типа.

На рисунке 11 показан однокорпусной выпарной аппарат с механическим компрессором, а на рисунке 12 – соответствующая схема тепловых потоков.

Поступающее холодное молоко, прежде всего, подогревается сгущенным продуктом, затем конденсатом из секции нагрева нагревательной камеры и, наконец, острым паром при пастеризации. Вторичный пар сжимается в компрессоре и используется в качестве греющей среды, отдавая скрытую теплоту конденсации.

Вакуумный насос и небольшое количество холодной воды обеспечивают требуемое разрежение в системе.

Как видно, установка не теряет энергии с теплым конденсатом, и только малую часть с охлаждающей водой (в зависимости от требуемой температуры пастеризации). В этой связи выпарные аппараты с полным тепловым насосом часто применяют для подготовки молочных продуктов к транспортировке. В таких случаях уровень сухого вещества поднимают до 30-35 %, т.е. температурная депрессия невелика. Такой тип установок, из которых сгущенный продукт выходит при низкой температуре, составляет сильную конкуренцию установкам гиперфильтрации.

Рабочий цикл компрессорной машины показан на рис. 13. Пар всасывается из сепаратора, точка А, при уровне температуры и давления  $t_a$  и  $P_a$  и сжимается до точки В' ( $t'_r$  и  $P_r$ ). Переходящий сжатый пар охлаждается впрыскиваемой водой на выходе компрессора до точки В ( $t_r$ ). Сжатый пар конденсируется (участок точка В – точка С) на теплообменной поверхности нагревательной камеры и отводится в виде конденсата. Одновременно из молока испаряется вода, пар отделяется в сепараторе и всасывается в компрессор – точка А.

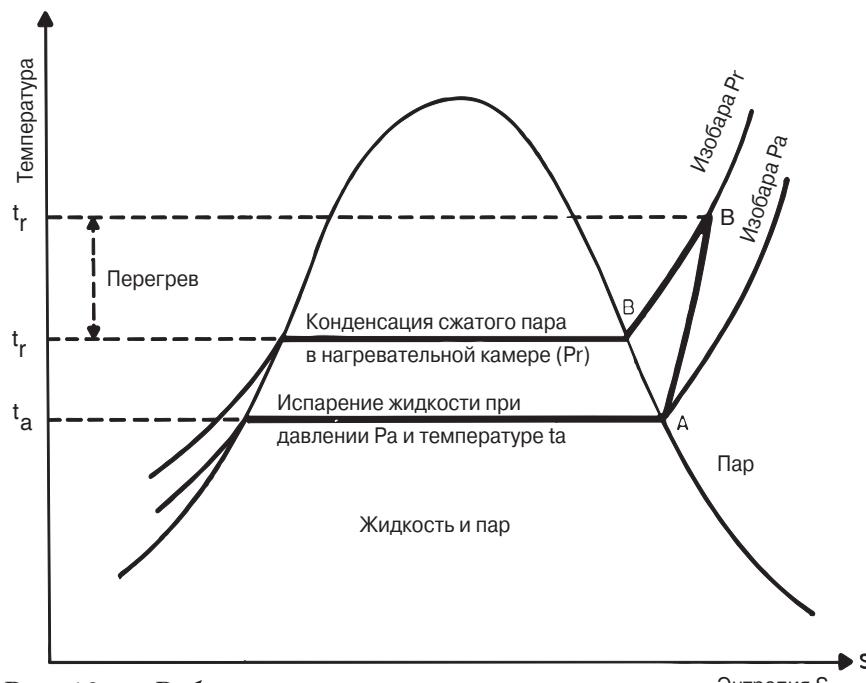


Рис. 13 Рабочий цикл компрессорной машины.

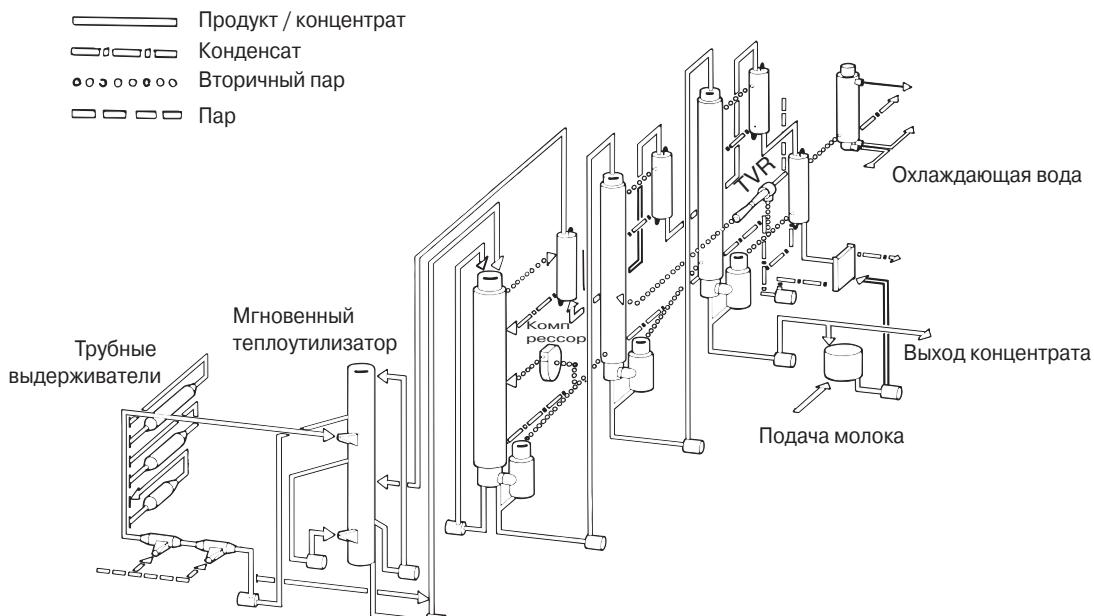


Рис. 14 Выпарной аппарат с частичным и полным тепловым насосом.

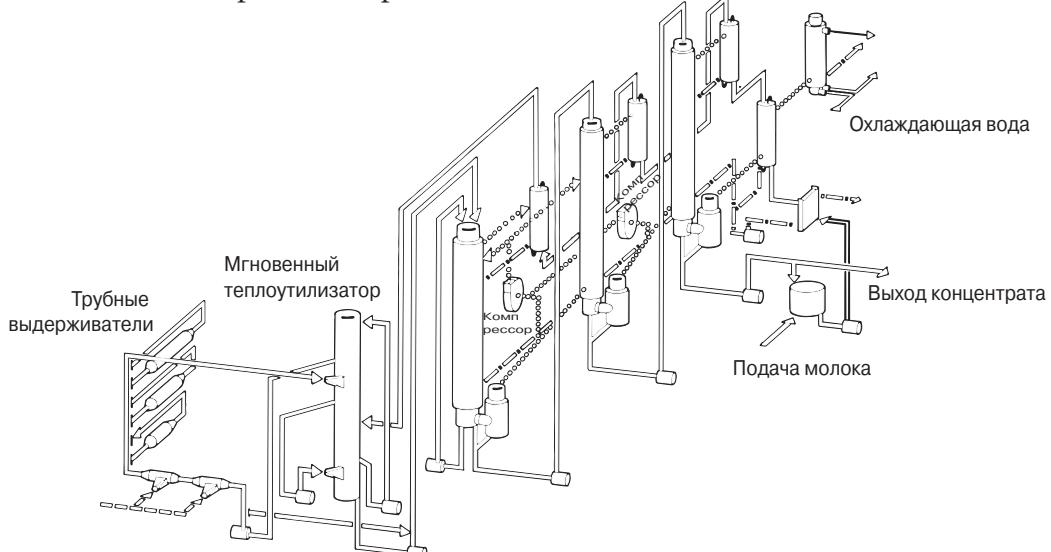


Рис. 15 Выпарной аппарат с двумя полными тепловыми насосами.

Регулировка производительности и останов выпарного аппарата с механическим компрессором не представляют проблемы – для этого достаточно изменить частоту вращения вентилятора.

Если содержание сухого вещества требуется поднять до уровня, необходимого для распылительной сушки, то в выпарном аппарате обычно используют и тепловое, и механическое сжатие пара, см. рис. 14. Расход пара на кг испаренной воды здесь, конечно, меньше, чем в многокорпусной установке, но расход электроэнергии, если компрессор работает от электродвигателя, – больше. Такая комбинированная установка требует очень небольшого количества холодной воды и расходует минимум энергии, но ее капитальная стоимость выше. При определенном соотношении цен на энергоносители выгодно использовать дополнительный механический компрессор взамен струйного для сжатия пара в последнем корпусе, см. рис. 15. Поэтому проектирование каждой установки требует тщательного учета местных условий, таких как цены на пар, электричество и холодную воду.



6 вентиляторов высокого давления для двух  
выпарных аппаратов с полным тепловым насосом

## Сравнение расхода энергии в разных выпарных аппаратах

ВЫПАРНОЙ АППАРАТ	5-корпусной с термокомпрессией	7-корпусной с термокомпрессией	1-корпусной с механической компрессией/ 2-корпусной с термокомпрессией
ПРОДУКТ	Обезжиренное молоко	Обезжиренное молоко	Обезжиренное молоко
Производительность по продукту, кг/ч	15 000	15 000	15 000
Сухое вещество, вход/выход, %	9/50	9/50	9/50
Производительность по испаренной влаге, кг/ч	12 300	12 300	12 300
Температура пастеризации, °C	90	90	90
Время выдержки, с	30	30	30
Расход пара, кг/ч	1 610	1 190	375
Давление пара, бар	10	10	10
Расход конденсата, кг/ч	13 400	13 400	12 800
Температура конденсации, °C	54	51	22
Потребляемая мощность			
- Компрессор, кВт	-	-	150
- Двигатели, кВт	75	75	50
Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч	32	3,5	2*)
Температура охлаждающей воды, вход/выход, °C	28/35	28/35	12/50
Потребление мощности в градирне, кВт	10	2,5	-
Время обработки, мин.	12	18	6

\*) используется, только если температура исходного молока выше 5 °C.



Нагревательные камеры выпарного аппарата с внешними подогревателями

## Конструкция промышленных выпарных аппаратов

Повышенный спрос на большие многокорпусные аппараты, в которых хорошая удельная производительность достигается только при увеличении греющей поверхности, можно было бы удовлетворить, используя аппараты с большим числом труб. Однако это значит, что на каждую трубу приходилось бы меньше жидкости, и пленка стала бы слишком тонкой. При высоком содержании сухого вещества возрастает вязкость, пленка теряет текучесть и возникает опасность пригорания отложений. В результате в стущенном продукте образуются студенистые комочки, часто обесцвеченные, которые в сухом молоке превратятся в нерастворимые в воде пригорелые частицы. В особо тяжелых случаях трубы полностью засоряются и требуют ручной чистки.

Поэтому конструктор должен учитывать так называемый коэффициент покрытия

$$\frac{\text{Производительность при входе в трубы, кг/ч}}{\text{Длина окружности трубок}} \quad (10)$$

Так что существует тенденция к производству выпарных установок с более длинными трубами, что увеличивает греющую поверхность без изменения коэффициента покрытия. Около тридцати лет назад выпускались аппараты с трубами 3-4 м длины, работавшие при разности температур около 15 °C, выпарные аппараты десятилетней давности имели трубы длиной до 14 м, а разность температур опустилась до 2 °C. У современных выпарных аппаратов длина труб достигает 18 м. Преимущество состоит в уменьшении числа проходов продукта, обеспечивающих необходимый коэффициент покрытия, количества насосов и времени обработки.

От современных выпарных аппаратов требуется также функциональная гибкость, т.е. возможность работы с разными продуктами и, значит, с разной производительностью. Проблема в том, что содержание сухого вещества в концентрируемых продуктах меняется, т.е. распылительная сушилка обрабатывает разные продукты с разной производительностью. Кроме того, производительность выпарного аппарата по испаренной влаге меняется из-за того, что продукты отличаются по значению коэффициента K.

Поэтому при проектировании установки для выпаривания и распылительной сушилки всегда выбирается основной продукт, и нагревательная камера выпарного аппарата проектируется так, чтобы обеспечить оптимальный коэффициент покрытия для него, а по возможности и для других продуктов.

Поскольку у цельного молока коэффициент K приблизительно на 20 % ниже, чем у обезжиренного, производительность по выпаренной воде для цельного молока будет примерно на 20 % ниже. А в связи с разницей в содержании сухого вещества в цельном и обезжиренном молоке расход сырья при выпаривании цельного молока должен быть ниже. Это требует особо тщательного проектирования нагревательных камер, так как из-за сниженного расхода сырья коэффициент покрытия оказывается недостаточным, особенно в первом корпусе. Если же выпарной аппарат рассчитан на цельное молоко в качестве основного продукта, то при выпаривании обезжиренного молока создается проблема покрытия в последнем корпусе, так как из-за низкого содержания сухого вещества в сырье слишком мал выход концентрата, содержащего 48 % с.в. Эта проблема покрытия была несколько лет назад преодолена возвратом части продукта с выхода нагревательной камеры на ее вход. Это позволило увеличить количество жидкости, так чтобы все трубы были покрыты. См. рис. 16.

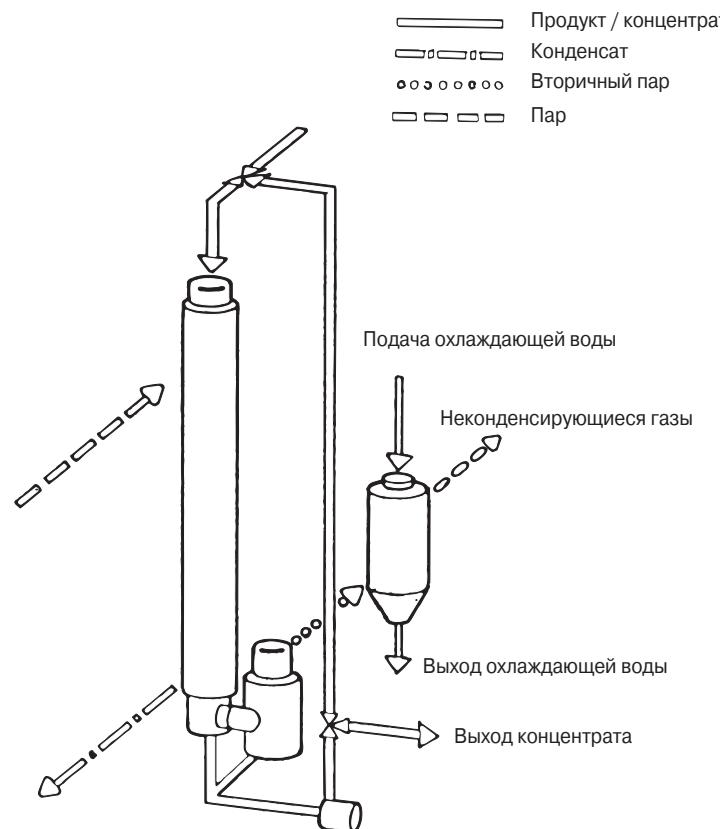


Рис. 16 Рециркуляционный выпарной аппарат с падающей пленкой.

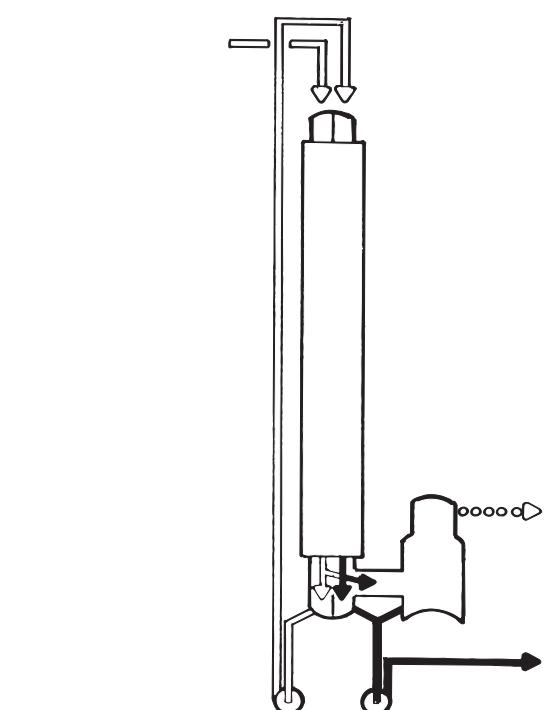


Рис. 17 Разделенная на две секции нагревательная камера.

С технической точки зрения это идеальное решение – простое и дешевое, но оно неприемлемо с точки зрения качества продукта, так как часть продукта неопределенно долго подвергается действию высокой температуры. Это означает повышенную вязкость упакованного продукта и, возможно, денатурацию белка, и то, и другое приводит к снижению растворимости сухого молока.

В современных “однопроходных” выпарных аппаратах с падающей пленкой эта проблема решается использованием в корпусах с низким коэффициентом покрытия двух или большего числа нагревательных камер, имеющих одинаковую температуру кипения и, часто, общий сепаратор.

Другой способ состоит в разделении нагревательной камеры на две или большее число секций в “многопоточном” выпарном аппарате. Продукт закачивается в одну из секций, с ее выхода – на вход следующей и т.д. После выхода из последней секции продукт перекачивается в следующий корпус, см. рис. 17. Это почти такая же дешевая система, как с рециркуляцией, но разделение нагревательной камеры устраняет необходимость в циркуляции продукта.

## **Вспомогательное оборудование выпарных аппаратов**

Для того чтобы выпарной аппарат мог полноценно работать, необходимо следующее дополнительное оборудование:

- сепараторы
- система распределения продукта
- подогреватели
- оборудование для пастеризации и выдержки
- оборудование для устраниния термофильных бактерий
- оборудование для конденсации и вакуумирования
- градирни
- концентраторы
- пневматические охладители
- оборудование для водяного уплотнения
- КИПиА

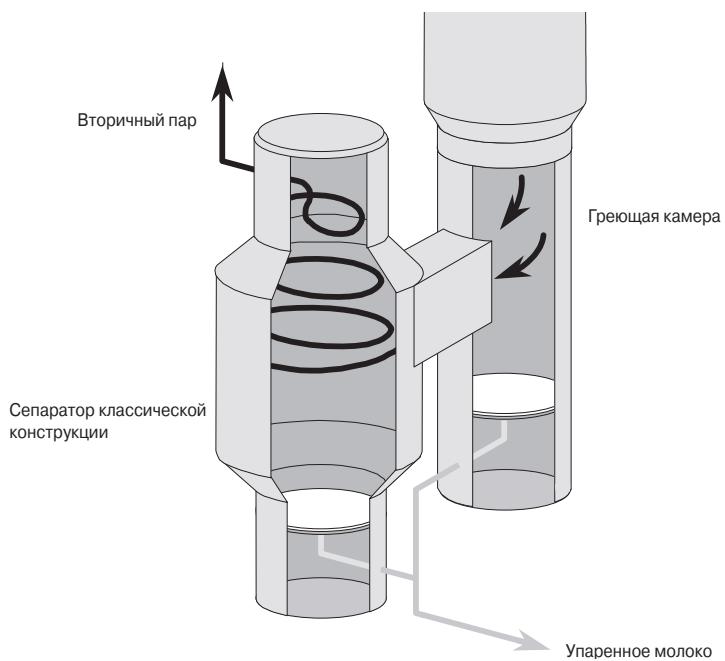


Рис. 17а Сепаратор с тангенциальным входом.

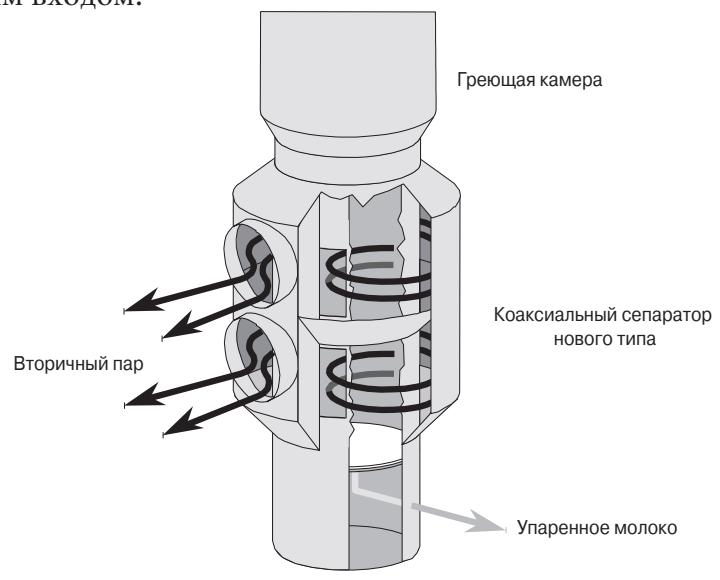


Рис. 17б Коаксиальный сепаратор.

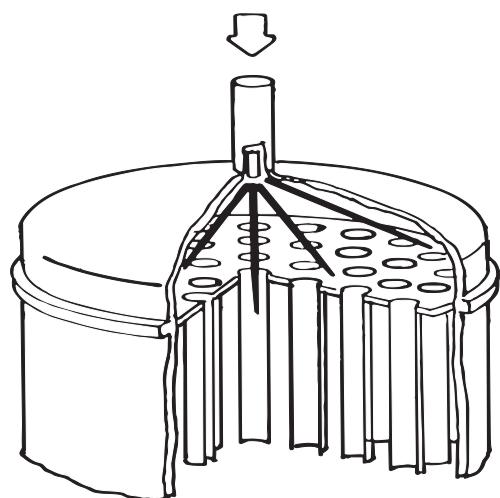


Рис. 18 Динамическая система распределения продукта.

## Сепараторы

### *Сепараторы с тангенциальной подачей пара*

Поскольку вторичный пар используется в качестве греющей среды в следующей нагревательной камере, от него необходимо отделить продукт, чтобы избежать загрязнения конденсата и связанных с этим потерь.

Большая часть сгущенного продукта выгружается через выход в нижней части нагревательной камеры, расположенной под трубным пучком. Быстрый поток вторичного пара уносит часть сгущенного продукта в виде мелких капель. Их отделение происходит в сепараторе с тангенциальной подачей пара, рис. 17а, присоединенном к нагревательной камере.

Сепаратор требуется сконструировать так, чтобы исключить унос продукта, создавая как можно меньший перепад давления, поскольку падение давления равнозначно падению энтальпии греющей среды в следующей нагревательной камере и, соответственно, уменьшению общей эффективности установки.

### *Коаксиальный сепаратор*

Для уменьшения занимаемого установкой пространства был разработан новый тип сепаратора – коаксиальный, см. рис. 17б. Он встроен в основание нагревательной камеры. Он обладает такой же эффективностью, как и сепаратор классической конструкции с малым перепадом давления. Обычно применяется с большими нагревательными камерами с механическим компрессором, которые соединяются с сепаратором очень коротким паропроводом для минимизации падения давления.

Экономия занимаемого пространства обычно составляет около 30 %.

## Система распределения продукта

Как уже отмечалось, для хорошего коэффициента покрытия очень важно обеспечить равномерное распределение продукта по трубам нагревательной камеры. Поэтому при проектировании выпарного аппарата системе распределения придается особое значение.

В принципе существует две системы:

- динамическая система распределения
- статическая система распределения

### *Динамическая система распределения*

В динамической системе распределения, см. рис. 18, кинетическая энергия, необходимая для распределения, обеспечивается падением давления продукта в форсунке. Поскольку продукт перегрет относительно давления внутри труб, происходит его мгновенное частичное испарение. Смесь продукта и вторичного пара распыляется над входными отверстиями труб.

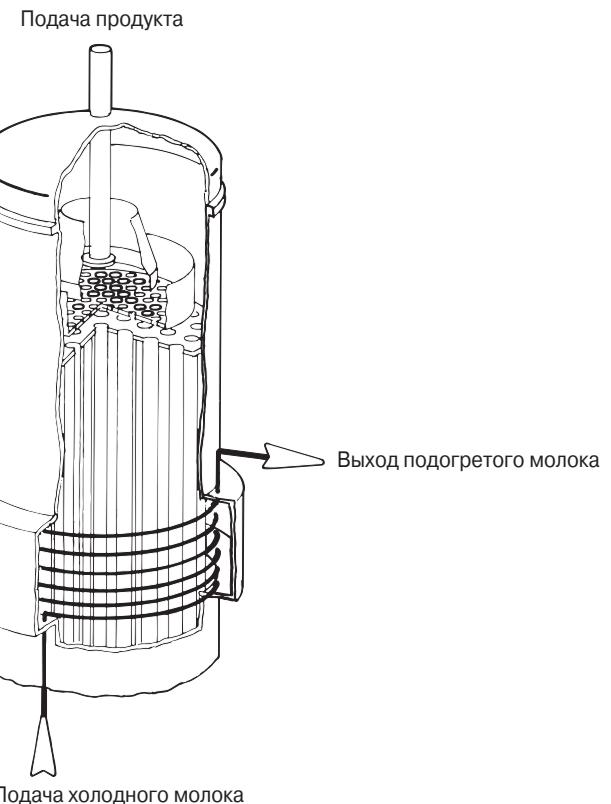
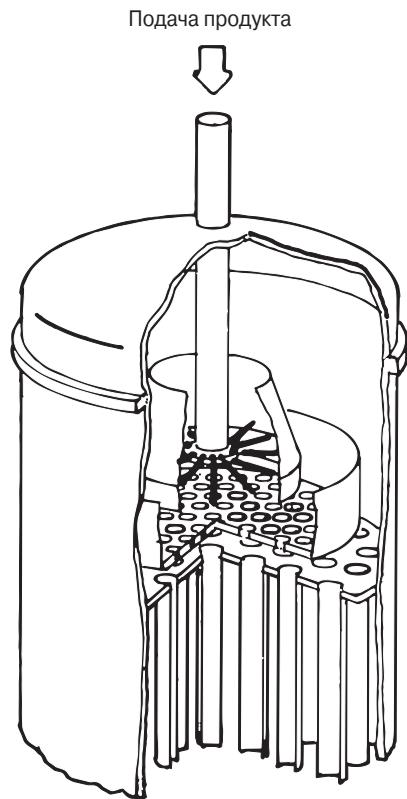


Рис. 19 Статическая система распределения продукта.

Рис. 20 Спиральные подогреватели.



Верхняя часть нагревательной камеры выпарного аппарата (система распределения сырья)

Способность форсунки к оптимальному распылению зависит от падения давления, которое определяется количеством обрабатываемого продукта и степенью мгновенного испарения в над трубном пространстве. Поэтому такая распределительная система считается не подходящей для современных выпарных аппаратов, от которых требуется универсальность, следовательно, способность к изменению расхода исходного продукта. Кроме того, в многокорпусных установках мгновенное испарение и, следовательно, распределение, оказывается минимальным из-за низкого  $\Delta t$ .

### ***Статическая система распределения***

В статической системе распределения поступающий перегретый продукт предварительно разделяется на пар, образовавшийся при мгновенном испарении, и продукт. Продукт попадает на распределительную пластину, расположенную внутри открытого конуса на входе нагревательной камеры. Этот конус находится над распределительной пластиной с отверстиями. Здесь поддерживается определенный уровень продукта. Продукт стекает в отверстия пластины самотеком. Каждое отверстие находится не над трубами, а между ними. Таким образом, продукт стекает на трубную решетку и затем через край внутрь каждой трубы. Пар, образовавшийся при мгновенном испарении, также входит в трубы и прижимает продукт к внутренней поверхности труб, придавая ему начальную скорость. См. рис. 19.

Такая распределительная система является более гибкой в отношении расхода продукта, так как увеличение уровня продукта на распределительной пластине – в результате большего расхода – увеличивает скорость протекания продукта через отверстия и, таким образом, уровень поддерживается постоянным.

## **Подогреватели**

Поскольку подлежащее выпариванию молоко имеет температуру 5-10 °C, его нужно нагреть до температуры кипения в первом корпусе, чтобы сократить расход греющего пара. Поэтому молоко сначала проходит через охладитель/подогреватель, расположенный между сепаратором последнего корпуса и конденсатором, что позволяет заодно сэкономить холодную воду. Из охладителя молоко поступает в секцию подогрева последнего корпуса, а затем подается в секцию кипения первого корпуса.

По конструкции подогреватели делятся на два типа:

- спиральные подогреватели
- подогреватели с прямыми трубами

### ***Сpirальные подогреватели***

Сpirальные трубы расположены в горячей части нагревательной камеры вокруг труб с падающей пленкой, т.е. нагреваются вторичным паром, см. рис. 20. Это простая система, но она не позволяет осмотреть подогреватели и проверить, нет ли отложений или утечек.

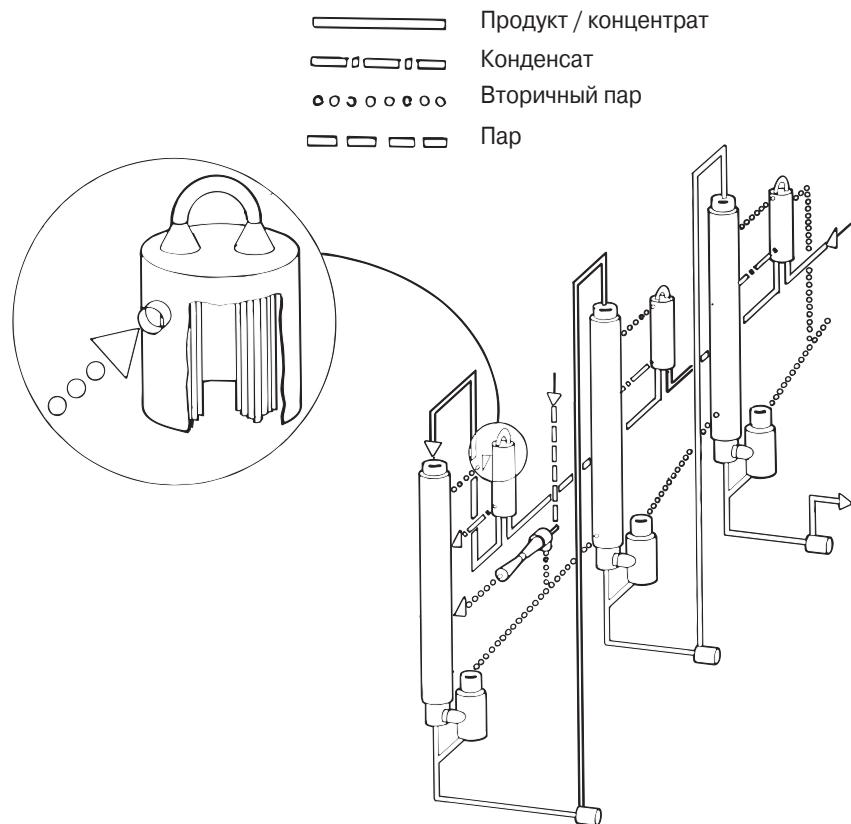


Рис. 21

Прямотрубные подогреватели.



Внешние подогреватели

### **Подогреватели с прямыми трубами**

Подогреватели с прямыми трубами располагаются вертикально вне выпарного аппарата и, подобно спиральным, нагреваются вторичным паром из соответствующей нагревательной камеры. См. рис. 21. Вторичный пар отбирается из верхней части нагревательной камеры, так что неконденсирующиеся газы легко отделяются. Это обеспечивает оптимальное использование греющей поверхности труб выпарного аппарата. Такая система позволяет произвести осмотр и ручную чистку в тех редких случаях, когда это оказывается необходимым. Теплообменная поверхность подогревателя выполнена в виде пучков труб малого диаметра, что обеспечивает большую площадь теплообмена. Каждый пучок труб подсоединяется стандартными для молочной промышленности фитингами. Благодаря параллельным потокам время выдержки в таком подогревателе намного меньше, чем в спиральном. Поэтому при использовании прямотрубных подогревателей вязкость готового сгущенного продукта оказывается ниже.

Однако большая поверхность подогревателей и преобладающий уровень рабочей температуры ( $40\text{--}65^{\circ}\text{C}$ ) создает оптимальные условия роста для термофильных условий. После 14-16 часов работы на внутренних поверхностях подогревателей появляется биопленка, где могут образовываться споры. Если не принять специальных мер, которые обсуждаются на странице 48 главы “Подогревающее оборудование для снижения роста термофильных бактерий”, невозможно ожидать 20-часовой работы установки без увеличения уровня термофильных бактерий и их спор в последние 4-5 часов 20-часового периода.

## **Оборудование для пастеризации и выдержки**

Температура продукта на выходе последнего подогревателя многокорпусного аппарата ниже, чем температура кипения в первом корпусе. Поэтому необходимо дополнительно подогреть продукт на  $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$  до температуры кипения в первом корпусе. Для этого применяется подогреватель, нагреваемый острым паром, обычно через термокомпрессор. Однако некоторые продукты могут потребовать более высокой температуры, но главная цель тепловой обработки в выпарном аппарате, помимо выполнения бактериологических требований, состоит не в “пастеризации”, а в обеспечении функциональных свойств готового сухого продукта. Эти цели:

- выполнение бактериологических требований
- получение сухого обезжиренного молока с ограниченной термической денатурацией
- поддержание качества цельного молока
- получение термоустойчивого сухого молока для высокотемпературной обработки
- получение быстрорастворимого цельного сухого молока

### **Выполнение бактериологических требований**

Пастеризация непосредственно перед выпариванием, естественно, сказывается на количестве бактерий в сухом продукте, и чем выше ее температура и больше время выдержки, тем эффективнее уничтожение бактерий.

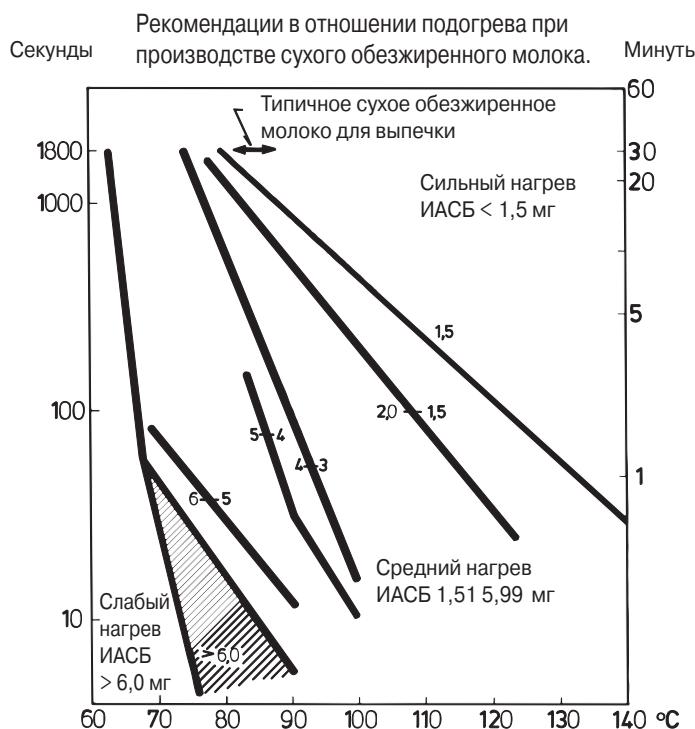


Рис. 22 Индекс азота сывороточного белка как функция интенсивности пастеризации, связь температуры и времени.

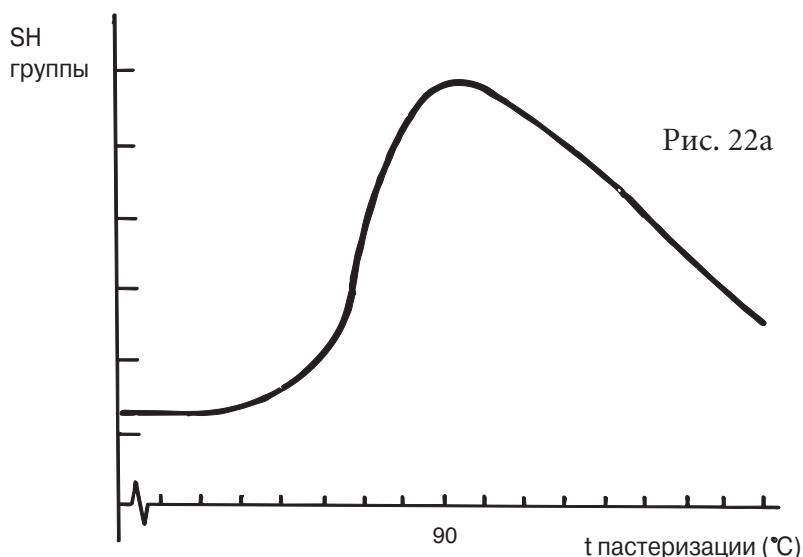


Рис. 22а % денатурации  $\beta$ -лактоглобулина

Рис. 23 Образование свободных SH-групп как функция температуры пастеризации.

### ***Сухое обезжиренное молоко с ограниченной термической денатурацией***

При выпуске сухого обезжиренного молока часто вводятся ограничения на степень денатурации сывороточных белков, и такое молоко классифицируется по индексу азота сывороточного белка (мг N/g порошка), который выражает содержание нативного белка. Влияние различных комбинаций температуры и времени обработки на указанный индекс представлен на рисунке 22, а на степень денатурации  $\beta$ -лактоглобулина молока – на рисунке 22а.

### ***Поддержание качества цельного молока***

Одной из проблем производства цельного сухого молока является обеспечение срока хранения, поскольку жир легко окисляется, если сухое молоко упаковано не в атмосфере инертного газа. Поскольку большое количество сухого молока транспортируется в мешках, его невозможно предохранить от действия воздуха, а применение антиоксидантов, как правило, не допускается.

Пастеризация молока (контактная) перед выпариванием осуществляется нагреванием до 90-95 °C в течение 0,5-1 минуты, при этом образуются естественные антиоксиданты, в частности, SH-группы, освобождающиеся из аминокислот (цистина, цистеина и метионина). При более высокой температуре пастеризации образуется больше SH-групп, но они вступают в реакцию с казеином и не сохраняются в несвязанном виде. См. рис. 23. В то же время, свободные SH-группы придают продукту вкус вареного молока, что, впрочем, нравится многим потребителям.

### ***Термоустойчивое сухое молоко для высокотемпературной обработки***

Этот тип сухого молока применяется в восстановленном виде для изготовления стущенного стерилизованного молока, особенно на Дальнем Востоке. После восстановления до 25-27 % СВ. продукт стерилизуется при температуре 120 °C или выше в течение 20 минут.

Термоустойчивость восстановленного молока зависит от температуры и длительности пастеризации перед выпариванием и сушкой. Контактный нагрев дает лучший результат.

<u>Пастеризация</u>	<u>Интервал температур, °C</u>
Косвенная, °C	от 60 до 80
Прямая, °C	от 80 до 110 *)
Прямая, °C	от 110 до 125
Выдержка, минуты	2-4

\*) Для получения продукта с низкой вязкостью и хорошей термоустойчивостью время выдержки при нагреве до температуры 80...110 °C должно быть минимальным, чтобы избежать взаимодействия белков сыворотки.

### ***Быстрорастворимое цельное сухое молоко***

Для производства быстрорастворимого цельного сухого молока, хорошо восстанавливается в холодной воде и при этом обладающего высокой “кофейной стабильностью”, т.е. не коагулирующего при добавлении в горячий кофе в качестве забеливателя, рекомендуется выбрать комбинацию температура-время, которая обеспечит индекс азота сывороточного белка > 3,5 мг/г, что соответствует приблизительно 45 % денатурации  $\beta$ -лактоглобулина, см. рис. 22а.

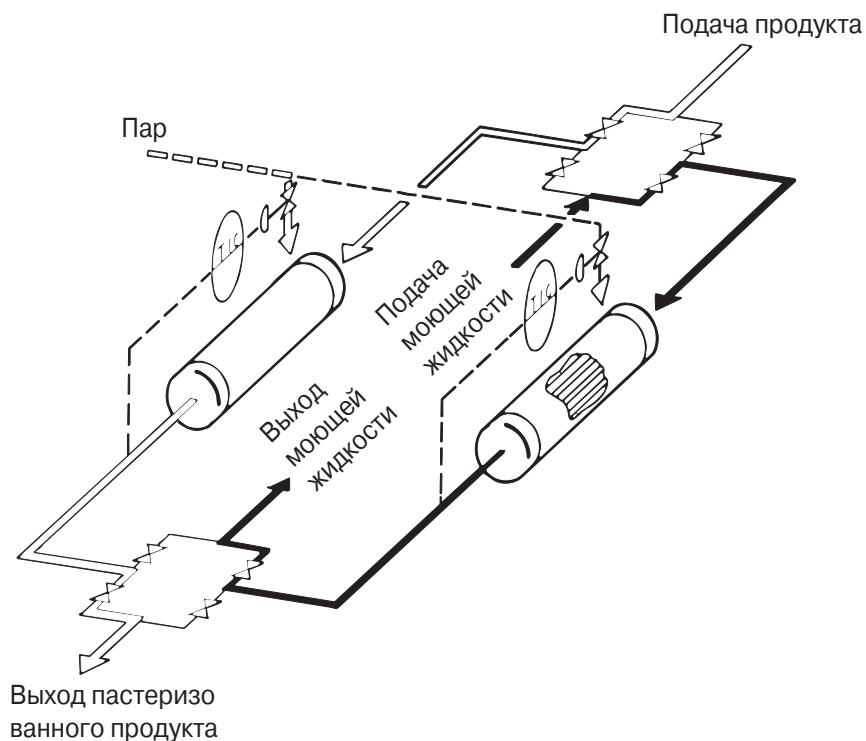


Рис. 24 Переключаемые теплообменники поверхностного типа.

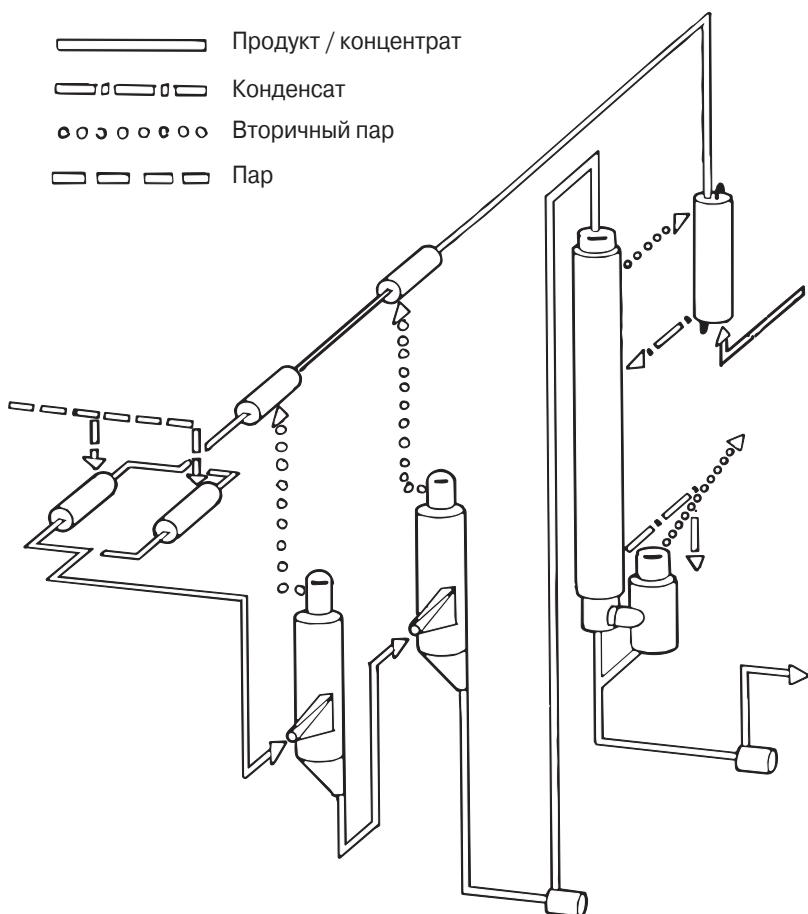


Рис. 25 Последовательные спиральные теплообменники, нагреваемые свежим паром и паром, образовавшимся при мгновенном испарении.

Пастеризацию можно осуществлять различными способами:

- в теплообменниках поверхностного типа – пластинчатых, спиральных или с прямыми трубами,
- в теплообменниках контактного типа – впрыском пара в молоко или молока в пар.

#### Пастеризация в поверхностных теплообменниках

Для этой цели применяются обычные поверхностные теплообменники. Если температура пастеризации должна достигать 110 °C, рекомендуется использовать два пастеризатора – пока один эксплуатируется, другой очищается, см. рис. 24.

Преимущество нагрева через разделяющую поверхность состоят в том, что продукт не смешивается с конденсирующимся паром и не разбавляется. Недостаток – необходимость более длительного нагрева при температуре от 80 до 100 °C, что приводит к увеличению вязкости сгущенного продукта, так как сывороточные белки, разворачиваясь, реагируют друг с другом (денатурируют) прежде чем образуется Каппа-казеин. Для большей эффективности может применяться одна или несколько систем утилизации тепла, см. рис. 25.

#### Пастеризация в контактных теплообменниках

Пастеризация контактным нагревом может производиться двумя способами. Один из них – впрыск острого пара в молоко в вихревом нагревателе с тангенциальной подачей пара. Этот способ обеспечивает короткое и регулируемое время обработки и отсутствие механического удара даже при температуре выше 120 °C. Пастеризатор способен работать 20 и более часов без перерыва на чистку. Другой способ – распыление молока в атмосфере пара (инфузия) при достаточном давлении. Он требует пара высокого качества, т.е. пригодного для производства продуктов питания. Его можно генерировать в кулинарных паровых котлах, в которых конденсат пара молока нагревается в змеевиковом поверхностном теплообменнике за счет свежего пара. Преимущество пастеризации в контактном теплообменнике – короткое время нагрева. Это значит, что в молоке сохраняются и неразвернувшиеся сывороточные белки, и каппа-казеин, которые могут реагировать друг с другом, что обеспечивает низкую вязкость.

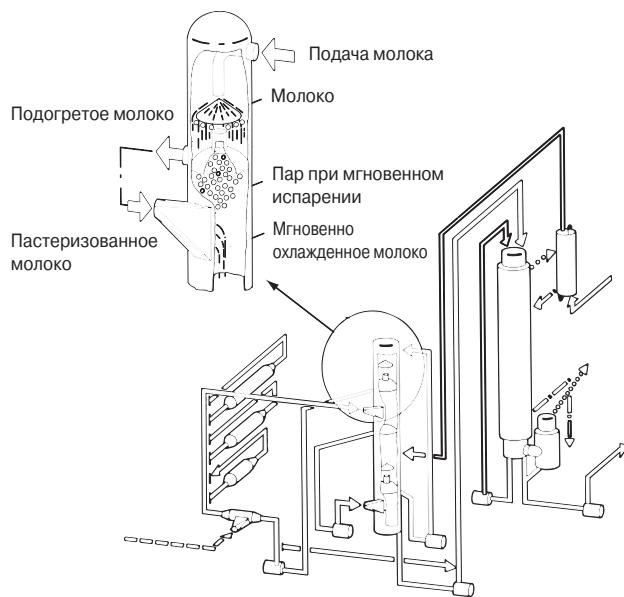


Рис. 26 Система контактной пастеризации с контактным регенеративным подогревателем мгновенного испарения.

Вихревой нагреватель с тангенциальной подачей пара

Спорообразующие бактерии	Температура развития, °C			Обычный режим тепловой инактивации в молоке	
	Минимум	Оптимум	Максимум	Вегетативные клетки	Споры
B. Stearothermophilus	30-45	55-60	60-70	12 с, 85 °C	8-15 мин, 121 °C
B. Cereus	5-20	30-37	45-48	10 с, 72 °C	0,5 мин, 121 °C
B. Coagulans	15-25	35-50	55-60	20 с, 72 °C	3-5 мин, 121 °C
B. Licheniformis	15	30-45	50-55	20 с, 72 °C	3-5 мин, 121 °C
B. Subtilis	6-20	30-40	45-55	20 с, 72 °C	3-5 мин, 121 °C
C. Botulinum	3	25-40	48	20 с, 72 °C	3-4 мин, 121 °C
C. Perfringens	8-20	45	50	20 с, 72 °C	1-4 мин, 121 °C
C. Tyrobutiricum				20 с, 72 °C	1-4 мин, 121 °C

Рис. 26а Оптимальные условия роста бактерий.

Кроме того, контактный нагрев в меньшей степени денатурирует сывороточные белки при тех же значениях температуры и времени пастеризации.

	<u>Денатурация сывороточных белков</u>	<u>Потеря тиамина</u>
Контактный нагрев	35%	0.5 - 0.8%
Поверхностный нагрев	65%	1.4 - 4.4%

Если пастеризация проводится при высокой температуре, то, как и в случае поверхностных теплообменников, используется система регенерации тепла. Из-за испарения температура молока снижается, и вторичный пар используется для подогрева молока перед пастеризатором. Камера регенерации тепла мгновенного испарения может быть либо поверхностным теплообменником, см. рис. 25, либо контактным – см. рис. 26. Контактный регенератор тепла предпочтительнее, так как в нем нет теплообменной поверхности, на которой могут появляться отложения (биопленка).

Выдержка практически всегда производится в трубчатых выдерживателях определенной длины и диаметра, что обеспечивает фиксированное время выдержки. Емкости для выдержки применяются в тех случаях, когда время выдержки достигает 30 минут, главным образом, при пастеризации сыворотки и пермеата. Однако в таких емкостях трудно контролировать время выдержки: часть продукта может пройти выдерживатель за пять минут, а часть – оставаться в нем очень долго.

Температура пастеризации, конечно, непосредственно влияет на общий расход пара, который растет с увеличением температуры. При одинаковой температуре пастеризации расход пара выше в случае применения контактных пастеризаторов из-за необходимости выпаривания дополнительной воды, образующейся при конденсации. Однако дополнительный пар используется – после камеры мгновенного испарения – в качестве греющей среды для следующей нагревательной камеры, так что часть затраченной энергии утилизируется.

## **Подогревающее оборудование для снижения роста термофильных бактерий**

В последние годы большое внимание уделяется снижению содержания спор термофильных бактерий в сухом молоке. Было показано, что число этих бактерий начинает увеличиваться только после 12-16 часов работы установки и растет экспоненциально.

Спорообразующие бактерии, это бактерии, которые в неблагоприятных условиях, например, при слишком низкой или слишком высокой температуре или при недостатке питательных веществ, переходят в неактивное состояние – образуют споры – и становятся чрезвычайно термоустойчивыми. Когда условия вновь становятся благоприятными, они переходят в вегетативную форму и возобновляют рост. Вегетативные клетки могут быть уничтожены тепловой обработкой. Термофильные бактерии, как правило, растут при температуре от 45 до 70 °C, см. рис. 26а.

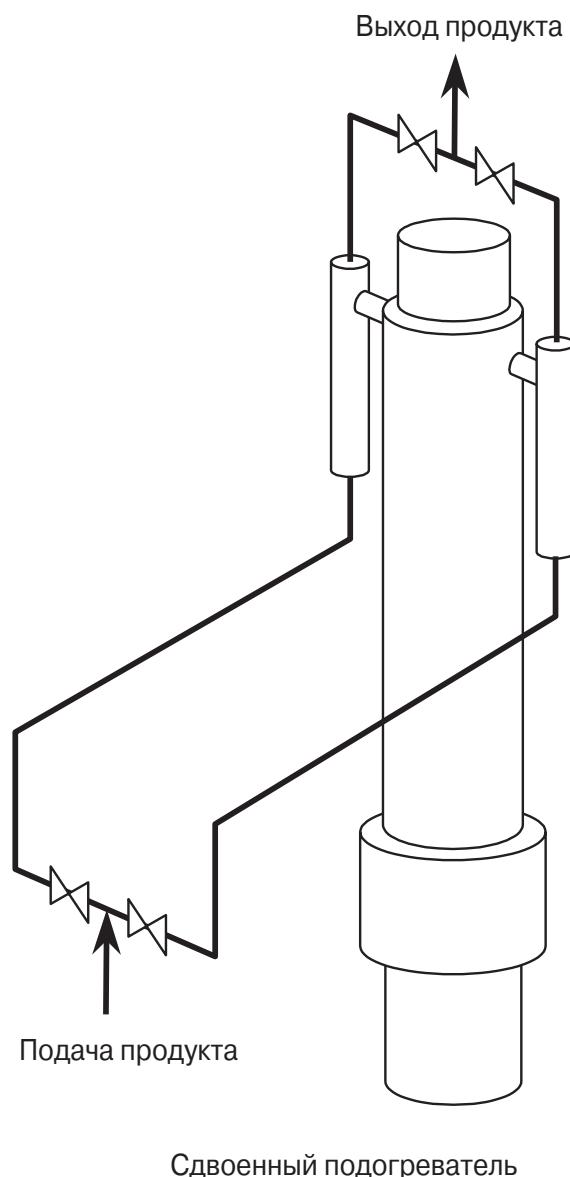


Рис. 266 Сдвоенный подогреватель.

Оказалось, что в выпарных аппаратах термофильные бактерии развиваются в подогревателях, т.к. это единственное место, где образуется биопленка.

Для обеспечения непрерывного 20-часового производства сухого молока необходимы следующие меры:

- промежуточная чистка
- сверхвысокотемпературная обработка
- сдвоенная система подогрева
- контактный подогрев инжекцией пара
- регенерация тепла в контактном подогревателе

### ***Промежуточная чистка***

Если чистка выпарного аппарата производится после 10 часов работы, это решает проблему, но приводит к потере приблизительно 10 % времени работы установки и дополнительным расходам на чистящие средства и удаление отходов.

### ***Сверхвысокотемпературная обработка***

Поддержание температуры 140 °C в течение 2-3 секунд после подогрева молока решает проблему, однако в продукте все равно обнаруживаются мертвые клетки, и сухому молоку нельзя придать заданные функциональные свойства.

Кроме того, увеличивается расход пара, максимальное время работы установки зависит от качества молока.

### ***Сдвоенная система подогрева***

Использование сдвоенных подогревателей, см. рис. 266, позволяет непрерывно эксплуатировать установку в течение 20 часов, так как подогреватели очищаются, прежде чем содержание бактерий достигнет опасного уровня. Это связано с дополнительными расходами на чистку и обработку стоков. Кроме того, увеличиваются капитальные затраты, но прямые издержки на производство продукции и время работы не изменяются.

### ***Контактный подогрев инжекцией пара***

Как уже упоминалось, термофильные бактерии развиваются только в подогревателях в виде биопленки. Следовательно, самое очевидное решение – обойтись без подогревателей, где температура составляет от 45 до 70 °C. Однако это увеличит общий расход пара, так как для нагрева молока от 45 °C до температуры пастеризации потребуется прямая инжекция пара, и молоко будет разбавляться паром, который придется выпаривать. Если стоит также проблема мезофильных бактерий и их спор, то потребуется подогрев от ≈6 °C.

### ***Регенерация тепла в контактном подогревателе***

Использование контактного регенеративного подогревателя, аналогичного по конструкции контактной регенеративной камере мгновенного испарения (см. стр. 46), где можно за долю секунды достичь 45-70 °C без теплообменной поверхности, на которой могла бы образоваться биопленка.

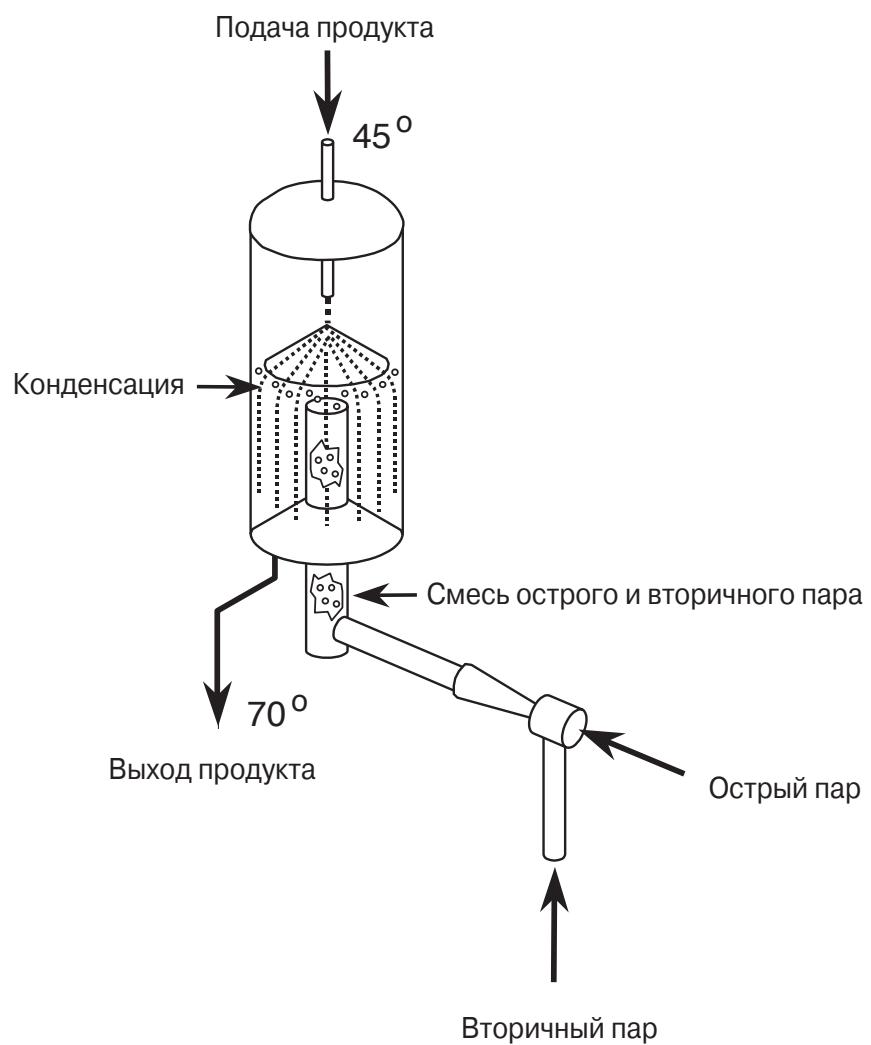


Рис. 26с Контактная подогревающая камера мгновенного испарения.

Молоко – после подогрева до 45 °C в конденсаторе последнего корпуса в случае установок с термокомпрессором или в пластинчатом теплообменнике в случае установок с механическим компрессором – подается на вход контактного подогревателя, куда острым паром с помощью небольшого струйного компрессора нагнетается вторичный пар. За подогревом до температуры пастеризации следует мгновенное охлаждение, выполняемое вышеописанным способом, см. рис. 26в. Если мезофильные бактерии и их споры составляют проблему, то подогреватель последнего корпуса не применяется, и регенеративный подогрев производится от температуры около 6 °C на оборудовании, аналогичном вышеописанному.

Применение такой технологии позволяет эксплуатировать установку 20 часов без роста мезофильных и термофильных бактерий и их спор при меньшем расходе пара, чем в случае сверхвысокотемпературной обработки или прямой инжекции пара.

## Оборудование для конденсации

Все применяемые в молочной промышленности выпарные аппараты работают под вакуумом, поэтому должны иметь оборудование для откачки воздуха и конденсации, чтобы конденсировать вторичный пар, который больше нельзя утилизировать, и поддерживать вакуум в установке.

Количество теплоты, которую приходится сбрасывать в конденсаторе, зависит от количества и температуры пара из последнего корпуса.

В целях экономии холодной воды и энергии, молоко, которое предстоит выпаривать и которое имеет температуру 5-10 °C, используется для предварительного охлаждения пара и, одновременно, подогрева молока. Однако, окончательная конденсация осуществляется холодной водой. Поскольку в выпариваемом молоке всегда присутствует воздух и неконденсирующиеся газы и из-за возможных неплотностей в установке, для поддержания вакуума требуется оборудование для откачки воздуха и газов. То же оборудование служит для создания вакуума при пуске установки.

Для конденсации пара (и, следовательно, поддержания вакуума), используется два типа аппаратов:

- конденсатор смешения
- поверхностный конденсатор

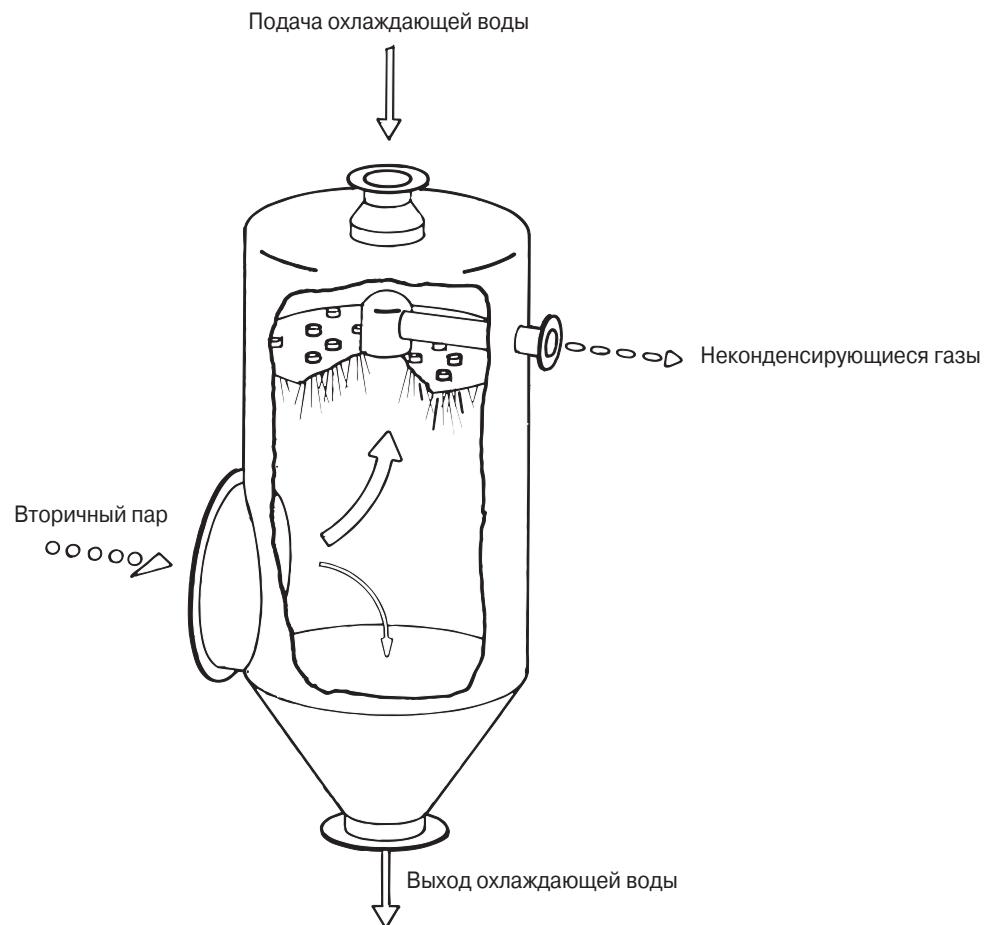


Рис. 27 Смешивающий конденсатор.

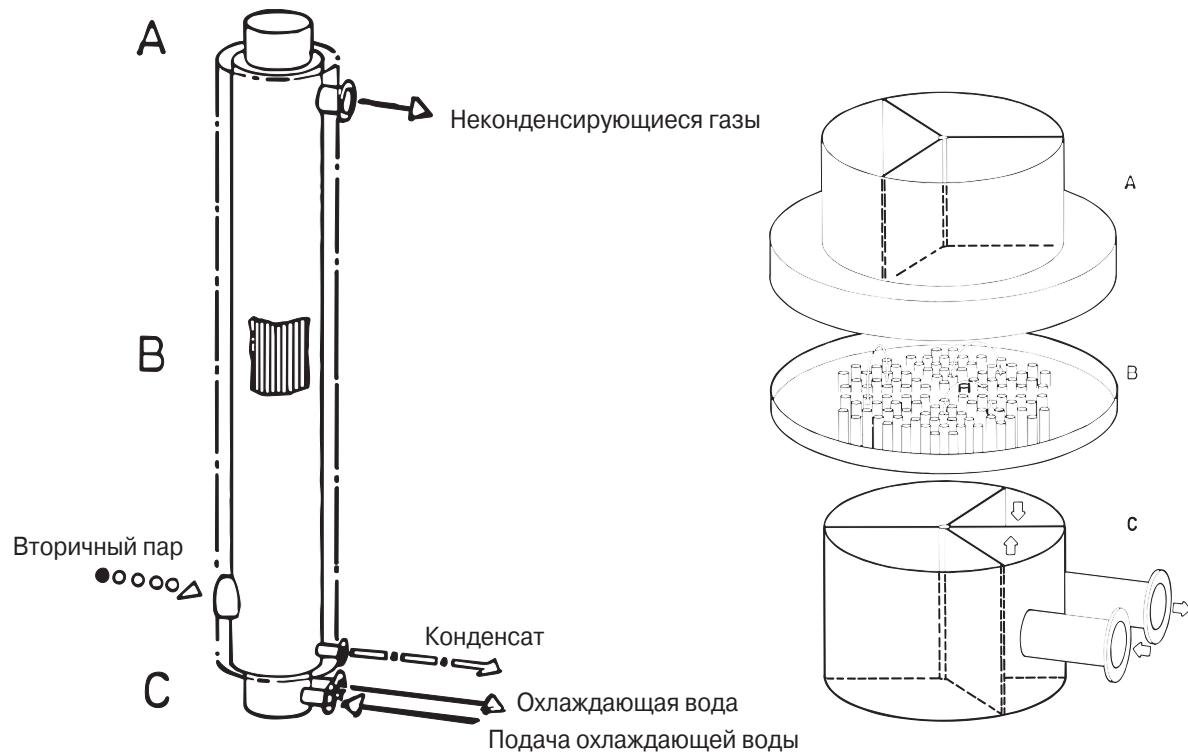


Рис. 28 Поверхностный конденсатор.

### **Конденсатор смешения**

В конденсаторах смешения расположены многочисленные форсунки и пластины, обеспечивающие хорошее перемешивание пара и охлаждающей воды, см рис. 27 (практически тот же принцип, что и в скруббере, см. ниже). Вода и конденсат отводятся из нижней части аппарата. Поскольку давление в таком конденсаторе и в последнем корпусе одинаково, насос для откачки воды и конденсата должен быть способен работать при разрежении на входе.

Другое решение состоит в размещении конденсатора смешения на барометрической высоте, т.е. приблизительно в 11 метрах над насосом. Вода стекает в приемник, из которого откачивается либо в градирню, либо в естественный водоем.

Преимущество конденсатора смешения состоит в низкой капитальной стоимости и сравнительно меньшем расходе охлаждающей воды. Недостаток – в смешивании конденсата с охлаждающей водой, что может вызвать загрязнение градирни.

### **Поверхностный конденсатор**

По конструкции и принципу действия поверхностный конденсатор – это обычный трубчатый теплообменник, см. рис. 28. Его преимущество заключается в том, что охлаждающая вода и конденсат вторичного пара не смешиваются. Поскольку откачивать под вакуумом требуется только конденсат, такой аппарат не устанавливают на барометрической высоте, как в случае конденсатора смешения. Поверхностные конденсаторы обязательно применяются на установках, где выпариваются кислые продукты, такие как кислотная сыворотка, чтобы не смешивать кислый конденсат с охлаждающей водой.

## **Вакуумное оборудование**

Как уже обсуждалось, вакуум в последнем корпусе выпарного аппарата определяется количеством и температурой охлаждающей воды. Вакуум в первом и промежуточных корпусах создается следующими нагревательными камерами, которые являются конденсаторами для вторичного пара из предыдущего корпуса. Поэтому любое изменение производительности по испаренной влаге в одном из корпусов, вызванное, например, загрязнением поверхности (снижением коэффициента K), уменьшит конденсацию вторичного пара. Это приведет к увеличению температуры кипения в предыдущем корпусе, снижению  $\Delta t$  и общей производительности по испаренной влаге. Каждый корпус подключен к конденсатору, чтобы обеспечить удаление воздуха и неконденсирующихся газов.

Для создания вакуума в выпарном аппарате и его поддержания (необходимого из-за неконденсирующихся газов и неплотностей) применяются два типа вакуумных насосов:

- вакуумный насос
- пароструйный вакуумный насос



Рис. 29 Градирня.

### ***Вакуумный насос***

Используются различные вакуумные насосы, например, жидкостные кольцевые. Обычно устанавливают два насоса, при быстром пуске выпарного аппарата используются оба, а в процессе работы – только один. Насосы изготавливаются только из нержавеющей стали, так как бронзовые, хотя и дешевле, быстро выходят из строя из-за коррозии, особенно если выпаривается сыворотка.

### ***Пароструйный вакуумный насос***

Пароструйный вакуумный насос имеет ту же принципиальную конструкцию, что и обслуживавшийся выше пароструйный компрессор. Стоимость обслуживания такой системы мала, но нужно учесть дополнительный расход пара.

## **Градирни**

Многие заводы расположены вблизи озер, рек и других естественных водоемов, так что обеспечены нужным количеством охлаждающей воды, если только высокая температура сбрасываемой воды не создает экологических проблем.

Однако не все заводы имеют неограниченный ресурс воды, и возможны ситуации, когда необходимое количество охлаждающей воды недоступно. Проблему можно решить рециркуляцией воды, но поскольку температура воды возрастает с каждым циклом на 10-15 °C, вакуум в выпарном аппарате скоро исчез бы. Решение состоит в использовании градирни, см. рис. 29. В градирне вода охлаждается за счет испарения (насколько – это зависит от температуры и влажности воздуха), поскольку вода распределяется по большей поверхности, а вентилятор обеспечивает необходимую турбулентность воздуха. Вода поступает из градирни в конденсатор, а оттуда возвращается в градирню.

Из-за испарения в градирне в систему, естественно, требуется добавлять воду, но ее расход невелик. При использовании конденсатора смешения подпиточной воды практически не требуется, т.к. с водой смешивается конденсат вторичного пара. Рекомендуется периодически полностью менять оборотную воду, чтобы избежать роста бактерий.

## **Специальные концентраторы**

В производстве детского питания, где распылительной сушке подвергается смесь нескольких ингредиентов, для повышения содержания сухого вещества от 40-42 до 50-55 % (в зависимости от состава смеси) применяют специальные концентраторы. При выпаривании удаляется весь воздух, попавший в продукт при смешивании ингредиентов, что обеспечивает минимальное содержание воздуха в сухом продукте. Концентратор оборудован расположенным под нагревательной камерой накопительным баком с регулировкой уровня, и таким образом его производительность согласуется с производительностью распылительной сушилки, см. рис. 30.

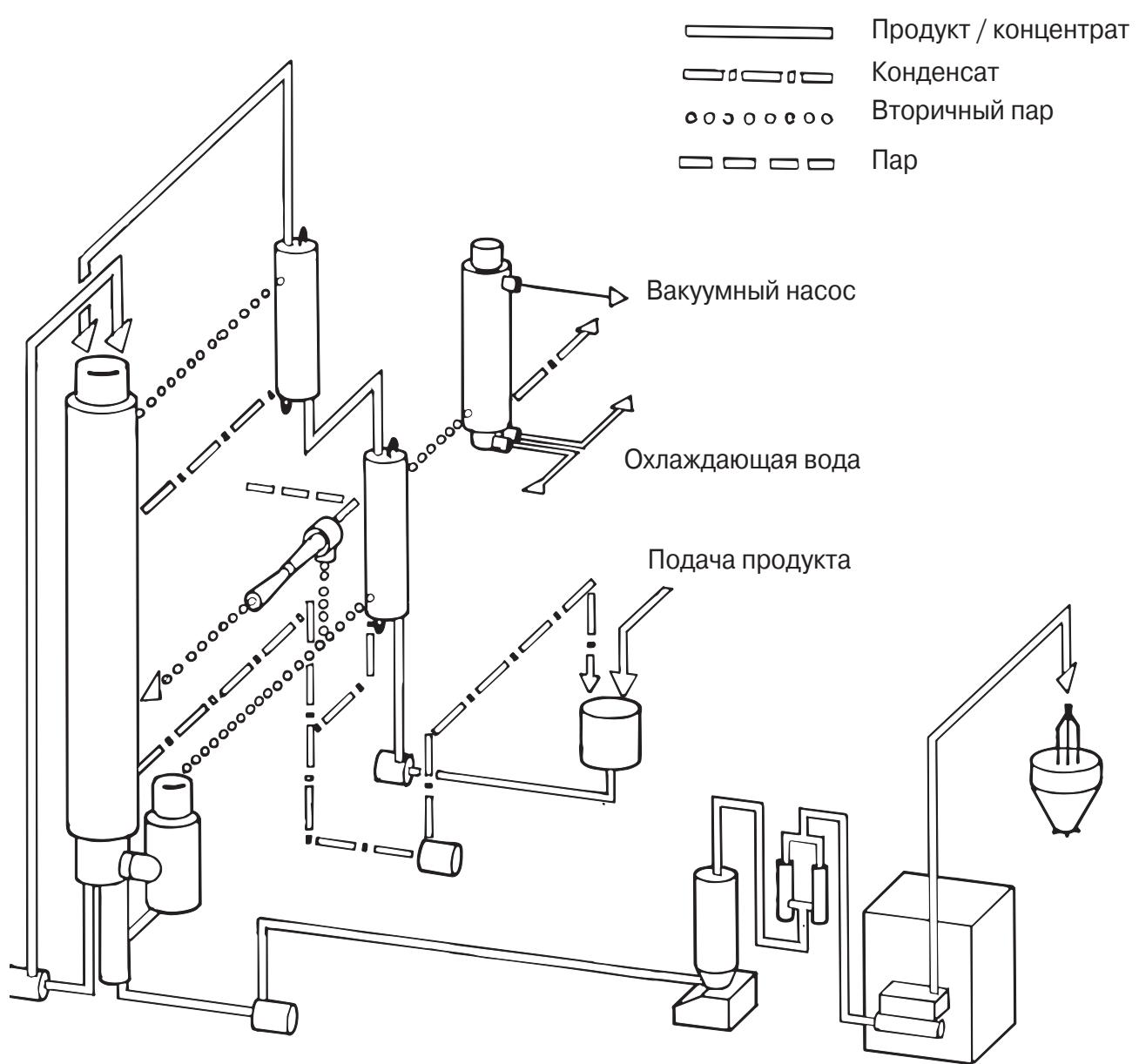


Рис. 30 Концентратор и система питания.

## Охладители мгновенного действия

Упаренный продукт очень часто должен иметь температуру ниже, чем на выходе последнего корпуса. Конечно, его можно пропустить через поверхностный охладитель, например, пластинчатый теплообменник, но это неудачное решение из-за высокой вязкости сгущенного продукта. Вместо этого используются охладители мгновенного действия. Аппарат очень прост – это вакуумная камера (вакуум создается пароструйным насосом), в которой распыляется упаренный продукт. Вакуум приводит к мгновенному испарению концентрата, а испарение вызывает охлаждение и, одновременно, некоторое увеличение содержания сухого вещества. Охладители мгновенного действия применяются, в основном, для сыворотки, где они особенно выгодны, так как охлаждение происходит мгновенно, без кристаллизации лактозы и засорения каналов между пластинами.

## Оборудование для водяного уплотнения

Все выпарные аппараты с падающей пленкой имеют насосы для перекачивания упаренного молока от корпуса к корпусу. Число насосов зависит от числа корпусов и от того, разделены ли они. Поскольку насосы работают под вакуумом, они требуют эффективного уплотнения, которое исключает подсос воздуха. Для уплотнения используется вода. Каждый насос требует около 50-100 л/час уплотняющей воды, из которых обычно 0,5-1 л/час попадает в поток молока. Система уплотнения должна быть спроектирована так, чтобы каждый насос имел небольшую воронку, позволяющую определить, не слишком ли много уплотняющей воды он расходует, и, что важнее, резкое возрастание расхода воды указывает на износ уплотнительного кольца.

## Контрольно-измерительные приборы и автоматика

Для работы выпарного аппарата абсолютно необходимо, чтобы контрольно-измерительные приборы работали правильно, и чтобы на них отображались все существенные параметры, иначе оператор не сможет обеспечивать нормальную работу установки.

Важнейшие измеряемые параметры:

- Расход сырого молока
- Температура сырого молока
- Температура подогрева
- Температура пастеризации
- Температуры нагрева и кипения в каждом корпусе
- Давление пара на входе
- Давление пара в термокомпрессоре
- Температура охлаждающей воды



Насосы выгрузки конденсата

- Температура теплой воды
- Вакуум
- Проводимость конденсата
- Плотность (содержание сухих веществ)

Эти показания должны отображаться на центральной панели управления, желательно, в диспетчерской, чтобы облегчить управление установкой.

В отношении автоматики и степени автоматизации существуют различные мнения. Однако для обеспечения устойчивой работы установки рекомендуются контуры регулирования для следующих параметров:

- расход исходного продукта
- температура пастеризации
- температура пара в термокомпрессоре
- содержание сухих веществ
- вакуум и температура кипения в последнем корпусе

### ***Расход исходного продукта***

Расход исходного продукта, т.е. молока, регулируется автоматически по сигналам расходомера – традиционного типа, а лучше – магнитного.

### ***Температура пастеризации***

Для того чтобы быть уверенным, что готовый продукт пропастеризован при нужной температуре, в большинстве случаев используют автоматическое регулирование температуры пастеризации. Это простая и хорошо известная система: температура молока определяется давлением греющего пара, которое регулируется простым редукционным клапаном.

### ***Давление пара в термокомпрессоре***

Давление пара необходимо поддерживать постоянным. Изменение давления пара на входе в термокомпрессор приведет к изменению количества и давления (температуры) смешанного пара. Соответственно изменится скорость испарения в первом корпусе и, следовательно, во всем выпарном аппарате.

### ***Содержание сухих веществ***

Для производства первоклассного продукта необходимо поддерживать стабильный уровень сухих веществ. Кроме того, это позволяет избежать чрезмерного концентрирования, которое увеличивает вязкость, создавая опасность пригора и даже полного засорения труб.

Содержание сухих веществ можно регулировать различными способами, но, прежде всего, его требуется определить. Это можно сделать, измерив показатель преломления или плотность.

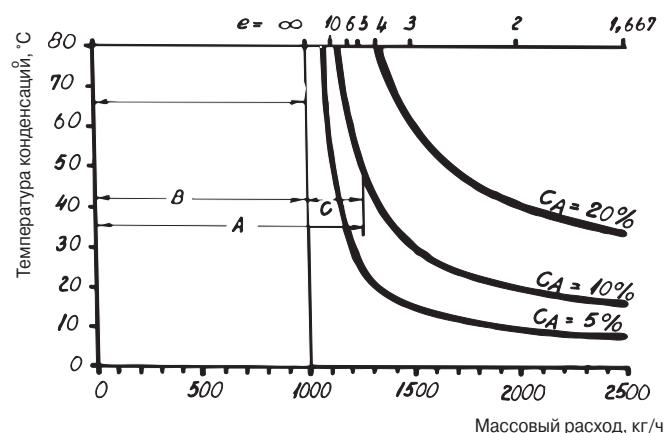
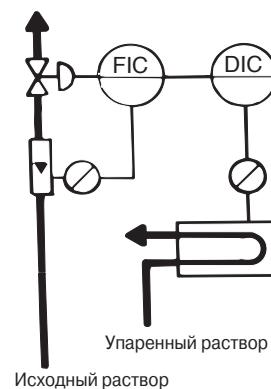


Рис. 31 Регулирование плотности изменением расхода сырья.

	Продукт / концентрат
	Конденсат
	Вторичный пар
	Пар

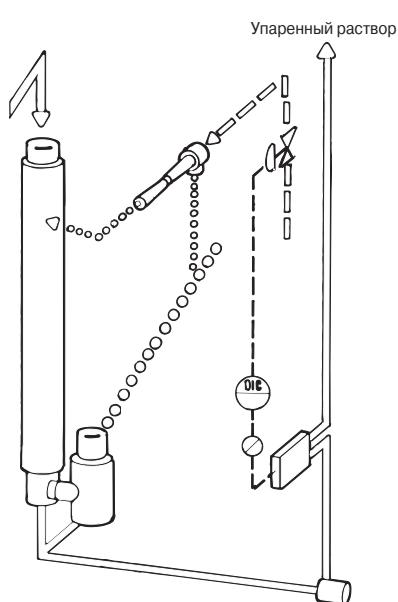


Рис. 32 Регулирование плотности изменением давления или расхода пара.

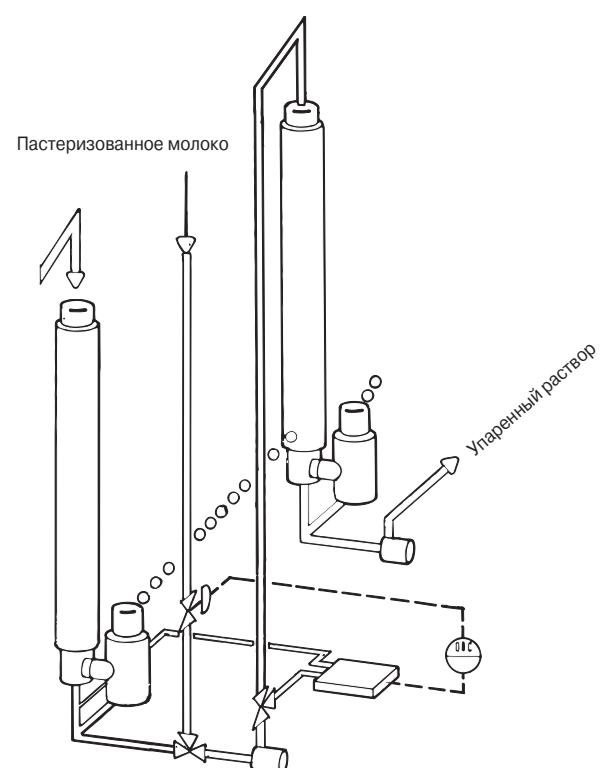


Рис. 33 Регулирование плотности подмешиванием пастеризованного молока или конденсата.

Показатель преломления концентрата молока зависит от удельной рефракции лактозы, минералов, жира и даже белка и концентраций этих веществ. Однако это значит, что измеренная сумма меняется при сезонных изменениях состава молока. Следовательно, пересчетный коэффициент (показатель преломления х коэффициент = % с.в.) не является константой, и его необходимо часто корректировать по измерению сухого остатка в муфельной печи в лаборатории. Показатель преломления преобразуется в электрический или пневматический сигнал и подается на контроллер.

Другой способ состоит в измерении плотности жидкости, которая пропорциональна содержанию сухого вещества. Плотность измеряется с помощью вибрирующей U-образной трубы, через которую проходит поток упаренного продукта. Частота колебаний уменьшается пропорционально массе продукта в трубке. Сигнал такого прибора можно использовать для управления контроллером.

Теперь можно обсудить, что делать с выходным сигналом контроллера, т.е. какой параметр требуется изменить, чтобы поддерживать постоянное содержание сухих веществ.

#### Расход молока

Изменение расхода молока означает изменение расхода упаренного продукта. При высоких коэффициентах концентрирования (например, в случае сыворотки) небольшое изменение расхода приведет к огромному изменению содержания сухих веществ и количества упаренного продукта, см. рис. 31. Этот способ, при всей его простоте, не рекомендуется использовать, так как изменение коэффициента покрытия легко может привести к образованию пригара.

#### Давление пара в термокомпрессоре

Поэтому чаще используется давление острого пара в термокомпрессоре, см. рис. 32. Однако, поскольку общее время обработки в выпарном аппарате составляет 8-20 минут, отклик системы на такое изменение требует длительного времени. Поэтому в больших выпарных аппаратах часто после второго или третьего корпуса устанавливают дополнительный контур регулирования.

#### Подмешивание пастеризованного молока к упаренному продукту

Третий вариант решения состоит в том, чтобы поддерживать в предпоследнем корпусе уровень сухого вещества чуть выше необходимого (на 1-2 %) и разбавлять концентрат пастеризованным молоком на входе в последний корпус. Этот способ предотвращает колебания уровня сухого вещества и избыточное концентрирование в последнем корпусе, поскольку скорость отклика велика, см. рис. 33.

#### ***Вакуум и температура кипения в последнем корпусе***

Вакуум в конденсаторе и, следовательно, в последнем корпусе регулируется расходом охлаждающей воды, а в некоторых случаях посредством так называемой «продувной системы», которая подает через клапан некоторое количество воздуха в конденсатор, так что система потребляет избыток воды. Эти две системы представлены на рис. 34 и 35.

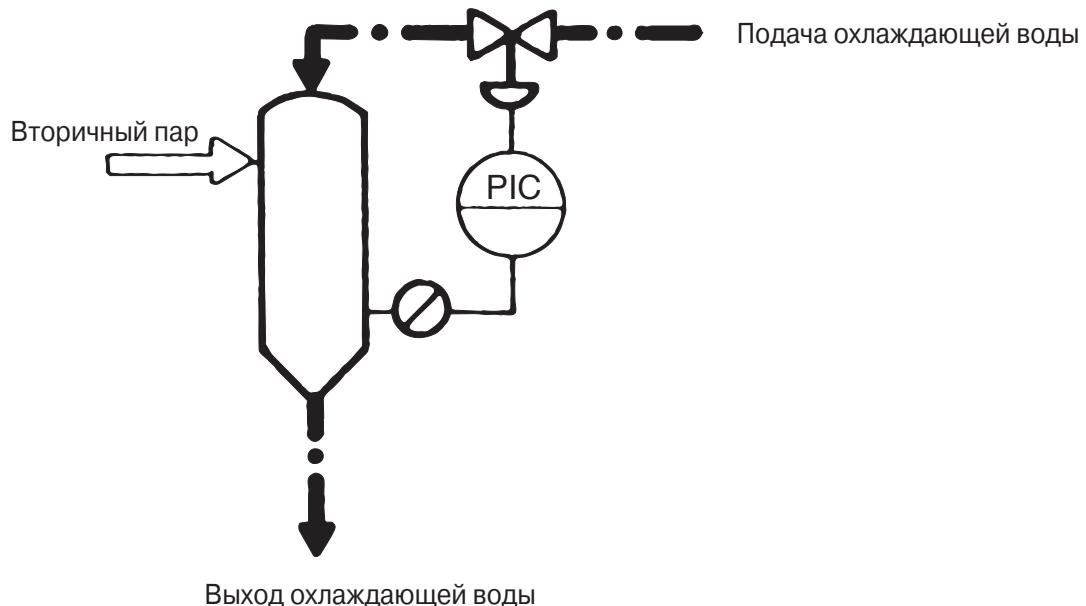


Рис. 34 Регулирование вакуума изменением расхода охлаждающей воды в смещающем конденсаторе.

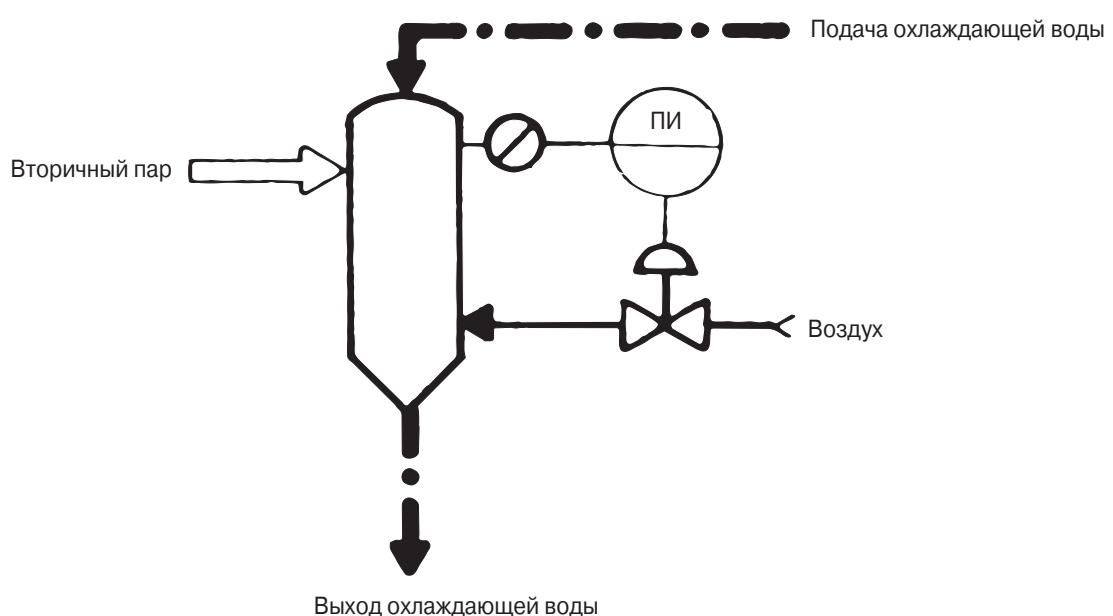


Рис. 35 Регулирование вакуума посредством “системы выпуска” в смещающем конденсаторе.

## Свойства сгущенного продукта

Из последнего корпуса выпарного аппарата выгружается жидкий упаренный продукт. Однако его вязкость может быть различной в зависимости от состава, термоустойчивости белков, предварительной обработки, температуры и содержания сухих веществ.

Концентраты цельного молока обычно имеют меньшую вязкость, чем концентраты обезжиренного молока, и для оптимального распыления их вязкость, как правило, не должна превышать 60 и 100 сП соответственно.

Сушилка может, конечно, обрабатывать продукты более высокой вязкости, но не без потери производительности (плохое распыление – крупные капли) и с худшим качеством продукта.

Состав влияет на вязкость, особенно содержание белка (P) относительно содержания лактозы (L). При высоком соотношении P:L концентрат имеет высокую вязкость. Это постоянная проблема для молока от коров джерсийской породы, но та же тенденция отмечается и для других пород в начале периода лактации. Соотношение P:L можно исправить добавлением лактозы. Как правило, повышение содержания жира и лактозы приводит к снижению вязкости. Повышение содержания белка увеличивает вязкость.

Если молоко подвергается перед выпариванием высокотемпературной обработке, особенно в пастеризаторах поверхностного типа, вязкость упаренного продукта увеличивается.

Температура концентрата, естественно, непосредственно влияет на вязкость, – чем выше температура, тем ниже вязкость.

Содержание сухих веществ в концентрате очень существенно влияет на вязкость, – чем выше уровень сухих веществ, тем выше вязкость.

Однако выше перечислены только параметры, непосредственно сказывающиеся на вязкости. Вязкость очень сильно зависит от времени – так называемый эффект загустевания при старении. Имеется в виду увеличение вязкости концентрата в процессе хранения. Это увеличение зависит от состава, главным образом, от белков, которые связываются друг с другом, от температуры и концентрации. Эффект загустевания при старении только частично снимается перемешиванием.

Увеличение температуры, естественно, снижает вязкость, но поскольку при повышенной температуре загустевание идет быстрее, со временем вязкость поднимется до прежнего уровня и выше. См. рис. 36.

На процессе загустевания оказывается также уровень сухих веществ, – чем он выше, тем интенсивнее загустевание. См. рис. 37. Состав влияет на загустевание также, как на вязкость. Если упаренный продукт требуется долго хранить или транспортировать на большое расстояние перед дальнейшей обработкой, его концентрация и температура должны быть ниже. Низкая температура предотвратит также и рост бактерий.

Качество концентрата, предназначенного для распылительной сушки, должно отвечать следующим требованиям.

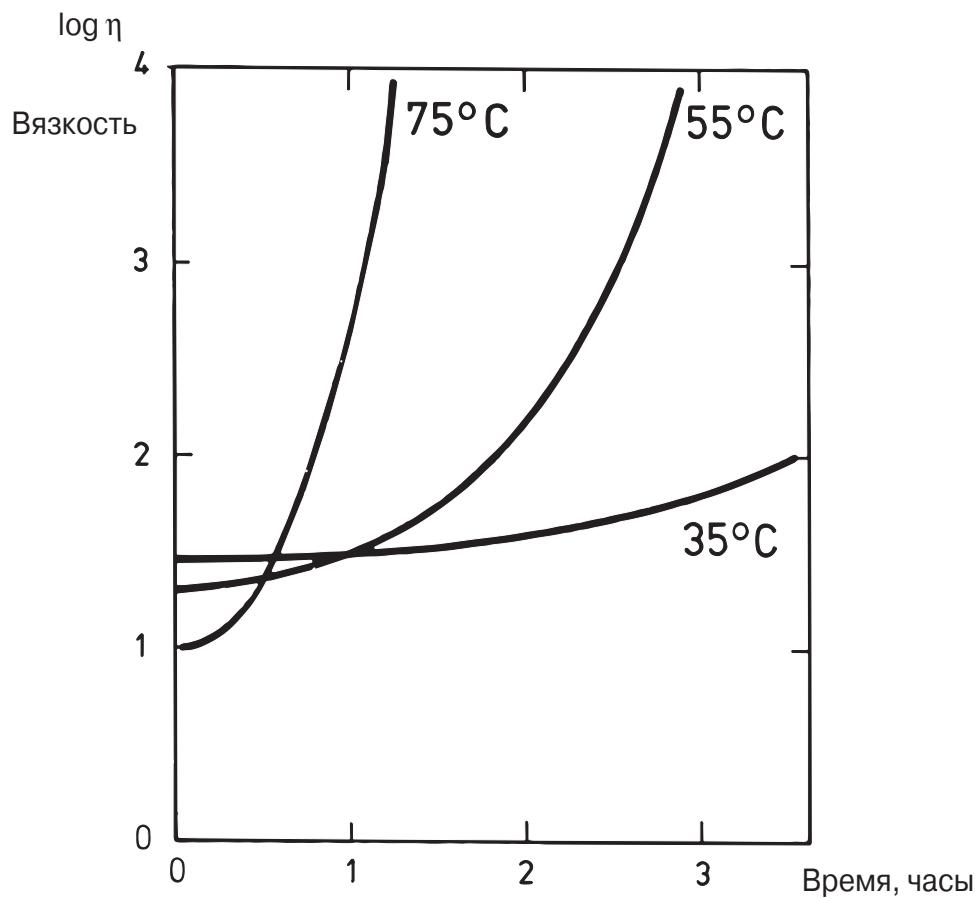


Рис. 36 Загустевание при старении как функция температуры (обезжиренное молоко, 48,5 % с.в.).

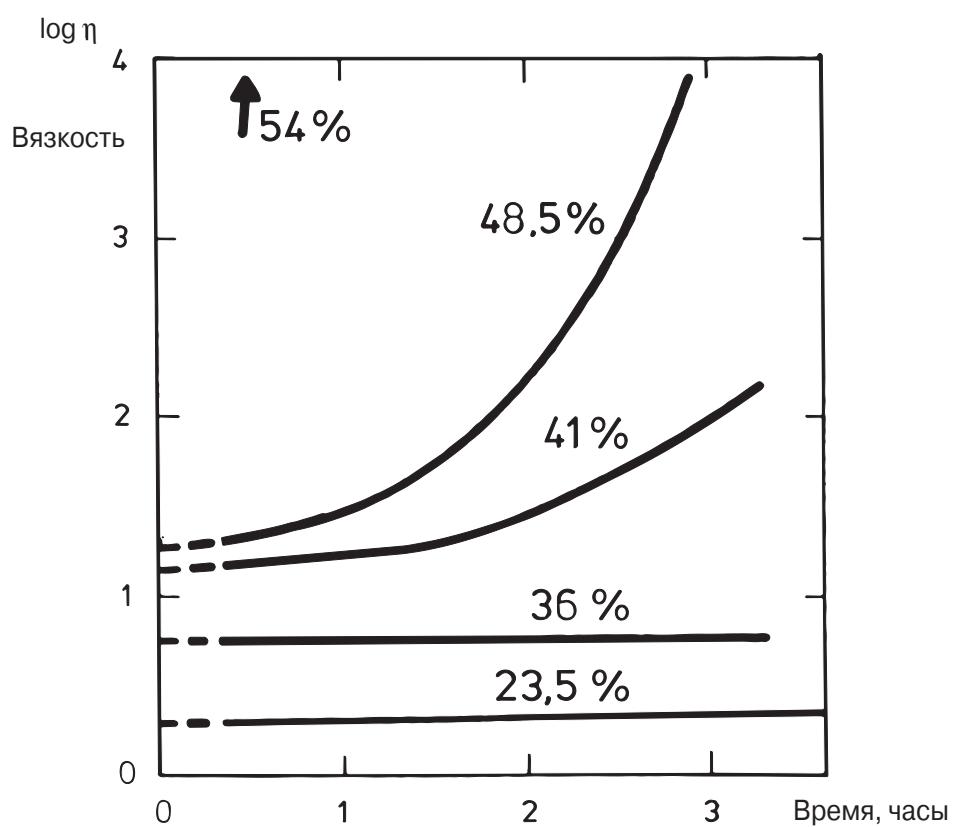


Рис. 37 Загустевание при старении как функция температуры (обезжиренное молоко,  $55^{\circ}\text{C}$  с.в.).

**Обезжиренное молоко**

- Содержание сухих веществ: 48-50 % с.в.
- Вязкость:  
не более 100 сП при 40 °C на подаче в распылитель. Измерение проводится на концентрате, хранившемся под вакуумом не дольше 15 минут. Измерение выполняется на вискозиметре Брукфилда модели LVT со шпинделем 2, скорость 60 об/мин, температура 40 °C.
- Денатурация белка  
Для быстрорастворимых продуктов индекс азота сывороточного белка должен быть 2,5-3,5 мг/г. Для порошков высокой насыпной плотности – не более 1,0 мг/г.
- Показатель растворимости: не измеряется.
- Ситовый анализ:  
отсутствие видимых нерастворимых частиц (сырных хлопьев) на сите 250 мкм после прощеживания 1 литра концентрата и промывания водой.
- Пригорелые частицы: не измеряются.

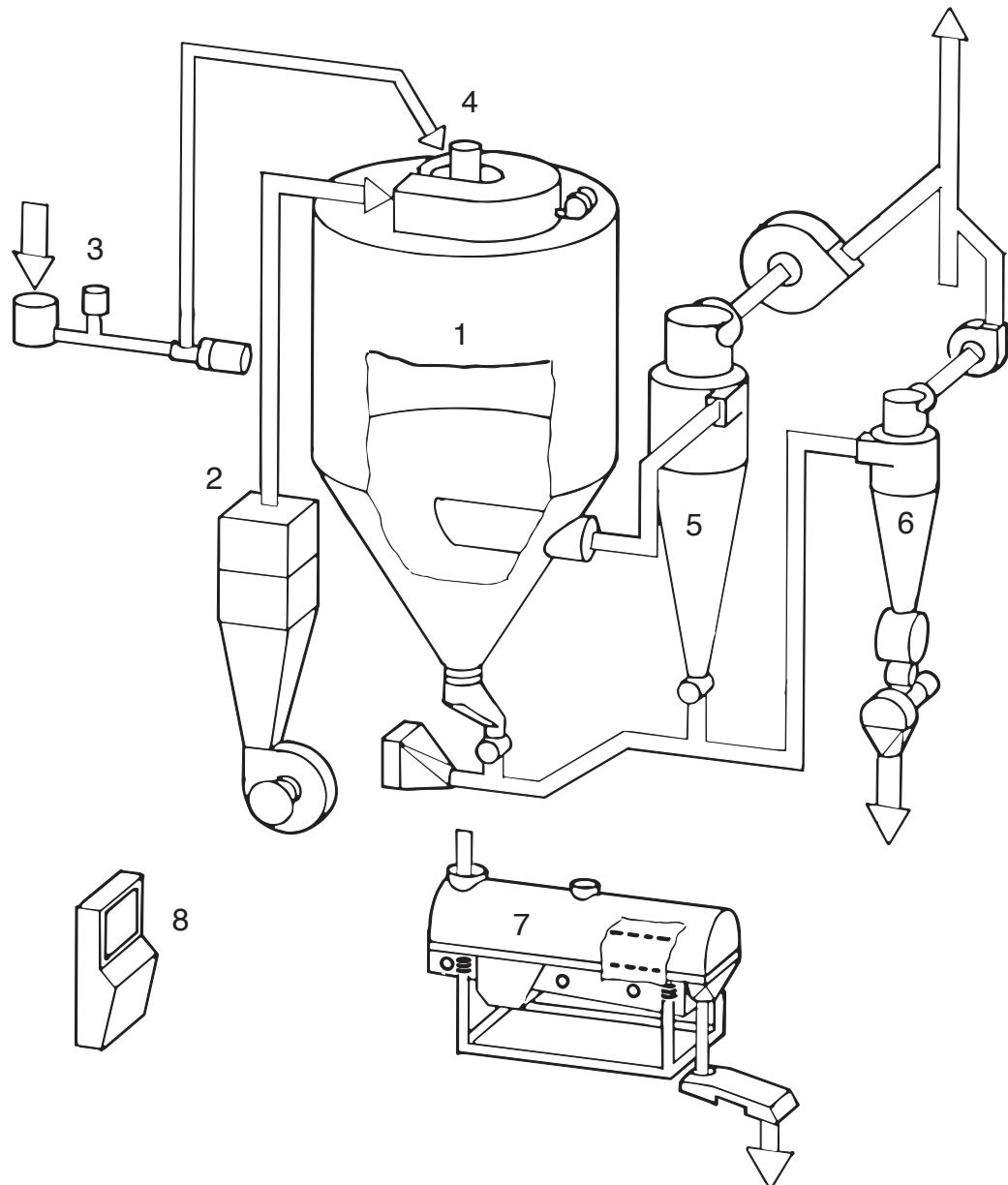
**Цельное молоко**

- Содержание сухих веществ: 48-50 % с.в.
- Вязкость:  
не более 60 сП при 40 °C на подаче в распылитель. Измерение проводится на концентрате, хранившемся под вакуумом не дольше 15 минут. Измерение выполняется на вискозиметре Брукфилда модели LVT со шпинделем 2, скорость 60 об/мин, температура 40 °C.
- Денатурация белка  
Для быстрорастворимых продуктов индекс азота сывороточного белка должен быть 2,5-3,5 мг/г. Для порошков высокой насыпной плотности – не более 1,0 мг/г по сухому обезжиренному остатку.
- Показатель растворимости: не измеряется.
- Ситовый анализ:  
отсутствие видимых нерастворимых частиц (сырных хлопьев) на сите 250 мкм после прощеживания 1 литра концентрата и промывания водой.
- Пригорелые частицы: не измеряются.



**.Сыворотка**

- Содержание сухих веществ: не менее 52 % с.в.
- Степень кристаллизации: ≥ 75 % присутствующей лактозы,  
средний размер кристаллов 30 мкм  
максимальный размер кристаллов 50 мкм
- Вязкость:  
не более 1000 сП при 40 °C на подаче в распылитель. Измерение выполняется на вискозиметре Брукфилда модели LVT со шпинделем 2, скорость 60 об/мин, температура 40 °C.
- Денатурация белка  
Денатурация сывороточных белков – не более 25 % (пастеризация в выпарном аппарате приблизительно при 80 °C, 15 с)
- Показатель растворимости: не измеряется.
- Ситовый анализ:  
отсутствие видимых нерастворимых частиц (сырных хлопьев) на сите 250 мкм после процеxивания 1 литра концентрата и промывания водой.
- Пригорелые частицы: не измеряются.



1. Сушильная камера
2. Система нагрева и распределения воздуха
3. Система питания
4. Распылитель
5. Система отделения порошка
6. Система пневмотранспорта и охлаждения
7. Аппарат с псевдоожженным слоем для досушивания и охлаждения
8. КИПиА

Рис. 38 Установка распылительной сушки.

# Распылительная сушка

---

По определению распылительная сушка – это превращение жидкого сырья в сухой продукт посредством распыления сырья в горячем сушильном агенте. Это непрерывный одноступенчатый технологический процесс. Сырье может быть раствором, суспензией или пастой. Высушенный продукт состоит из отдельных частиц или агломератов – в зависимости от физических и химических свойств сырья, конструкции сушилки и рабочих условий. В последние три десятилетия распылительная сушка интенсивно исследовалась и развивалась, так что современное оборудование позволяет получить продукт, обладающий заданными заказчиком свойствами.

В молочной промышленности распылительная сушка применяется с 1800 года, но в больших масштабах она стала применяться для сушки молока не раньше 1850 года. Однако процесс требовал добавления сахара, серной кислоты или щелочи, так что готовый продукт нельзя было считать чистым.

Один из первых патентов на распылительную сушку был выдан в 1901 году немецкому изобретателю Штауфу, который распылял молоко форсунками в камере с теплым воздухом. Первый настоящий прорыв, однако, произошел в США в 1913 году, когда американец Грей и датчанин Йенсен разработали форсуночную распылительную сушилку и начали производить и продавать промышленные сушильные установки.

Первый роторный распылитель (атомайзер) был разработан немецким изобретателем Краусом в 1912 году, но этот метод не применялся на практике до 1933 года, когда датский инженер Нироп получил на него мировой патент.

После того как эти первоходцы заложили основу современной индустрии сухого молока, техника развивалась быстро, и современное оборудование, как правило, отличается сложным устройством и использованием изощренных технологий.

Традиционная распылительная сушилка работает следующим образом, см. рис. 38.

Сырье перекачивается из резервуара подачи продукта в распылитель, расположенный вместе с воздухораспределителем в верхней части сушильной камеры. Сушильный воздух забирается подающим вентилятором из атмосферы и направляется через фильтр и через нагреватель в воздухораспределитель. Распыленные капли контактируют с горячим воздухом и испаряются, воздух при этом охлаждается. Большая часть высушенного распыленного сырья падает на дно камеры и подается в систему пневмотранспорта и охлаждения. “Мелочь”, т.е. частицы малого диаметра, уносится воздухом, поэтому воздух требуется пропускать через циклоны для отделения мелочи. Мелочь, собирающаяся на дне циклонов, выгружается через затворы в систему пневмотранспорта . Воздух из циклонов выбрасывается в атмосферу посредством вытяжного вентилятора. Две фракции порошка объединяются в системе пневмотранспорта и охлаждения, затем разделяются в сепараторе и упаковываются в мешки. КИПиА сушилки включает в себя приборы для измерения температуры воздуха на входе и выходе, устройство автоматического регулирования температуры на входе посредством изменения давления пара или подачи топлива в воздушный нагреватель и устройство автоматического регулирования температуры на выходе посредством изменения подачи сырья в распылитель.

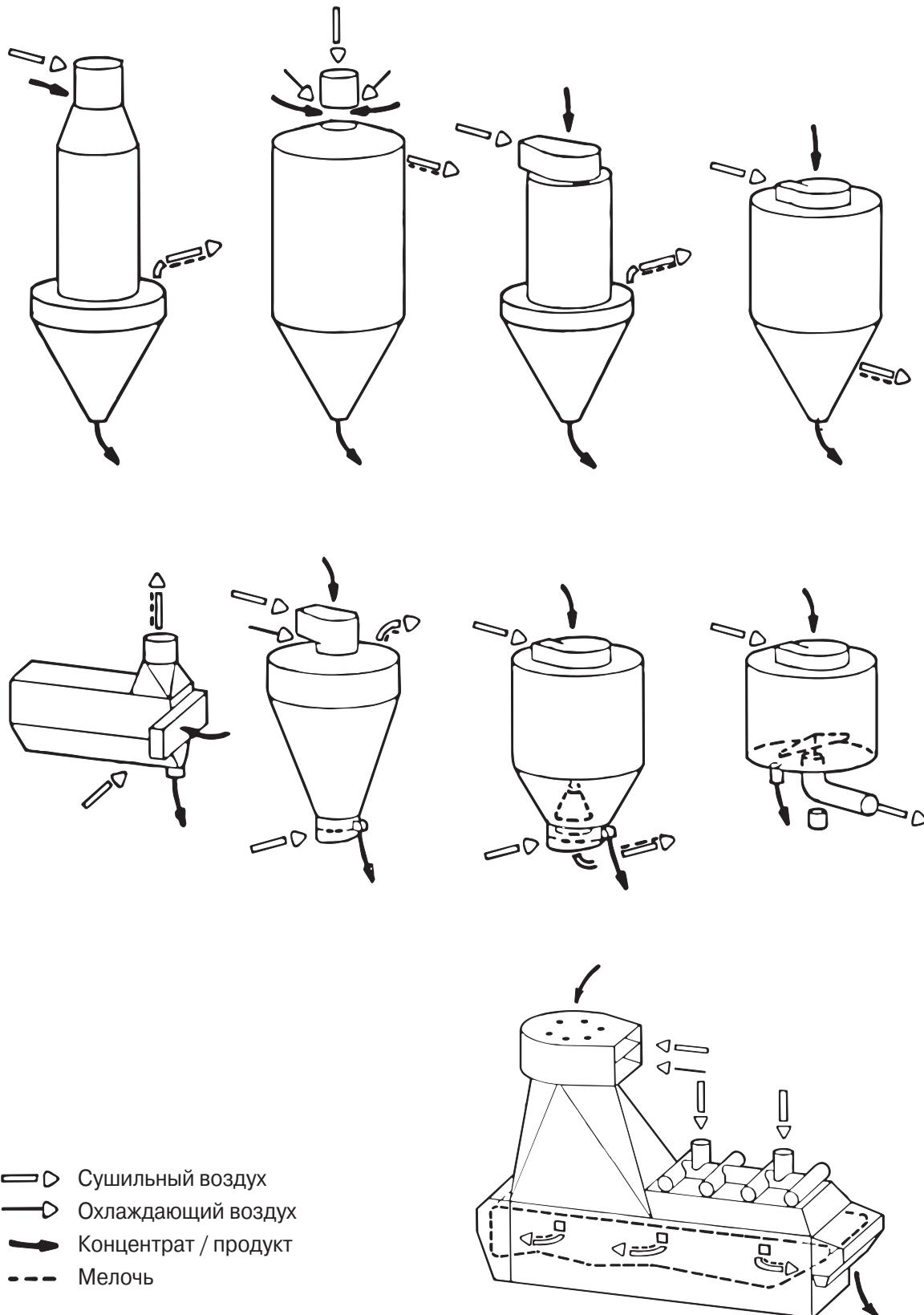


Рис. 39      Разные типы сушильных камер.

Традиционная распылительная сушилка состоит из следующих основных компонентов:

- сушильная камера (1)
- система нагрева и распределения воздуха (2)
- система подачи (3)
- распылитель (4)
- система отделения порошка (5)
- система пневмотранспорта и охлаждения (6)
- Установки кипящего слоя после сушки/охлаждения (7)
- КИПиА (8)

## Сушильная камера

На рынке представлены сушильные камеры различных конструкций. Наиболее распространена цилиндрическая камера с коническим ( $40\text{--}60^\circ$ ) дном, из которой порошок выгружается самотеком. Имеются также камеры с плоским дном, в этом случае выгрузка порошка производится с применением скребкового или аспирационного устройства. Кроме того, существуют горизонтальные прямоугольные сушильные камеры, в которых также используется принудительная выгрузка порошка (скребок или шнек). Различные типы сушильных камер показаны на рис. 39.

Вообще говоря, камеры с коническим дном и гравитационной выгрузкой порошка легче адаптировать к различным процессам сушки, таким как распылительная сушка с встроенным псевдоожженным слоем или транспортером, и поэтому открывают более широкие возможности для сушки различных продуктов.

В настоящее время сушильные камеры, как правило, конструируют так, чтобы исключить внутренние преграды для потоков воздуха, которые приводят к отложениям порошка.

В башенных сушильных камерах особое внимание уделяется ламинарности воздушного потока, для этого систему отвода воздуха проектируют так, чтобы диаметр конуса был больше диаметра цилиндрической части и между ними образовался кольцевой канал. Это снижает скорость вытяжного воздуха и уменьшает унос порошка в циклон. Такая камера специально предназначена для сушки продуктов детского питания или белковых продуктов, сырье для которых содержит мало сухих веществ.

Разработка рукавных фильтров, допускающих безразборную мойку, позволила создавать сушильные камеры со встроенными рукавными фильтрами, см. стр. 154.

Сушильная камера обязательно оборудуется смотровыми люками, осветительными приборами, предохранительными клапанами и другими устройствами для обеспечения безопасности, такими как установки пожаротушения, подающие в камеру воду или пар.

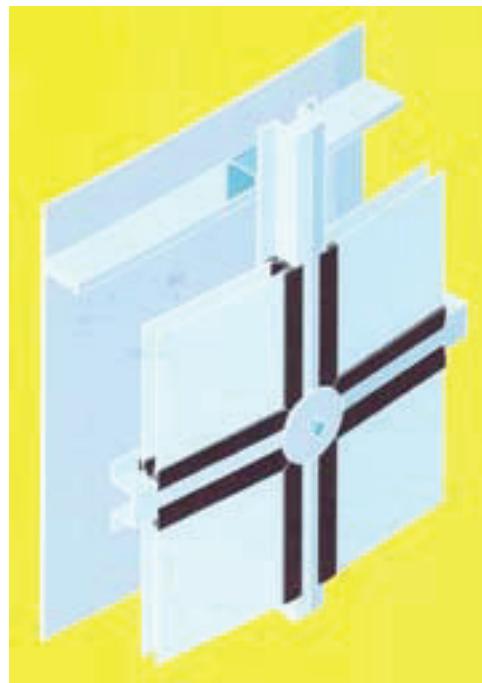


Рис. 40 Съемные изоляционные панели камер распылительной сушки.

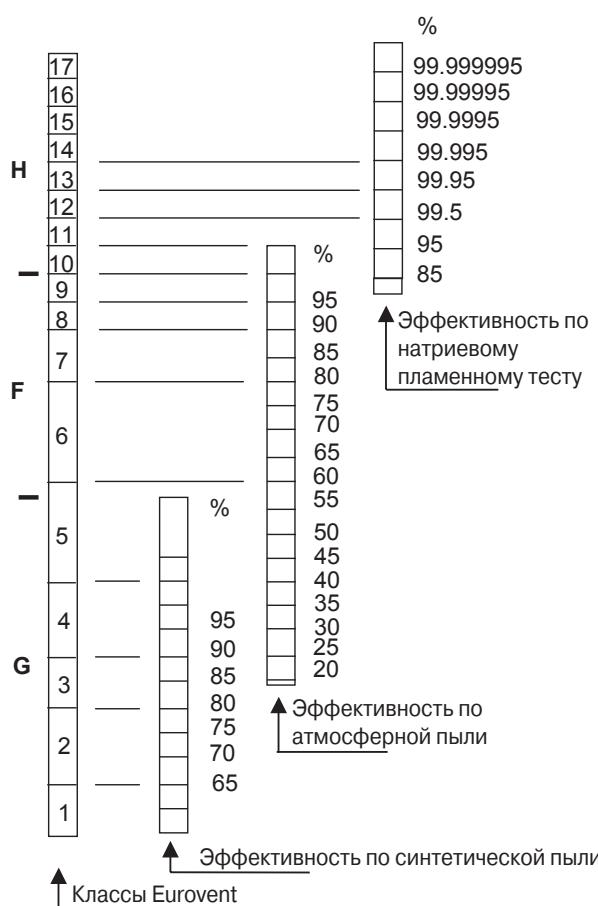
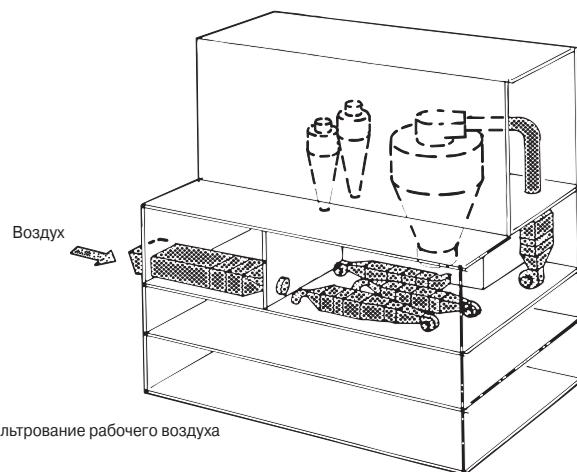


Рис. 40а Классы фильтров.

Сушильные камеры обычно снабжены теплоизоляцией в виде съемных пустотелых панелей (см. рис. 40), либо 80-100 мм слоя минеральной ваты, обшитого листами нержавеющей стали или оцинкованной стали с ПВХ покрытием. Преимущество съемных панелей состоит в том, что они позволяют осматривать стенки камеры. Треугольники в камере приводят к отсыреванию теплоизолирующего материала и развитию в нем бактерий или к появлению холодных пятен на стенке, где формируются отложения.

## Система нагрева и распределения воздуха

### Фильтрование воздуха

До недавнего времени не существовало специальных требований относительно фильтрования рабочего воздуха для распылительной сушки. Сейчас, однако, местные власти ввели очень строгие требования, которые должны обеспечить более высокий уровень чистоты. Классы фильтров приведены на рис. 40а. Сообщая % эффективность фильтрования, важно указать способ ее измерения. Общим для различных требований к фильтрованию воздуха является следующее:

- Воздух должен подаваться отдельным вентилятором через фильтр грубой очистки в цехах, где размещаются вентилятор, фильтр и нагреватель. В этом цеху должно поддерживаться избыточное давление, чтобы в него не проникал нефильтрованный воздух.
- Выбор класса и расположения фильтра зависят от конечной температуры рабочего воздуха следующим образом:
  - Для основного сушильного воздуха, который нагревается выше 120 °C, требуется только грубое фильтрование с эффективностью до 90 %. Фильтр должен располагаться на стороне нагнетания вентилятора.
  - Для вторичного воздуха, который нагревается менее чем до 120 °C или совсем не нагревается, эффективность фильтрования должна составлять 90-95 % и фильтр должен быть установлен после нагревателя (охладителя). В некоторых странах действуют даже более строгие требования – эффективность фильтрования должна составлять 99,995 %, что соответствует классу фильтра EU13/14 (или H13/14).
- Текущая практика такова:
  - Молочные продукты, отвечающие требованиям не ниже 3A:

предварительное фильтрование EU4 (или G4)	Метод оценки ≈35% эффективность по пятну пыли
Фильтрование основного воздуха EU7 (или F7)	≈90% эффективность по пятну пыли
Фильтрование вторичного воздуха EU7 (или F7)	≈90% эффективность по пятну пыли
  - Продукты детского питания, отвечающие требованиям не ниже IDF:

предварительное фильтрование EU6 (или F6)	≈70% эффективность по пятну пыли
Фильтрование основного воздуха EU7 (или F7)	≈90% эффективность по пятну пыли
Фильтрование вторичного воздуха EU9 (или F9)	>95% эффективность по пятну пыли

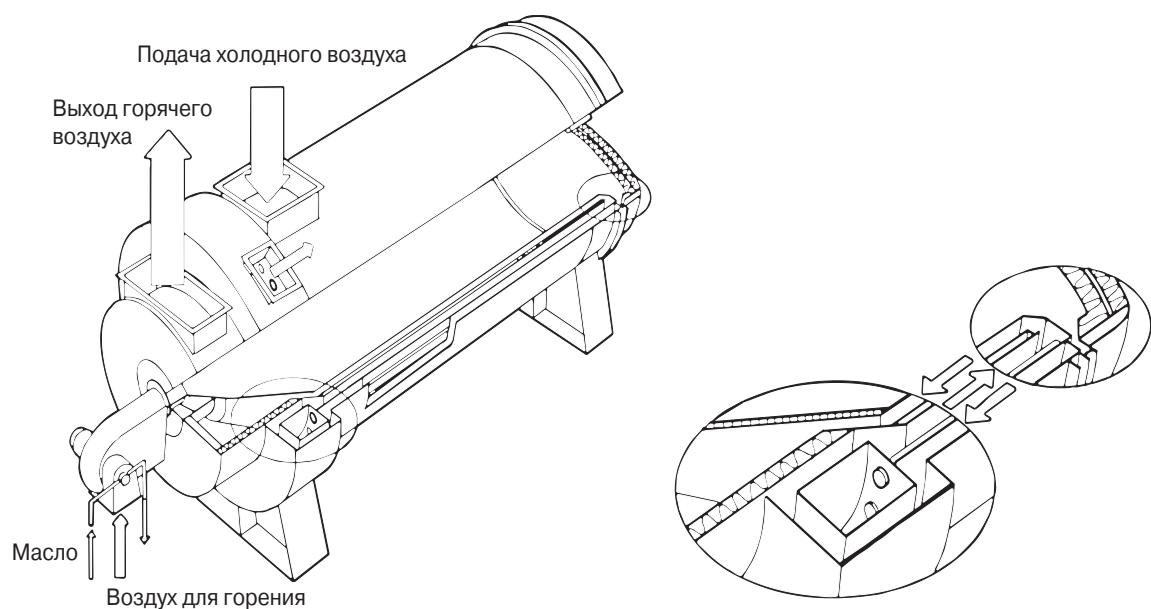


Рис. 41 Поверхностный нагреватель воздуха с мазутной горелкой.



## Система нагрева воздуха

Воздух можно нагревать разными способами:

- в поверхностном теплообменнике – паром /мазутом/ газом / горячим маслом
- в контактном теплообменнике – газом / электроэнергией

### **Поверхностный нагрев**

Паровой нагреватель представляет собой простой калорифер. Достигаемая температура зависит от имеющегося давления пара. При нормальных условиях можно нагреть воздух до температуры на 10 °C ниже, чем соответствующая температура насыщения пара.

Современные паровые нагреватели разделены на секции, так что холодный воздух сначала попадает в секцию конденсата, затем в секцию пара низкого давления (которая обычно является самой большой, поскольку должна вмещать как можно больше пара низкого давления) и, наконец, в секцию пара высокого давления. Воздухонагреватель состоит из рядов оребренных труб, заключенных в металлический кожух. Тепловая нагрузка рассчитывается по количеству и удельной теплоемкости воздуха. Размер нагревателя зависит от особенностей теплопередачи через трубы и ребра и обычно рассчитывается из коэффициента 50 ккал/°C x ч x м<sup>3</sup> при скорости воздуха 5 м/с. Паровые нагреватели воздуха, как правило, имеют кпд 98-99 %. Паровой котел обычно устанавливается на некотором расстоянии от нагревателя, и он должен обеспечивать дополнительные 2-3 бар изб. для компенсации потерь давления в паропроводе и регулирующем клапане. Во избежание коррозии труб нагревателя воздуха рекомендуется изготавливать их из нержавеющей стали.

В поверхностных нагревателях, нагреваемых мазутными или газовыми горелками, воздух и продукты горения двигаются по разным каналам. Продукты горения проходят через оцинкованные трубы, которые передают тепло воздуху. Камера сгорания выполняется из теплостойкой стали. Крышки нагревателя должны быть съемными для удобства чистки труб. Нагреватели этого типа работают в диапазоне температур 175-250 °C с кпд около 85 %. См. рис. 41.

Масляные воздухонагреватели используются либо самостоятельно, либо в дополнение к паровым нагревателям, когда давление пара не обеспечивает достаточной температуры воздуха на входе. Система нагрева состоит из двух теплообменников, один из которых нагревается газовой или мазутной горелкой, а другой отдает теплоту воздуху. Между этими теплообменниками с высокой скоростью циркулирует специальное масло для применения в пищевой промышленности или иной жидкий теплоноситель, не разлагающийся при высокой температуре. Основное преимущество масляных воздухонагревателей состоит в том, что это открытая негерметичная система.

### **Контактный нагрев**

Контактные газовые нагреватели используются только в тех случаях, когда продукты сгорания не могут вступить в контакт с продуктом. Поэтому они редко применяются в пищевой или молочной промышленности. Контактные газовые нагреватели дешевы, имеют высокий кпд и обеспечивают температуру до 2000 °C. Если установка оборудуется воздухонагревателем с непосредственным нагревом от горелки, необходимо учесть образующийся при сгорании водяной пар (44 мг/кг сухого воздуха/°C), который увеличивает влажность сухого воздуха. Поэтому температуру на выходе нагревателя нужно увеличить для компенсации увеличения содержания влаги и поддержания требуемой относительной влажности.



Контактный нагреватель воздуха с газовой горелкой

Сгорание природного газа (метана) протекает согласно следующей стехиометрической формуле:



Требуемый для горения кислород поступает из атмосферного воздуха, который содержит 21%  $\text{O}_2$  и 79%  $\text{N}_2$ .

Поэтому при горении образуется небольшое количество оксидов азота в результате реакции азота и кислорода при повышенной температуре. Образующаяся смесь оксида азота  $\text{NO}$  и диоксида азота  $\text{NO}_2$  обозначается  $\text{NO}_x$ .

Нужно заметить, что высокие температуры сгорания, высокая интенсивность теплопередачи, большой избыток воздуха и малое время пребывания в камере сгорания увеличивают образование  $\text{NO}_x$ .

Для сравнения ниже приведены приблизительные концентрации  $\text{NO}_x$  в различных условиях:

сигаретный дым	4000	ppm
выхлопные газы автомобиля	2000	ppm
перекресток с интенсивным движением	900	ppm
газовая колонка	75	ppm
предельное содержание в детском питании согласно ВОЗ	45	ppm
камера распылительной сушилки	2-5	ppm
обычное свежее молоко	<1	ppm
обычная питьевая вода	0.1	ppm

Уровень  $\text{NO}_x$  в рабочем воздухе после контактного нагрева в газовой горелке зависит от многих переменных, однако при хорошо отрегулированном воздухонагревателе он не превысит указанного предела. Только около 2 % образовавшегося  $\text{NO}_x$  абсорбируется сухим молоком.

Содержание  $\text{NO}_x$  в сухом молоке зависит не только от способа нагрева рабочего воздуха, но и от корма, который получали коровы, а также от применявшимся удобрений и от почвы, на которой корм произрастал.

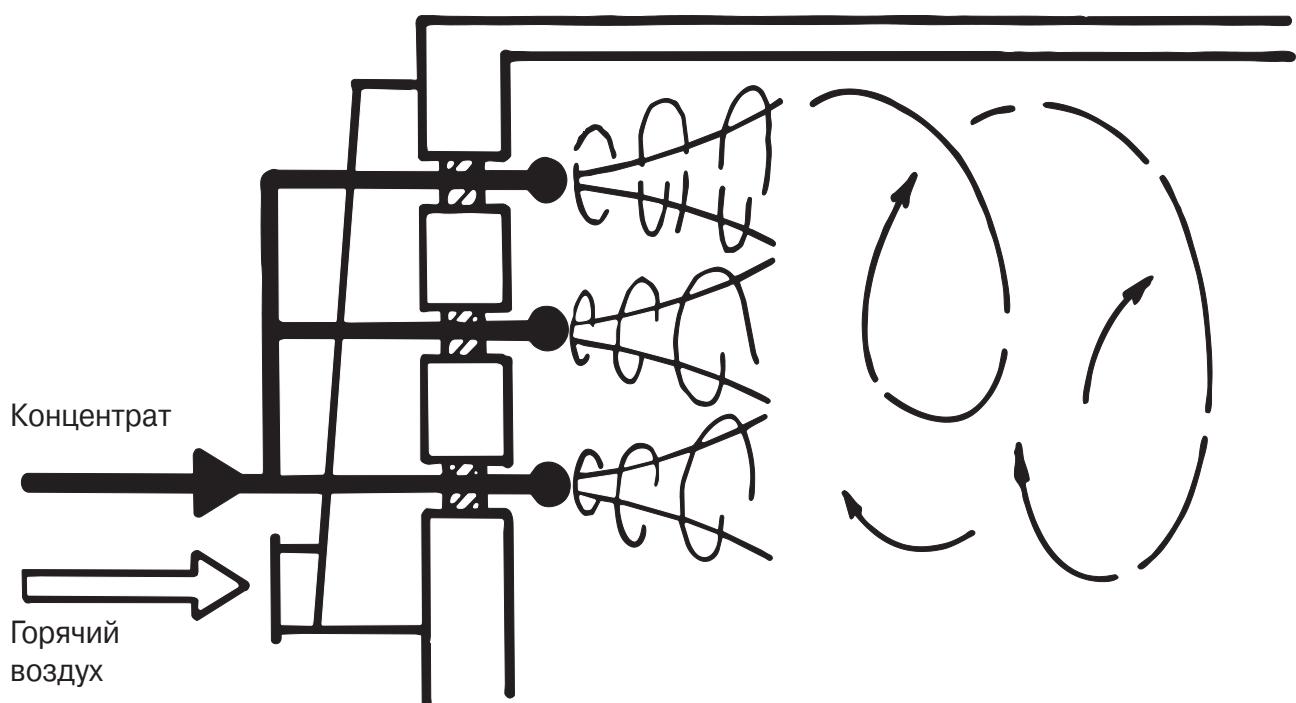


Рис. 42 Воздухораспределитель в горизонтальной сушильной камере.

Уровень NO<sub>x</sub> в сухом молоке:

поверхностный нагрев:	следы – 2 ppm
контактный нагрев:	1 – 3,5 ppm

а уровень нитратов (NO<sub>3</sub>) в 5-10 раз превышает уровень нитритов (NO<sub>2</sub>).

Электрические воздухонагреватели широко применяются в лабораторных и пилотных распылительных сушилках. Эти нагреватели имеют низкую стоимость, но дороги в эксплуатации и поэтому не используются в промышленных установках.

## Распределение воздуха

Распределение воздуха – один из важнейших моментов для работы распылительной сушилки. В зависимости от конструкции установки и производимого продукта применяются различные системы распределения воздуха.

По конструкции сушилки делятся на три категории: прямоточные, противоточные и со смешанным потоком. Однако в молочной промышленности, где требуется обеспечить наилучшее смешение входящего горячего воздуха с высушиваемыми каплями для максимально быстрого испарения, применяются только прямоточные сушилки.

В случае горизонтальной сушильной камеры воздухораспределитель выполняется в виде распределительной камеры, и каждая форсунка окружена потоком нагнетаемого воздуха. Такая же система применяется в вертикальных цилиндрических сушилках, см. рис. 42. Однако чаще всего воздухораспределитель располагается в верхней части крыши сушильной камеры, а распылитель находится в центре воздухораспределителя, что обеспечивает наилучшее смешение воздуха с каплями. В цилиндрических вертикальных сушилках это может быть перфорированная крыша камеры, которая создает поршневой воздушный поток – многочисленные форсунки расположены на перфорированной пластине так, чтобы обеспечить охлаждение воздуха концентратором. Эта система, однако, затрудняет возврат мелочи, и достигимая комбинация скорости воздуха и расположения форсунок не оптимальна для эффективной сушки. Следует отметить, что воздухораспределитель должен обладать способностью направлять воздух и капли в нужном направлении, чтобы избежать отложений в сушильной камере.

В сушилках большой производительности с форсуночным распылением устанавливается 3-5 воздухораспределителей с форсунками. Однако при такой конструкции невозможно избежать отложений на центральной части крыши между воздухораспределителями и, кроме того, затруднен возврат мелочи.

В современных распылительных сушилках для пищевых и молочных продуктов применяются два типа воздухораспределителей:

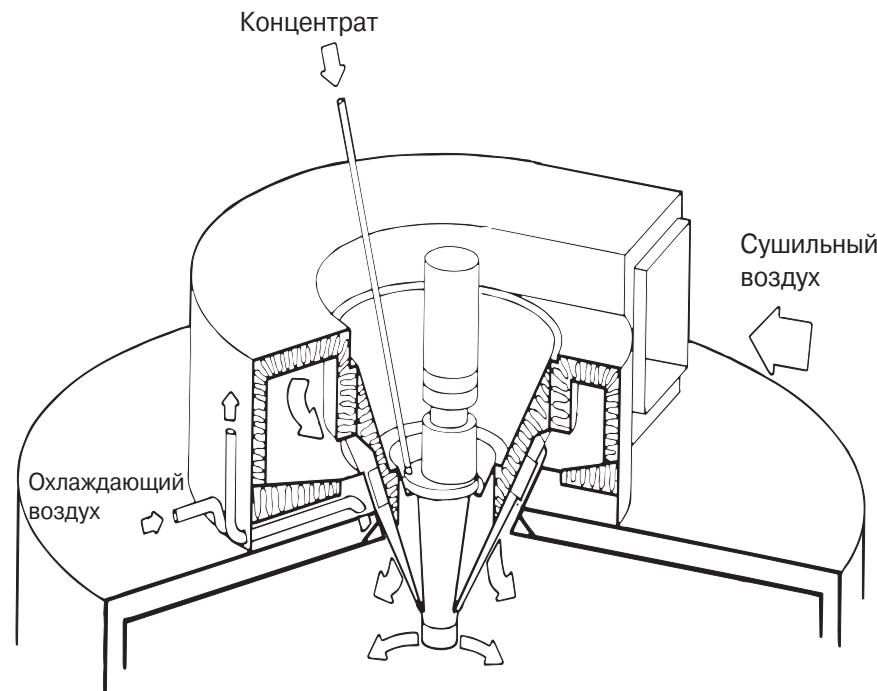


Рис. 43 Потолочный воздухораспределитель с регулируемыми направляющими лопатками.

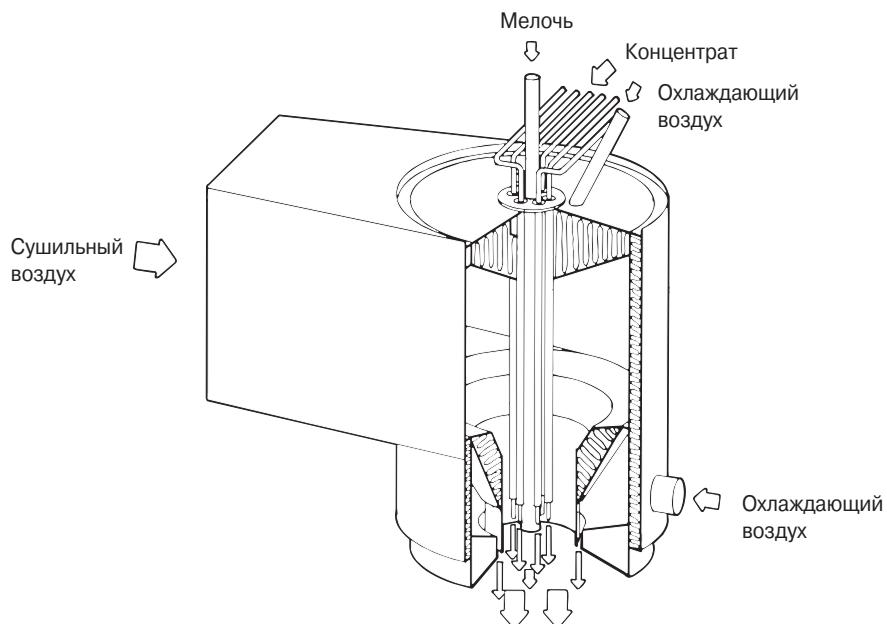


Рис. 44 Воздухораспределитель с поршневым воздушным потоком.

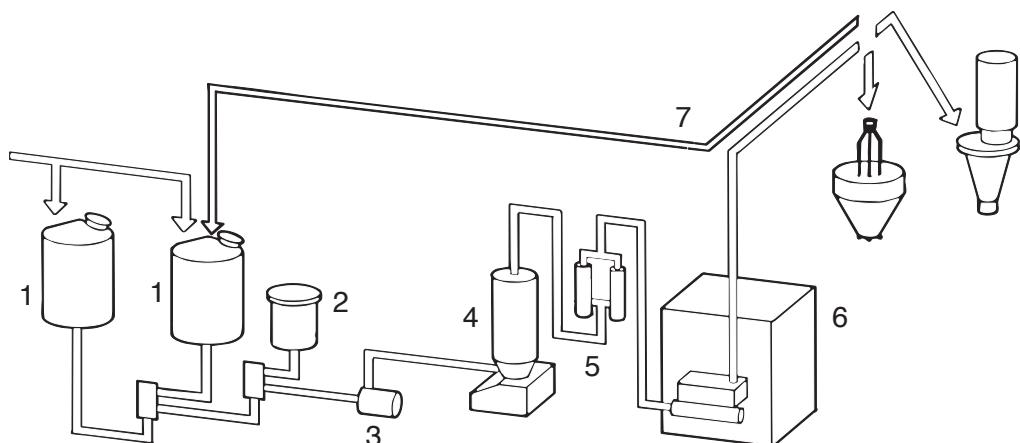


Рис. 45 Система питания

### ***С вращающимся воздушным потоком***

Воздух подается тангенциально в спиральный корпус воздухораспределителя, см. рис. 43, откуда направляется лопатками радиально-нисходящим потоком. Этот тип воздухораспределителей применяется с роторными распылителями (атомайзерами) и форсуночными распылителями, расположенными в центре воздухораспределителя. Очень важна роль кольца охлаждающего воздуха. Отверстия подачи охлаждающего воздуха (которые при необходимости могут быть закрыты) располагаются по периметру крыши камеры или воздухораспределителя и предотвращают образование отложений порошка. Такие отложения приводят к появлению пригорелых частиц в порошке или даже к пожару.

### ***С поршневым воздушным потоком***

Воздух подается в воздухораспределитель радиально с одной стороны и распределяется регулируемыми лопатками, см. рис. 44. Этот тип воздухораспределителей применяется с форсуночными распылителями, для которых желателен ламинарный поршневой поток воздуха. Здесь, как и в воздухораспределителях с вращающимся потоком, также применяется охлаждающий воздух. Поскольку подающий ствол форсунки расположен в потоке горячего воздуха, охлаждающий воздух поступает и в ствол форсунки, чтобы предотвратить избыточный нагрев продукта.

## **Система подачи**

Система подачи, см. рис. 45, соединяет выпарной аппарат с распылительной сушилкой и включает в себя следующее оборудование:

- танки подачи (1)
- танк для воды (2)
- насос концентрата (3)
- система подогрева (4)
- фильтр (5)
- гомогенизатор/насос высокого давления (6)
- подающая линия, включая возвратную линию для безразборной мойки (7).

## **Танки подачи**

Рекомендуется использовать два танка подачи и переключаться между ними не реже чем каждые 4 часа. Это связано с опасностью размножения бактерий в подаваемом продукте, который обычно имеет температуру 45-50 °C. Поэтому, пока один танк эксплуатируется, другой чистится. Объем каждого танка должен обеспечивать 15-30 минут работы сушилки. Танки подачи оборудуются датчиками уровня и форсунками СИП. Иногда вместо танков подачи применяется вакуумная камера,строенная в последнюю нагревательную камеру выпарного аппарата.

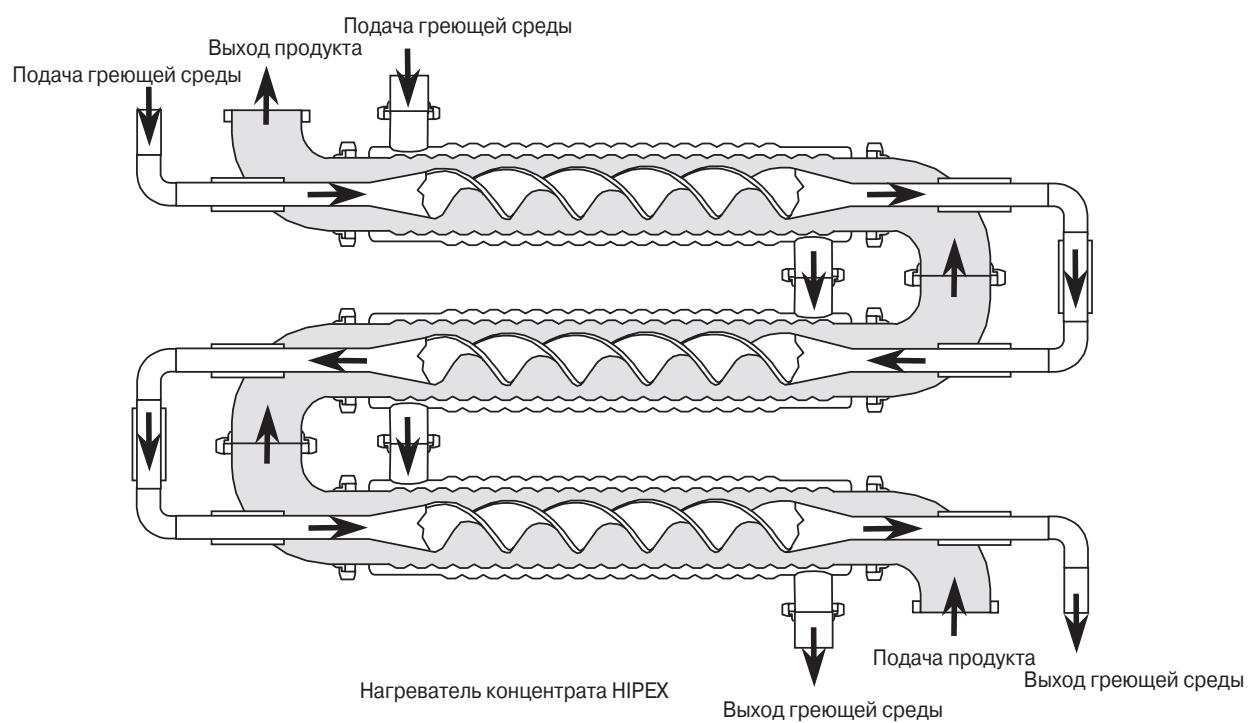


Рис. 46 Теплообменник HIPEX.

## Танк для воды

Танк для воды применяется при пуске и останове установки, а также в том случае, если во время работы сушилки возникнет нехватка концентрата. Танки подачи могут быть оборудованы датчиками уровня, и если к такому танку подводится питающая вода, переключение на подачу воды может выполняться автоматически, что устраняет необходимость в танке для воды.

## Насос концентрата

В случае роторного распылителя для подачи концентрата чаще всего применяется насос объемного типа (шестреничатый или винтовой) или центробежный насос. Насос объемного типа потребляет меньше энергии и может подавать раствор большей вязкости, чем центробежный, но стоит дороже.

## Система подогрева

Форсуночное распыление требует более высокой температуры (меньшей вязкости) продукта, чем на выходе из выпарного аппарата. Подогрев способствует также и роторному распылению. Поэтому рекомендуется использовать подогреватель концентрата. О может быть либо поверхностным, либо контактным.

Возможные поверхностные подогреватели:

- пластинчатый теплообменник
- теплообменник “труба в трубе”
- скребковый теплообменник

### **Пластинчатый теплообменник**

Система с пластинчатым теплообменником дешевле, но если концентрат требуется подогревать до 60-65 °C и содержание сухих веществ составляет 45-46 %, а рабочий период должен длиться 20 часов, нужно использовать два сменных теплообменника, чтобы чистить один из них, пока другой работает. Греющей средой может служить пар, теплая вода или конденсат из первого корпуса выпарного аппарата.

### **Теплообменник “труба в трубе”**

Очень простой и не требующий обслуживания подогреватель упаренного раствора – это теплообменник HIPEX типа “труба в трубе” (см. рис. 46), в котором гофрированные трубы создают турбулентность, которая улучшает теплообмен и снижает загрязнение теплообменных поверхностей. Греющей средой обычно является горячая вода, теплообменник работает в противотоке, причем греющая среда течет по внешней и внутренней трубам, а продукт – по средней трубе. Очень низкая разность температур (< 5 °C) позволяет работать 20 часов без перерыва на мойку.

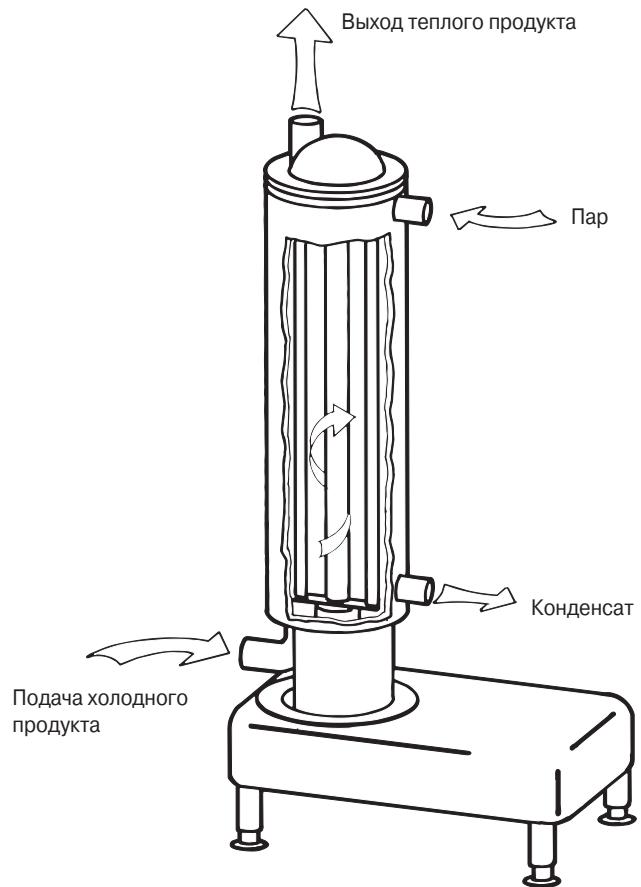


Рис. 47 Скребковый теплообменник.



Гомогенизатор

### ***Скребковый теплообменник***

См. рис. 47. В скребковом теплообменнике быстро вращающийся скребок из синтетического материала, предназначенного для пищевой промышленности, постоянно удаляет с поверхность теплопередачи налипающий продукт, предотвращая его пригорание и снижение теплопередачи. Скребковые теплообменники особенно подходят для продуктов с высоким содержанием сухих веществ. Они могут непрерывно работать в течение 20 часов и очищаются вместе с остальной системой подачи.

Скребковые теплообменники не рекомендуется использовать для обработки содержащих кристаллы продуктов, таких как кристаллизованная сыворотка или пермеат, из-за сильного износа деталей.

Возможные контактные подогреватели:

- с прямой инжекцией пара (ПИП)
- с мягкой инжекцией пара (МИП)

### ***Прямая инжекция пара (ПИП)***

В аппаратах ПИП пар подается в концентрат молока через форсунку, дающую сравнительно большие пузыри, что ведет к излишнему нагреву части концентрата и, следовательно, денатурации белка.

### ***Мягкая инжекция пара (МИП)***

В аппаратах МИП (запатентованных) пар смешивается с концентратом посредством динамической мешалки. При этом образуются очень мелкие пузыри, что исключает излишний нагрев и денатурацию. Следовательно, в них можно использовать пар более высокого давления. Аппараты МИП часто применяются в сочетании с другими теплообменниками, если концентрат требуется нагреть до температуры выше 75 °C.

Подогрев концентрата полезен не только с микробиологической точки зрения. Он также снижает вязкость сырья, что вместе с передачей дополнительного тепла увеличивает производительность распылительной сушилки не менее чем на 4 % и улучшает растворимость порошка.

## ***Фильтр***

В систему подачи всегда встраивается проходной фильтр, чтобы исключить попадание комков и т.п. в распылитель.

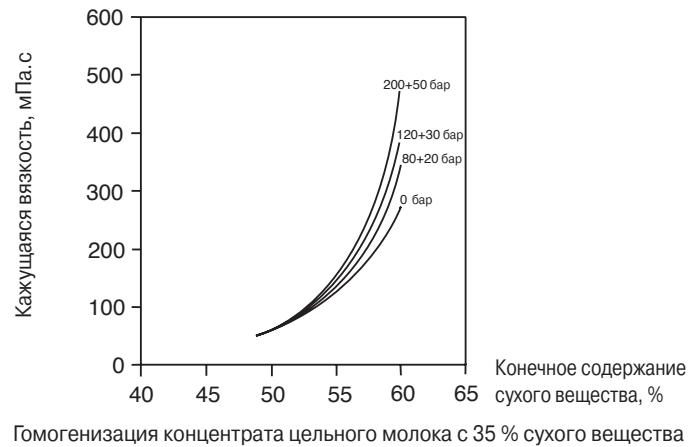
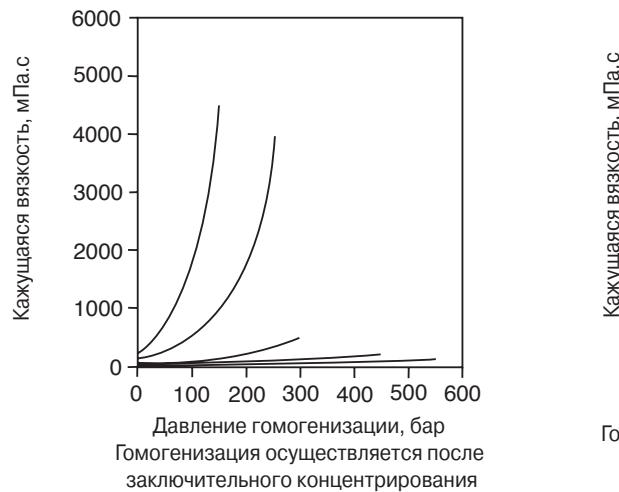


Рис. 47а Вязкость концентрата цельного молока как функция давления гомогенизации и содержания сухого вещества в концентрате.



Система питающих резервуаров

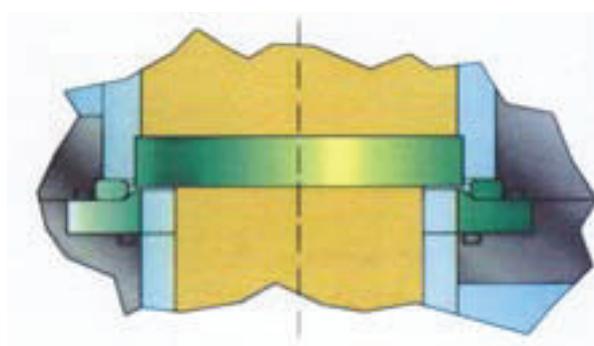


Рис. 47б NanoValve®

## Гомогенизатор/насос высокого давления

При производстве цельного сухого молока или других жирных продуктов рекомендуется встраивать в систему питания гомогенизатор, чтобы уменьшить содержание свободного жира в готовом порошке. Желательно использовать двухступенчатый гомогенизатор. Первая ступень работает при давлении 75-100 бар., а вторая – при 25-50 бар . Обычно гомогенизатор и питающий насос соединяются в один агрегат. При форсуночном распылении требуется более высокое давление (до 250 бар . для форсунок + 150 бар . для гомогенизации), поэтому для экономии средств используется комбинированный гомогенизатор/насос высокого давления. Желательно использовать насос с регулируемым приводом, чтобы управлять расходом продукта и, таким образом, выходной температурой, поскольку частичная циркуляция продукта ведет к неконтролируемому времени выдержки и, следовательно, проблемам с вязкостью. Зависимость вязкости от давления гомогенизации и содержания сухих веществ в концентрате представлена на рис. 47а. Для экономии энергии, хотя и за счет увеличения стоимости, гомогенизатор и насос высокого давления выполняются как отдельные агрегаты, и гомогенизатор оборудуется клапаном NanoValve®, см рис. 47б, что улучшает эффективность гомогенизации при меньшем давлении.

## Подавящая линия

Подавящая линия, конечно, должна быть выполнена из нержавеющей стали и рассчитана на высокое давление, если распыление производится форсунками. Диаметр выбирается так, чтобы скорость потока составляла приблизительно 1,5 м/с. В систему подачи должны быть включены возвратная линия и устройство мойки атомайзера, включая диск, или стволов форсунок, так чтобы обеспечивалась тщательная мойка всего оборудования.

## Распылитель

Распыление концентрата служит для увеличения поверхности испарения. Чем меньше капли, тем больше поверхность, тем легче идет испарение и тем выше тепловой КПД сушилки. Идеальным с точки зрения сушки было бы получение капель одинакового размера, это означало бы одинаковую продолжительность сушки и одинаковую влажность всех частиц. Однако распылители с совершенно равномерным распылением пока не разработаны, хотя современные конструкции обеспечивают высокую степень однородности. С точки зрения насыпной плотности порошка однородное распыление не желательно, так как при этом уменьшается насыпная плотность и, следовательно, возрастает расход упаковочных материалов. Однако современные устройства распыления способствуют и сушке, и увеличению насыпной плотности.

Как уже упоминалось, распределение воздуха и распыление – ключевые факторы, определяющие эффективность распылительной сушки. Распыление непосредственно определяет многие преимущества технологии распылительной сушки. Во-первых, это очень короткое время сушки капель, во-вторых, очень короткое пребывание частиц в горячем воздухе и низкая температура частиц (температура смоченного термометра), наконец, это превращение жидкости в порошок с длительным сроком хранения, готовым к упаковке и транспортировке.

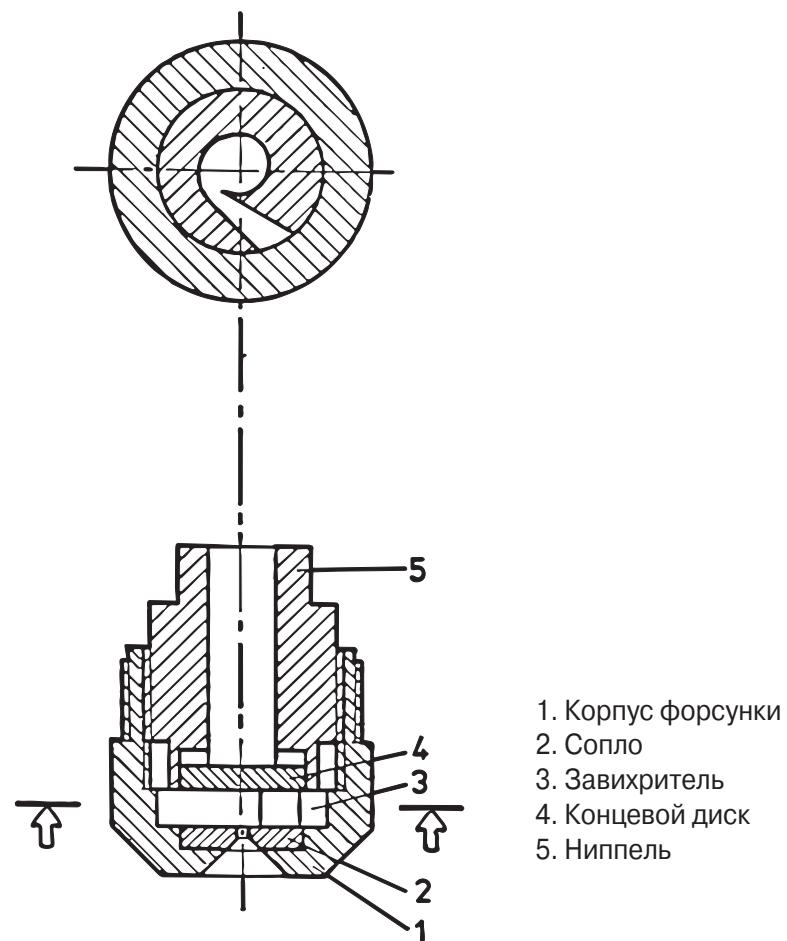


Рис. 48 Форсунка высокого давления “Delavan”.

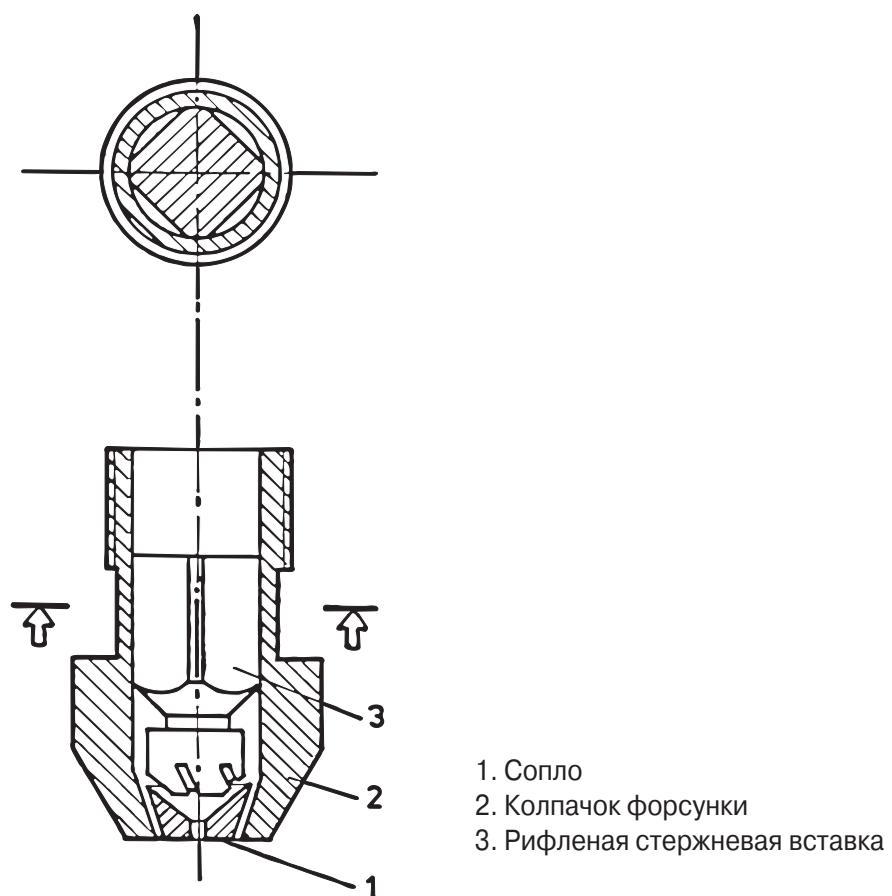


Рис. 49 Форсунка высокого давления “Spraying System”.

Итак, главная функция распыления – это:

- создание высокой поверхности капель для обеспечения высокой производительность по выпаренной влаге;
- создание частиц требуемой формы, размера и плотности.

Для удовлетворения этих требований в распылительных сушилках применяются различные технологии распыления. Однако в большинстве случаев это:

- использование энергии давления в струйных форсунках
- использование кинетической энергии в двойных форсунках;
- использование центробежной силы в роторных распылителях.

Механизм распыления исследовался многими учеными, и хотя первые работы выполнены более 100 лет назад, этот предмет остается весьма спорным, несмотря на множество опубликованных данных.

## Распыление струйными форсунками

Основная функция струйных форсунок – превращать энергию давления, созданного высоконапорным насосом, в кинетическую энергию тонкой пленки жидкости, стабильность которой определяется свойствами жидкости, такими как вязкость, поверхностное натяжение и плотность, ее расходом и средой, в которой эта жидкость распыляется.

Большинство промышленных струйных форсунок (см. рис. 48 и 49) оборудовано завихрителем, который придает жидкости вращение, так что она выходит из второго важнейшего компонента струйной форсунки, сопла, в форме полого конуса. Кроме указанных особенностей конструкции, форму факела распыла определяет рабочее давление. Производительность (расход распыленной воды) можно считать прямопропорциональной квадратному корню из давления:

$$\text{Расход kg/ч} = K \times \sqrt{P} \quad (11)$$

Согласно эмпирическому правилу, чем выше вязкость, плотность жидкости и поверхностное натяжение и чем ниже давление, тем крупнее образующиеся частицы.

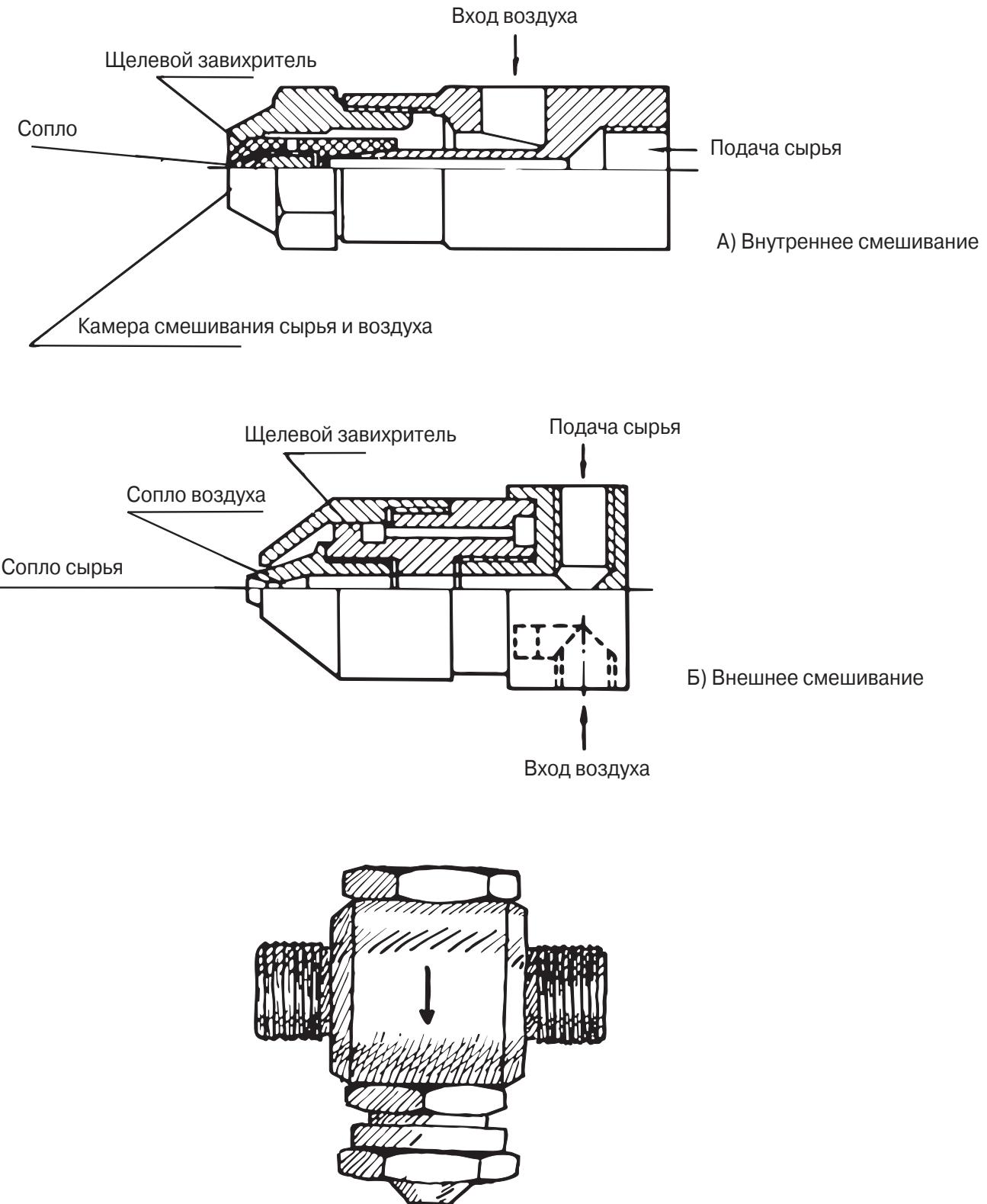


Рис. 50 Пневматическая форсунка.

В литературе встречаются сообщения о многих найденных корреляциях, но приведенную ниже формулу можно использовать с определенной уверенностью.

$$d_s = 157 \left( \frac{\sigma}{P} \right)^{0.5} + 597 \left[ \left( \frac{\mu}{\sigma PL} \right)^{0.45} \times \left( \frac{Q}{K_n \times d_o \left( \frac{P}{PL} \right)^{0.5}} \right)^{1.5} \right] \quad (12)$$

Где:

- $d_s$  = средний объемный диаметр частицы распыленной жидкости, мкм
- $\sigma$  = поверхностное натяжение жидкости, дин/см
- $P$  = давление в форсунке, фунт/кв. дюйм
- $\mu$  = вязкость жидкости, П
- $PL$  = плотность жидкости, г/см<sup>3</sup>
- $Q$  = объемный расход
- $K_n$  = константа форсунки (зависит от угла распыла)
- $d_o$  = диаметр сопла, дюйм

## Распыление двойными форсунками

Энергия, обеспечивающая распыление в двойной форсунке, не зависит от расхода и давления жидкости. Эта (кинетическая) энергия обеспечивается сжатым воздухом. Распыление происходит под действием высокого усилия сдвига между поверхностью жидкости и воздухом, движущимся с высокой, даже сверзвуковой скоростью. Иногда для интенсификации распыления дополнительно используют вращение. См. рис. 50.

Только двойное распыление позволяет распылить жидкость форсунками на очень мелкие капли, особенно в случае высокой вязкости жидкости. Многие ученые пытались найти соотношение между диаметром капли и рабочими условиями и рассчитать средний диаметр капель. Наилучшая из найденных формул:

$$d_s = \frac{1410}{V} \left( \frac{\sigma}{PL} \right)^{0.5} + 191 \left( \frac{\mu}{(\sigma PL)} \right)^{0.45} \times \left( \frac{1000}{J} \right)^{1.5} \quad (13)$$

Где:

- $d_s$  = средний объемный диаметр частицы распыленной жидкости, мкм
- $V$  = скорость воздуха относительно жидкости в сопле форсунки, фут/с
- $\sigma$  = поверхностное натяжение, дин/см
- $PL$  = плотность жидкости, фунт/фут<sup>3</sup>
- $\mu$  = вязкость, сП
- $J$  = соотношение расходов воздуха и жидкости через соответствующие сопла



Роторный распылитель с непосредственным приводом

## Роторное распыление

В роторных распылителях жидкость, постоянно увеличивая скорость, движется к краю диска под действием центробежной силы, вызванной его вращением. Жидкость подается в центр диска, распространяется по его поверхности в виде тонкой пленки и с высокой скоростью стекает с края диска. Степень распыления зависит от окружной скорости, свойств жидкости и расхода.

Диск должен быть сконструирован так, чтобы жидкость приобрела окружную скорость до отрыва от поверхности. Поэтому диски часто имеют лопатки различной формы, предотвращающие скольжение жидкости по его внутренней поверхности. Эти лопатки также направляют жидкость к краю диска, создавая там тонкую пленку, как в двойных форсунках. Вращающийся диск действует как вентилятор, всасывая воздух в концентрат. Количество включаемого в капли воздуха зависит от конструкции диска и свойств жидкости. См. стр. 166.

Несмотря на интенсивное изучение механизма распыления в роторных распылителях, надежно предсказывать характеристики аэрозоля пока не удается. Влияние отдельных переменных установлено только в ограниченном диапазоне, и лишь немногие из установленных зависимостей применимы к высокопроизводительным быстроходным промышленным распылителям. Можно, однако, указать связь размера капли и некоторых свойств продукта и рабочих условий.

### **Расход жидкости**

Размер капли увеличивается с увеличением расхода сырья при постоянной скорости диска (с показателем степени 0,2).

### **Окружная скорость**

Окружная скорость зависит от диаметра и частоты вращения диска и рассчитывается следующим образом:

$$V_p = \frac{\pi \times D \times N}{1000 \times 60} \quad (14)$$

Где:

$V_p$  = окружная скорость, м/с

D = диаметр диска, мм

N = частота вращения, об/мин

Окружная скорость в первую очередь используется для регулирования размера капель. Однако было показано, что размер капель не обязательно остается одинаковым, если та же окружная скорость обеспечивается дисками разной конструкции при разных комбинациях диаметра и частоты вращения, и что при прочих равных условиях диски большего диаметра обычно создают более крупные частицы. Впрочем, выбирая диаметр диска, приходится руководствоваться соображениями надежности распылителя, и различия в особенностях распыления здесь не играют существенной роли. Кроме того, маленькие диски удобнее чистить.



**Вязкость жидкости**

Размер капель непосредственно зависит от вязкости (с показателем степени 0,2), т.е. более вязкое сырье дает более крупные частицы. Поэтому для оптимального распыления обычно стараются по возможности снизить вязкость, чаще всего, нагревая концентрат перед распылением. Распределение размеров капель с увеличением вязкости становится более широким. Этот эффект иногда используют для увеличения насыпной плотности порошка.

Размер среднего размера капель можно выразить следующим уравнением, разработанным для окружной скорости не более 90 м/с. Однако с ней хорошо согласуются и результаты измерений, выполненных при окружных скоростях до 150-160 м/с.

$$D_{vs} = K^1 \times r \times \left( \frac{M}{P_1 N r_2} \right)^{0.6} \times \left( \frac{\mu^1}{M_p} \right)^{0.2} \times \left( \frac{\sigma P^1 n h}{M_p^2} \right) \times n \times h \quad (15)$$

Где:

$D_{vs}$  = средний саутеровский диаметр, фут (для получения среднего объемного диаметра добавьте 15-20 %)

$K^1$  = константа распылителя (0,37-0,40)

$r$  = радиус диска, фут

$M_p$  = массовый расход через весь смоченный край диска, фунт/мин. х фут

$P$  = плотность жидкости, фунт/фут<sup>3</sup>

$N$  = частота вращения распылителя, об/мин

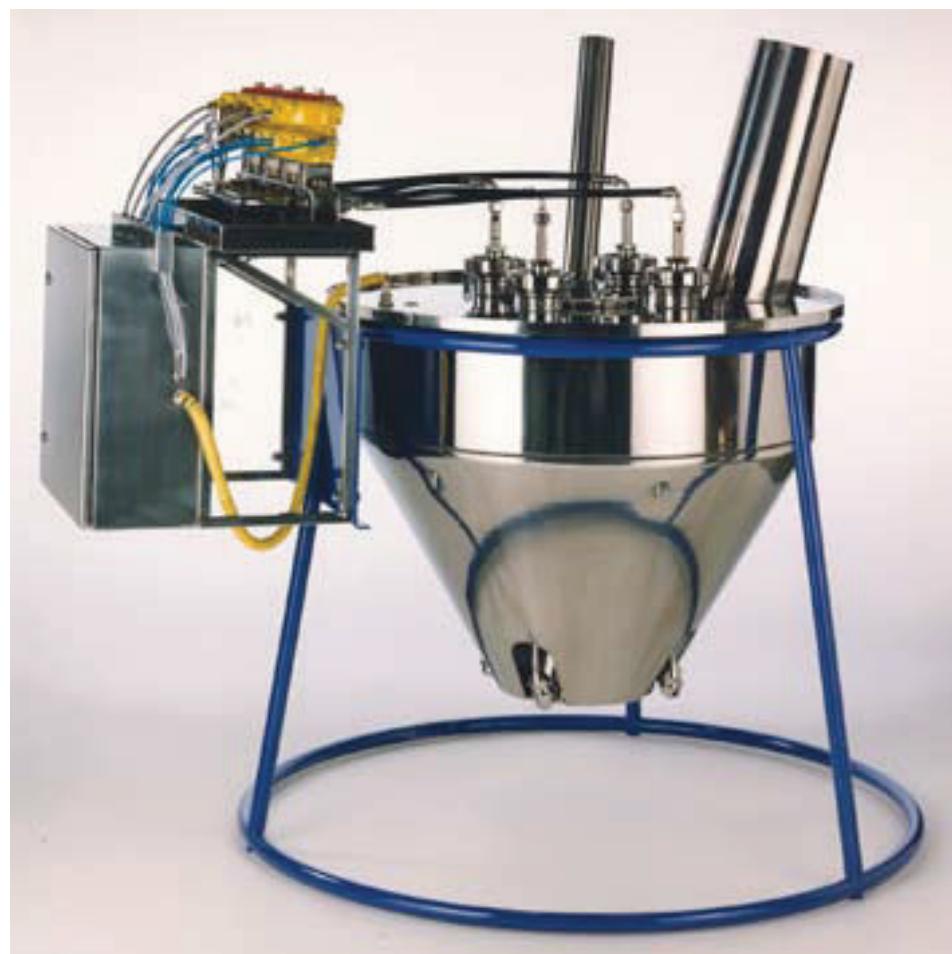
$\mu^1$  = вязкость, фунт/фут х мин.

$\sigma$  = поверхностное натяжение, фунт/мин<sup>2</sup>

$n$  = число лопаток

$H$  = высота лопаток, фут

Указанные формулы, естественно, могут служить лишь для ориентировочной оценки среднего диаметра капель. Они приведены только для того, чтобы дать читателю представление о связи между средним диаметром и различными техническими и технологическими параметрами.



Узел распылителя с пневматическими форсунками и устройством возврата мелочи

# Распыление при распылительной сушке молочных продуктов

В молочной промышленности применяются только

- струйные форсунки
- роторные распылители (атомайзеры)

так как пневматические форсунки требуют слишком большой энергии, в результате получаемый порошок состоит из слишком мелких частиц и поэтому не привлекателен для потребителя.

## *Струйные форсунки*

Струйные форсунки можно разделить на две группы:

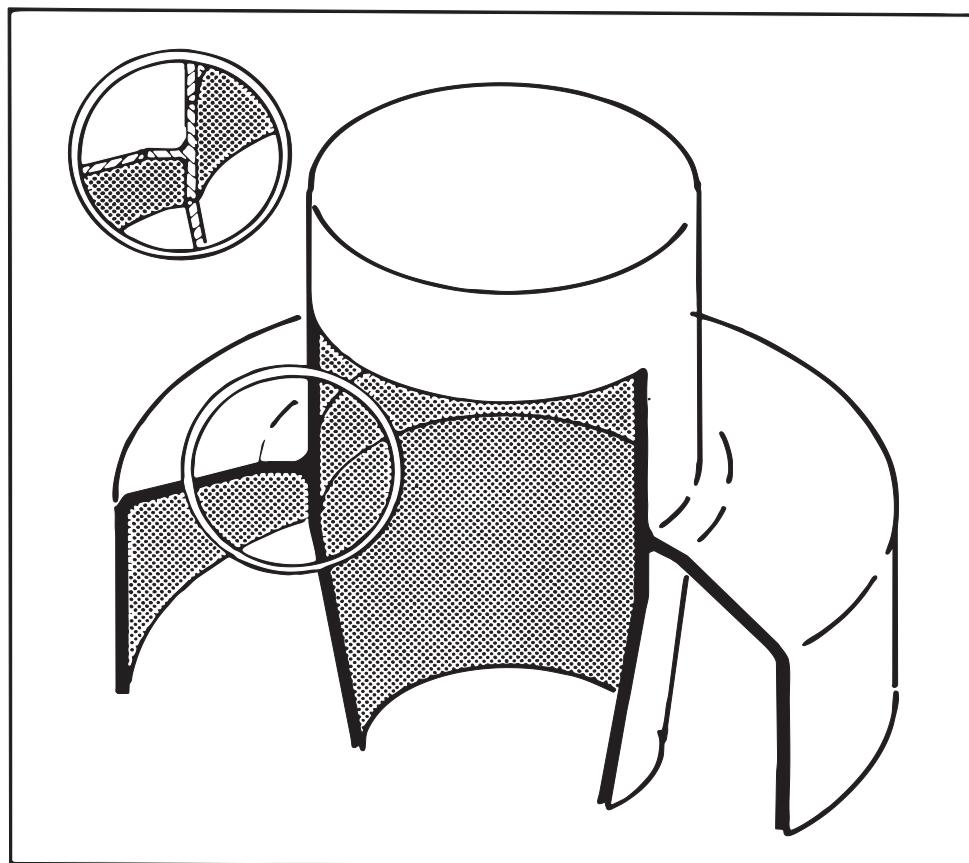
- форсунки высокого давления и низкой производительности
- форсунки низкого давления и высокой производительности

Форсунки высокого давления и низкой производительности в основном применяются в одноступенчатых сушилках с прямоугольными камерами, см. стр. 110, и работают при давлении 300-400 бар. Производительность такой форсунки составляет 50-150 кг концентрата в час, обычно с содержанием сухих веществ не больше 40-42 %, если требуется обеспечить разумную растворимость порошка. Поэтому установка должна оснащаться большим числом форсунок, и все они имеют очень маленький диаметр сопла, т.е. легко засоряются. Обычно порошок имеет высокую насыпную плотность, но легко пылит, так как состоит из очень мелких частиц. Из-за требуемого низкого содержания сухого вещества в сырье сушка обходится дорого.

Форсунки низкого давления и высокой производительности, 1000-1500 кг/ч, все шире применяются с тех пор как разработан процесс двухступенчатой сушки, при котором температура частиц намного ниже. Поэтому содержание сухих веществ можно увеличить до 48 %, а давление снизить (150-200 бар изб.) без ущерба для растворимости, что делает форсуночное распыление привлекательным и с экономической точки зрения.

Преимущества струйных форсунок можно резюмировать следующим образом:

- порошок с малым включением воздуха
- порошок с высокой насыпной плотностью
- улучшенная сыпучесть, особенно для цельного молока
- меньше отложений в камере при сушке трудных для обработки продуктов
- возможность получения крупных частиц
- при двойной системе питания и форсунок сушилка может неделями работать по 24 часа в сутки без остановки, при условии что линия питания и форсунки промываются каждые 20 часов.



Вид циклона в разрезе

Рис. 51 Центральный циклон.

### *Роторный распылитель (атомайзер)*

Роторный распылитель применяется в молочной промышленности многие годы. Его основные достоинства:

- широкий диапазон регулирования производительности
- возможность обработки больших объемов продукта
- возможность обработки концентратов высокой вязкости
- диски различной конструкции позволяют получить порошки с разными характеристиками
- возможность обработки содержащих кристаллы продуктов
- возможность сушки сырья с высоким содержанием сухих веществ, что повышает экономическость.

Поэтому выбор между струйными форсунками и роторным распылителем определяется типом продукта.

Для традиционных молочных продуктов, таких как кристаллизованная сыворотка, предпочтительнее роторный распылитель, а для порошков очень высокой плотности и быстрорастворимого цельного сухого молока и других продуктов с высоким содержанием жира следует использовать форсунки низкого давления и высокой производительности при условии двухступенчатой сушки.

Поскольку невозможно предсказать, какой тип продукта понадобится производить завтра, наблюдается тенденция строительства сушилок, способных работать с обеими системами распылителей.

## **Система сепарирования порошка**

Поскольку воздух на выходе из камеры содержит небольшую долю порошка (10-30 %), частицы порошка необходимо отделить от воздуха – как из экономических соображений, так и во избежание загрязнения среды. Эту фракцию порошка обычно называют “мелочью”, так как в нее попадают самые мелкие частицы.

В качестве отделителей/сепараторов в молочной промышленности чаще всего применяют:

- циклон
- рукавный фильтр
- скруббер
- рукавный фильтр, допускающий безразборную мойку

## **Циклон**

Циклон обладает рядом очевидных преимуществ: высокая эффективность при условии правильной конструкции, простое обслуживание в связи с отсутствием движущихся частей, удобство чистки, если это полностью сварной центрально расположенный циклон, см. рис. 51.

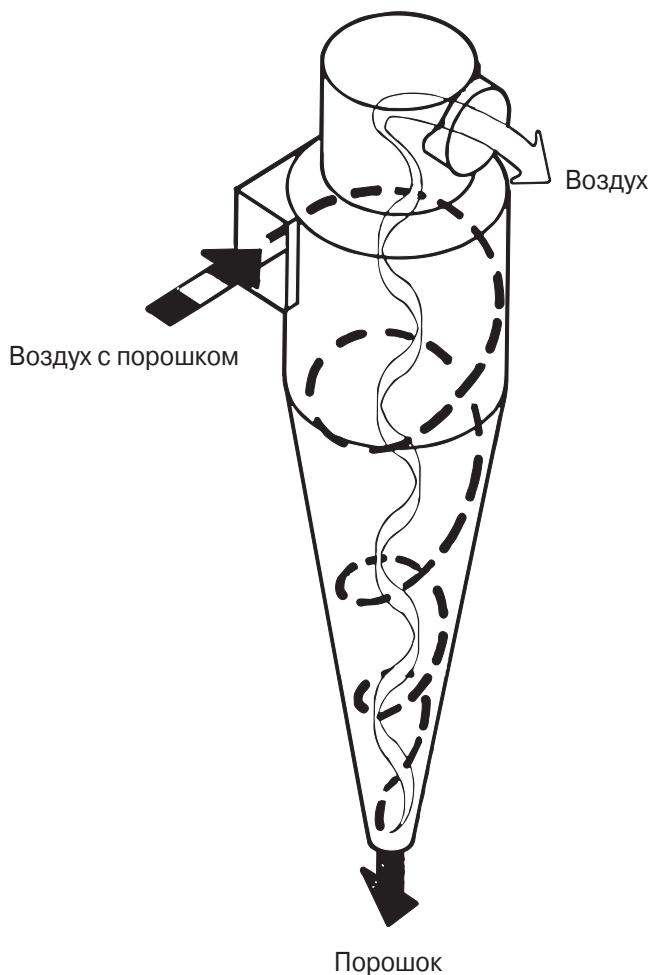


Рис. 52 Циклон.

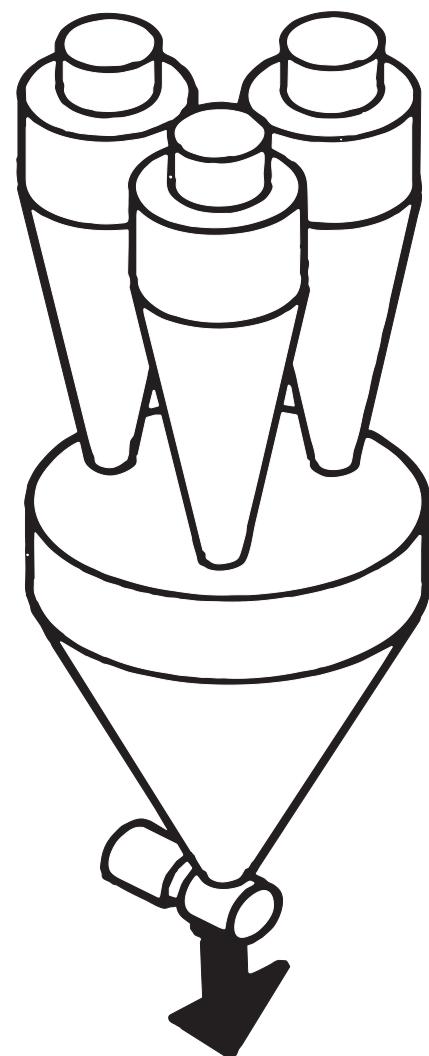


Рис. 53 Батарея циклонов с центральным бункером.



Рис. 54 Секционный затвор с коническим ротором.

Принцип работы основан на вихревом движении, при котором на каждую частицу действует центробежная сила, перемещая ее от оси циклона к внутренней стенке. Однако движение в радиальном направлении является результатом действия двух противоположных сил: центробежная сила перемещает частицу к стенке, а влекущая сила потока – к оси циклона. Поскольку центробежная сила преобладает, происходит сепарация.

Порошок и воздух входят в циклон тангенциальными с равными скоростями. Воздух вместе с порошком движется по спирали к основанию циклона, при этом порошок отделяется, смещаясь к стенке аппарата. Порошок выгружается из нижней части циклона через герметизирующий затвор. Чистый воздух поднимается по спирали вдоль центральной оси циклона и выходит из аппарата сверху. См. рис. 52.

Действующая на каждую частицу центробежная сила рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{m \times V_t^2}{r} \quad (16)$$

Где:

C	=	центробежная сила
m	=	масса частицы
V <sub>t</sub>	=	тангенциальная скорость воздуха
r	=	радиальное расстояние до данной точки

Из этой формулы видно, что чем больше масса частицы, тем выше эффективность циклона. Чем меньшее расстояние должна пройти частица и чем ближе она к стенке, тем выше эффективность, поскольку скорость выше и радиус меньше.

Однако для того чтобы частица достигла стенки циклона, требуется время, т.е. при проектировании циклона требуется предусмотреть достаточное время прохождения воздуха через аппарат.

Из вышеприведенного уравнения видно, что маленькие циклоны (диаметром меньше 1 м) обладают максимальной эффективностью, что является общепринятым фактом.

Однако высокопроизводительные сушилки, работающие в наше время в молочной промышленности, потребовали бы многих циклонов (батареи циклонов). Поскольку каждый циклон требует устройства выгрузки порошка в виде секторного затвора или пневматического либо клапана, это означает большую опасность утечки воздуха, что снижает эффективность циклона. Маленькие циклоны можно соединить с одним центральным бункером, в этом случае понадобится только один клапан, см. рис. 53. Однако это означает, что в случае различного падения давления в циклонах воздух с порошком будет перетекать из одного циклона в другой через нижнее выпускное отверстие. Это уменьшит эффективность и повысит потери порошка. Чистка многочисленных маленьких циклонов представляет проблему, так как отнимает много времени, а множество внутренних углов создает опасность бактериального заражения.

По вышеперечисленным причинам размер циклонов постоянно увеличивается, современные аппараты имеют диаметр 2,5-3 м и обрабатывают 25 000-30 000 кг воздуха в час.

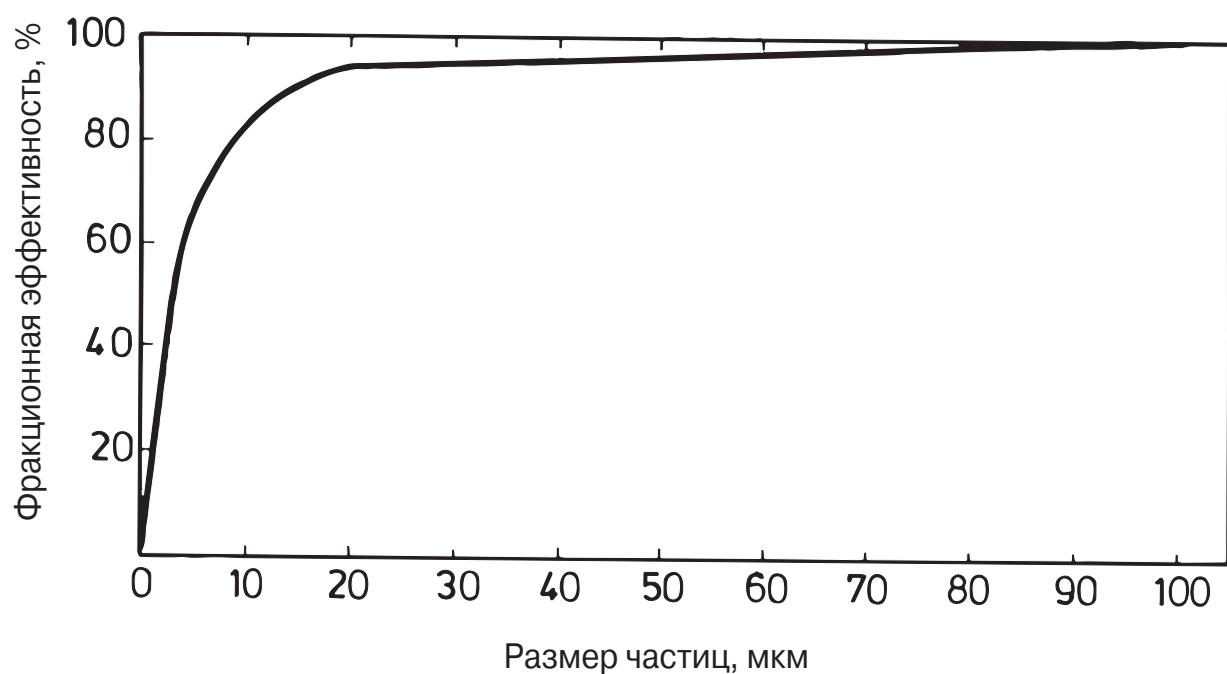
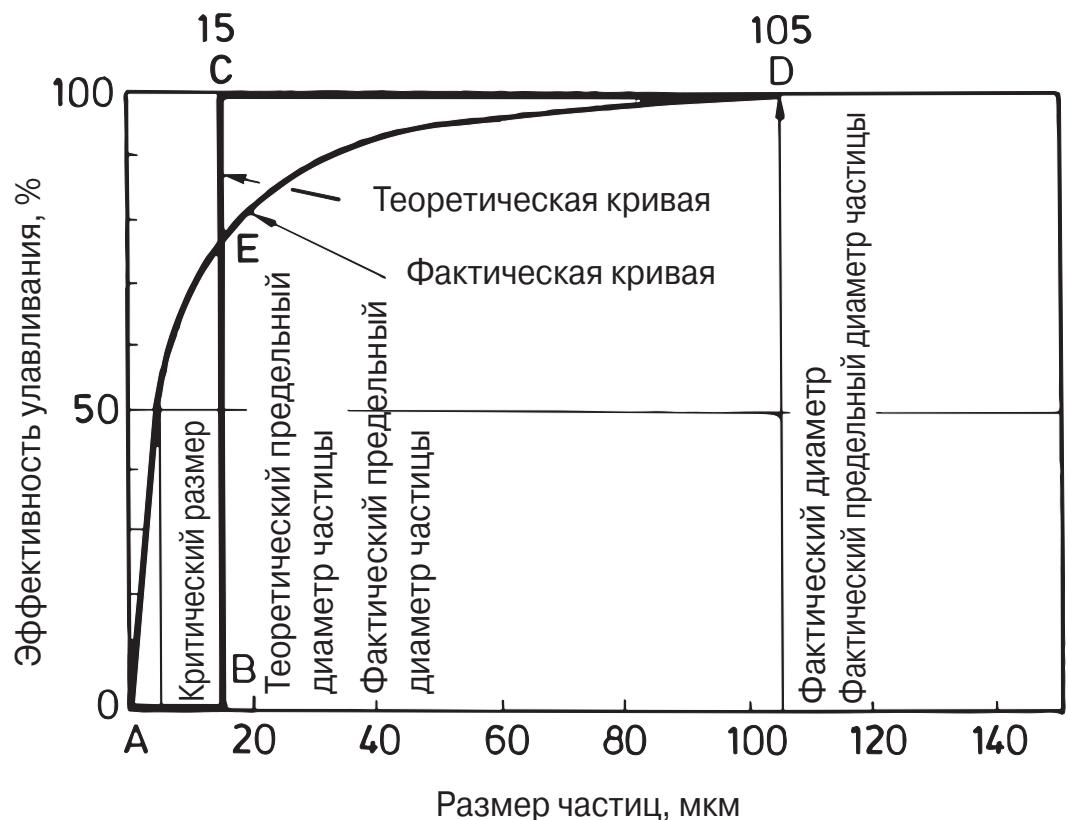


Рис. 55 Критический размер частиц и кривые фракционной эффективности циклона.

При проектировании максимальной эффективности циклона необходимо учесть ряд ключевых параметров. Максимальная эффективность обеспечивается, если

$$\frac{\text{диаметр циклона}}{\text{диаметр выходного канала}} \approx 3$$

$$\frac{\text{высота циклона}}{\text{диаметр выходного канала}} \approx 10$$

Увеличение расхода воздуха (т.е. скорости  $V_1$ ) и перепада давления также повышает эффективность, но одновременно возрастают и затраты энергии, так что, как правило, верхний предел перепада давления для сухого обезжиренного молока составляет 175-200 мм водяного столба. Для сухого цельного молока необходимо ограничиваться перепадом 140-160 мм водяного столба во избежание отложений и засорения циклона.

В качестве герметичного устройства выгрузки, как правило, применяется роторный затвор, и порошок выгружается со дна циклона, как показано на рис. 54. Желательно использовать конический тип затвора, так как он облегчает регулировку зазора между корпусом и ротором и снижает потери порошка.

Эффективность циклона можно характеризовать следующими параметрами:

- a) предельный диаметр частицы
  - б) фактический размер
  - в) общая эффективность циклона
- 
- a) Предельный диаметр частицы определяется как минимальный размер частиц, которые полностью удаляются из воздушного потока (со 100 % эффективностью улавливания). Однако, поскольку невозможно строго определить размер, выше которого улавливается или ниже которого теряется 100 % частиц, предельный диаметр частицы – не очень полезный показатель.
  - б) Фактический размер определяется как размер частиц с 50 % осаждением и является гораздо более ценным показателем эффективности циклонов. Фактический размер определяют по дифференциальным кривым, которые строят, подавая в циклон пылевоздушные смеси с определенным размером частиц. См. рис. 55.
  - в) Общую эффективность циклона находят для продукта определенного гранулометрического состава. Зная фракционную эффективность циклона и гранулометрический состав продукта, можно рассчитать общую эффективность циклона, т.е. сделать прогноз потерь порошка.

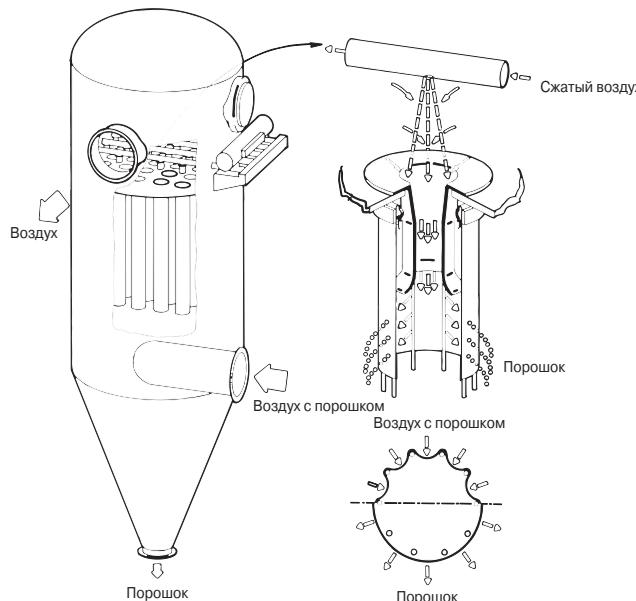


Рис. 56 Рукавный фильтр.

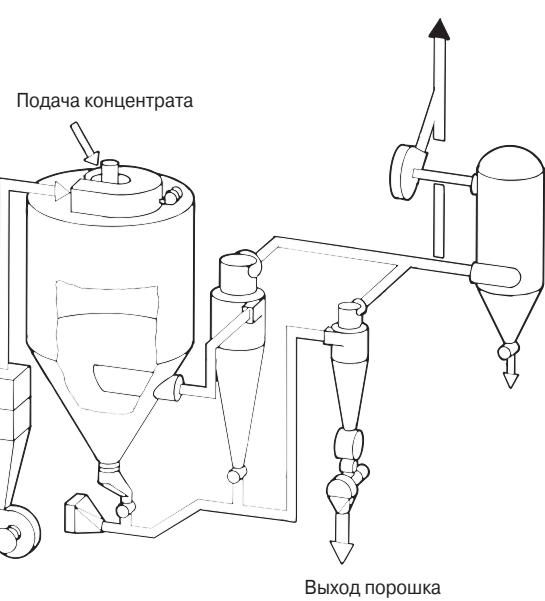


Рис. 57 Распылительная сушилка с рукавным фильтром.



Рукавный фильтр с обводной линией к вытяжному вентилятору

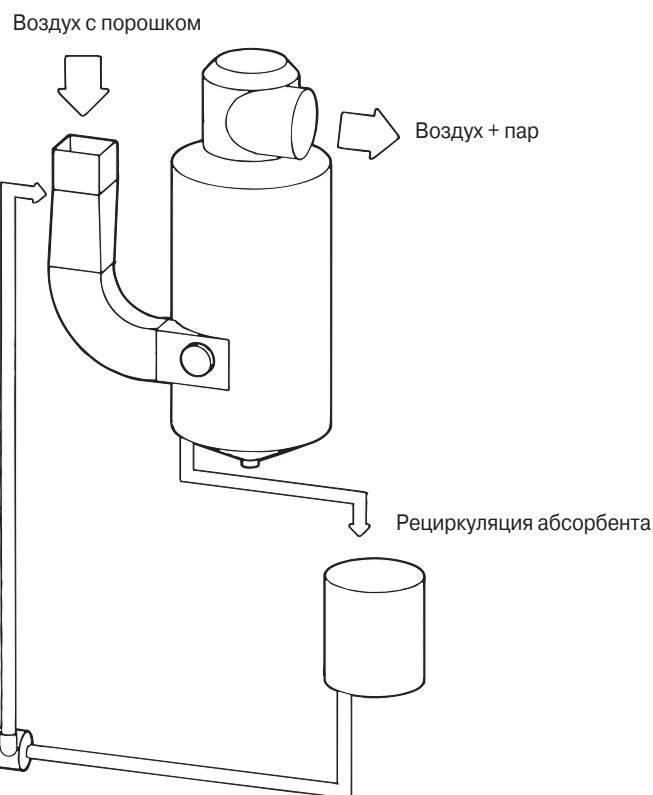


Рис. 58 Скрубер санитарной конструкции.

Другой способ определения эффективности циклона состоит в простом изменении потерь порошка. Очень небольшая часть выходящего из циклона воздуха пропускается через высокоеффективный мини-циклон или через микрофильтр. Количество собранного порошка прямо пропорционально потерям порошка. Основные причины высоких потерь:

- Подача сырья с низким содержанием сухих веществ или с большим содержанием воздуха.
- Высокая температура воздуха на выходе.
- Низкая плотность частиц (например, из-за одной из вышеперечисленных причин).
- Утечка через старый не отрегулированный роторный затвор выгрузки продукта.
- Засорение циклона.
- Изменение параметров сушки, вызвавшее уменьшение среднего размера частиц.
- Старый циклон, помятый в результате сильного обстукивания для удаления отложений.

## Рукавные фильтры

Средние потери порошка в нормальном высокоеффективном циклоне не должны превышать 0,5 % ( $\approx 250 \text{ мг}/\text{м}^3$  при нормальных условиях) в случае распылительной сушки обезжиренного молока. Однако в настоящее время власти пришли к выводу, что 0,5 % - это слишком высокий уровень. С 2007 года согласно требованиям ЕС потери порошка не должны превышать 10  $\text{мг}/\text{м}^3$  при нормальных условиях. Поэтому требуется заключительная очистка воздуха. Обычно она производится рукавными фильтрами, которые состоят из большого числа фильтрующих рукавов, через каждый из которых проходит одинаковое количество воздуха. Воздух проходит через фильтрующий материал внутрь рукава, откуда чистый воздух поступает в выходной коллектор. При правильном выборе фильтрующего материала достигается высокая эффективность очистки, и многие производители сообщают об отделении частиц размером 1 мкм. Собранный порошок автоматически стряхивается подачей сжатого воздуха через использующее эффект Коанда сопло Вентури, расположенное в верхней части каждого рукава. Этот порошок выгружается снизу через роторный затвор. См. рис. 56 и 57.

Рукавный фильтр можно также использовать вместо циклонов – такое решение часто используют в одноступенчатых сушилках для получения сухого сывороточного или яичного белка. Во избежание конденсации, особенно в конической части корпуса фильтра, используется обдув теплым воздухом или ленточный нагреватель.

## Скруббера

Скруббера давно применяются в химической промышленности. В этих аппаратах используется принцип скруббера Вентури. В молочной промышленности они оказались особенно результативными, их эффективность близка к 100 %.

Каплеуловитель работает по широко известному принципу циклона, однако имеет модифицированный выход, который позволяет минимизировать уровень жидкости, т.е. опасность размножения бактерий, и сокращает пенообразование. Тем не менее, при сушке некоторых продуктов требуется использовать антипенные вещества.

Принцип работы скруббера Вентури показан на рис. 58.

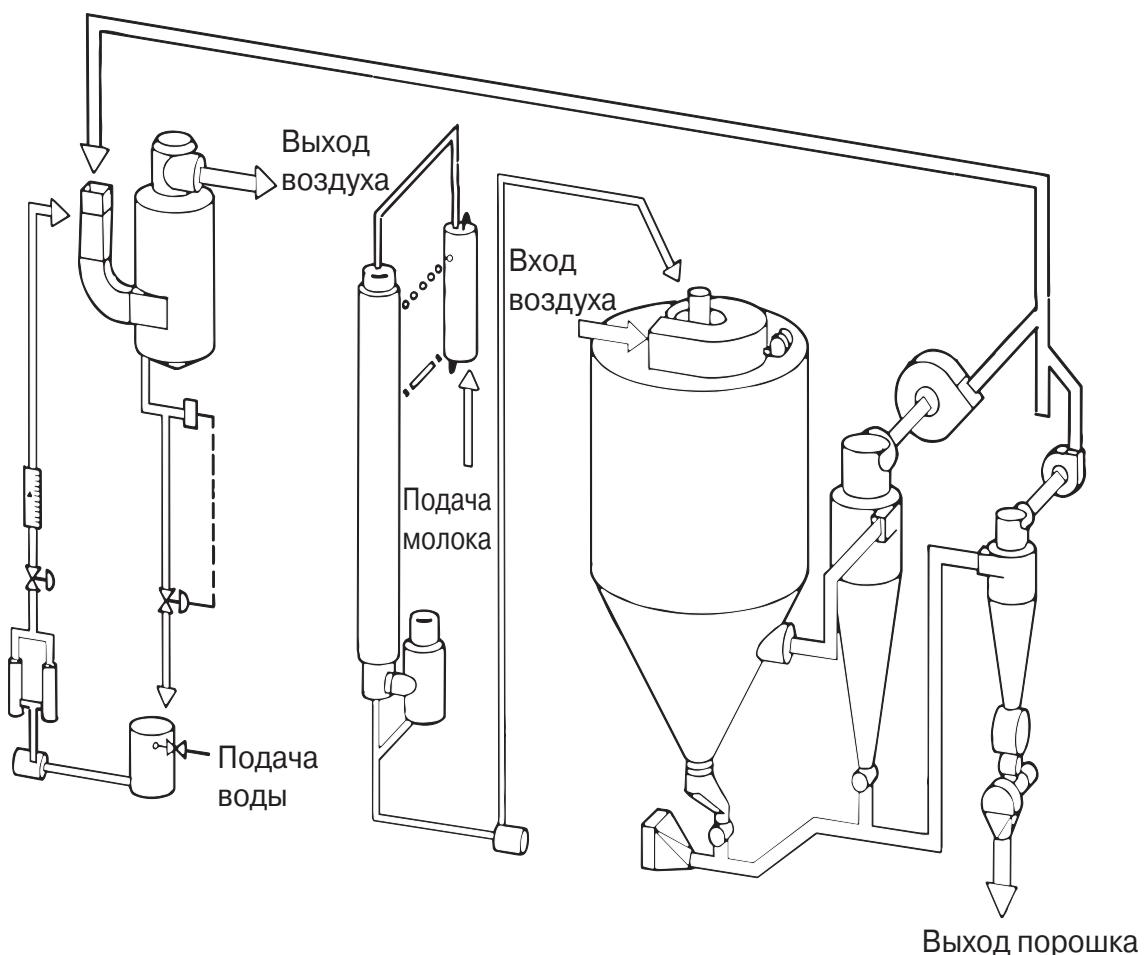


Рис. 59 Скруббер с рециркуляцией воды.

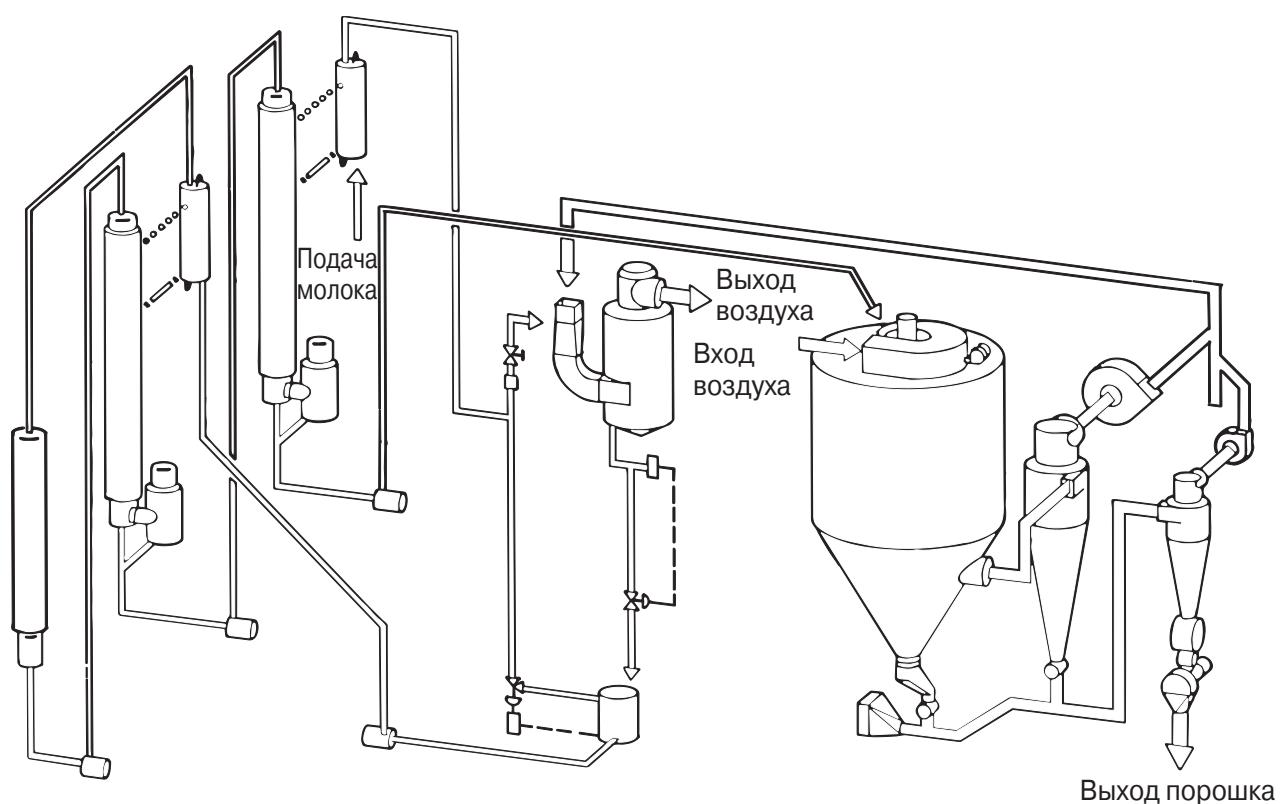


Рис. 59а Скруббер с рециркуляцией молока.

Содержащий частицы порошка воздух из распылительной сушилки разгоняется до высокой скорости во входной трубке Вентури, где в него впрыскивается жидкость через форсунки. В силу различной скорости воздуха с твердыми частицами и капель жидкости они сталкиваются, и порошок растворяется в каплях жидкости. При прохождении через диффузор растворение продолжается и одновременно до некоторой степени восстанавливается давление воздушно-капельной смеси.

Воздух и жидкость разделяются в сепараторе. Воздух выходит из скруббера через центральный канал, а жидкость, имеющая температуру смоченного термометра  $\approx 45^{\circ}\text{C}$ , сливается через нижнее отверстие и подвергается дальнейшей обработке или используется повторно, в зависимости от типа выбранной системы.

Возможны две системы подачи жидкости:

- рециркуляция с водой
- однократный проход с молоком или сывороткой

#### *Рециркуляция с водой*

Согласно вышеописанному принципу работы скруббера вода циркулирует через него под действием центробежного насоса. Расход регулируется клапаном и контролируется расходомером. Уровень воды в сепараторе поддерживается постоянным с помощью бака с регулятором уровня, тем самым компенсируются потери воды на испарение в скруббере. Испарение происходит из-за того, что воздух из сушилки, который обычно имеет температуру  $90\text{--}95^{\circ}\text{C}$  (для одноступенчатой сушилки), охлаждается до температуры смоченного термометра ( $\approx 45^{\circ}\text{C}$ ) за счет испарения воды. См. рис. 59.

Поскольку вода постоянно имеет температуру около  $45^{\circ}\text{C}$ , в ней со временем размножаются бактерии. Даже при том, что в систему добавляется вода для компенсации испарения, через 4-6 часов содержание бактерий возрастает настолько, что вода пригодна только для приготовления кормов.

Однако предварительно рекомендуется пастеризовать и охладить эту воду. Иногда воду упаривают и сушат, но образующийся порошок также применим только для приготовления кормов.

#### *Однократный проход с молоком или сывороткой*

Скруббер может работать с однократным использованием молока или сыворотки в качестве абсорбента, см. рис. 59а. Это особенно выгодно, так как выпариванию теперь будет подвергаться продукт, концентрация которого несколько увеличена. Частицы порошка, абсорбированные из воздуха, также увеличивают содержание сухого вещества в продукте. Холодное молоко подается насосом в систему подогрева выпарного аппарата, как обсуждалось выше. Когда молоко или сыворотка нагреваются в подогревателе до  $45^{\circ}\text{C}$  (температура смоченного термометра), этот продукт проходит через скруббер, где происходит небольшое предварительное концентрирование с одновременной очисткой отработанного воздуха из сушилки. Продукт возвращается в очередной подогреватель выпарного аппарата и пастеризуется перед выпариванием и сушкой.

Выпаривание в скруббере обсуждается на странице 148.

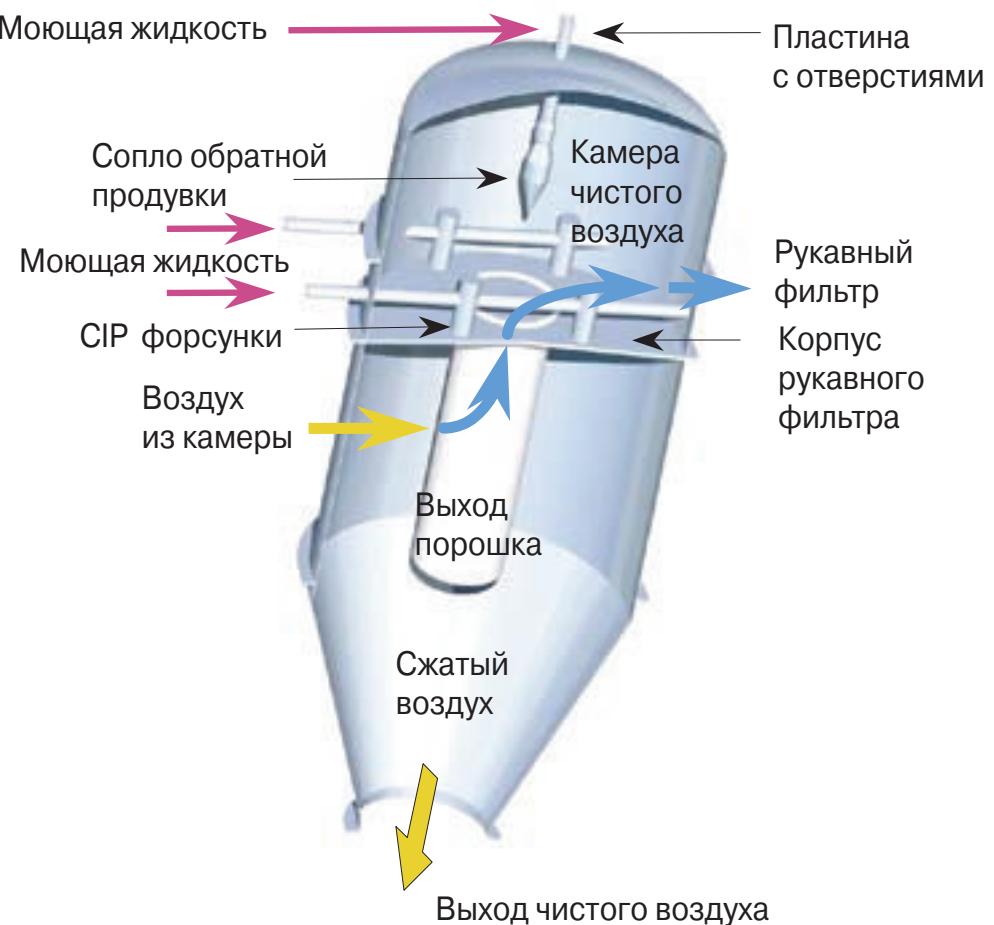


Рис. 60 Рукавный фильтр, допускающий безразборную мойку



Рис. 60а Сопло обратной продувки.

Поскольку температура в скруббере благоприятна для бактерий, можно ожидать их роста. В силу этого однократный проход молока или сыворотки через скруббер не применяется, а приведен только в качестве примера того, как можно повысить общую эффективность сушилки (см. формулу 17 на стр. 120), такой же эффект дает подогрев входного воздуха конденсатором из последних корпусов выпарного аппарата с термокомпрессором (см. стр. 146).

## Рукавный фильтр с СИП

Улавливание порошка из отработанного воздуха распылительных сушилок в молочной и пищевой промышленности до недавнего времени производилось в основном в циклонах, в дополнение к которым применялись скруббера или тканые рукавные фильтры, если это диктовалось строгими требованиями по ограничению выбросов в атмосферу.

Но постоянно ужесточаемые требования в отношении охраны окружающей среды, потребления энергии, уровня шума, эффективности производства и качества продукта привели к разработке новых систем извлечения порошка для пищевой и молочной промышленности. Допускающие безразборную мойку рукавные фильтры SANICIP™ заменяют циклоны и достигли уже такого уровня, который устанавливает стандарты очистки почти для любых сушилок. См. рис. 60.

Рукавные фильтры SANICIP™ - это изготовленные из нержавеющей стали фильтры с обратной продувкой. Рукава размещены в цилиндрическом корпусе, оснащенным спиральным устройством подачи воздуха, верхней камерой чистого воздуха и устройством выгрузки псевдоожженного порошка из нижней конической части корпуса. При работе фильтра продукт собирается на наружной поверхности фильтрующего материала и удаляется с нее струей сжатого воздуха, которая подается в каждый рукав через расположено над ним специальное сопло запатентованной конструкции, см. рис. 60а. Эта струя подсасывает в рукав воздух из камеры чистого воздуха, что снижает расход сжатого воздуха. Это эффективное и гигиеничное техническое решение. Сопло обратной продувки при безразборной мойке выполняет и другую функцию, описанную ниже.

Рукава продуваются по одному или по четыре за раз, что обеспечивает очень равномерную выгрузку порошка и высокий расход воздуха на единицу площади материала. Частота и длительность цикла продувки регулируется соответственно рабочим условиям.

Корпус фильтра цельносварной, и его цилиндрическая часть ниже пластины с отверстиями теплоизолирована. Система подачи воздуха для псевдоожжения порошка в нижней части корпуса решает несколько задач. При работе фильтра этот воздух, во-первых, служит для нагрева конической части корпуса, а во-вторых, для псевдоожжения скопившегося там порошка. Это обеспечивает равномерную выгрузку порошка из корпуса фильтра. При простом фильтре воздух служит только для нагрева конической части. Таким образом, предотвращается конденсация и опасность роста грибков.

Рукава фильтра изготовлены из специального 3-слойного полипропилена. Этот материал допускает мойку 2 % растворами NaOH и HNO<sub>3</sub> при температуре 75 и 60 °C соответственно. Он также разрешен FDA. Материал подвергается тепловой обработке, чтобы его поверхность не связывала пыль. Каждый рукав поддерживается сеткой из нержавеющей стали и легко демонтируется. В обычных рукавных фильтрах и моющихся рукавных фильтрах старой конструкции продувка выполняется посредством установленных в верхней части каждого рукава сопел, использующих эффект Коанда. Это работающая конструкция, но зону вокруг сопел трудно очищать, поэтому там оставляют свободное пространство.



Рукавный фильтр SANICIP™

Безразборная мойка (СИП) рукавного фильтра включает в себя следующие основные операции:

1. Внутренняя мойка рукавов в направлении изнутри наружу (к грязной стороне). Чистая вода впрыскивается внутрь рукава через сопло обратной продувки, где она распыляется сжатым воздухом. Проникший внутрь фильтрующего материала порошок вымывается воздушно-капельной смесью в направлении грязной стороны рукава. Эта вода не рециркулирует. Промывка изнутри – очень важная особенность данной системы, поскольку промывкой снаружи очистить фильтрующий материал очень трудно или невозможно.
2. Камера чистого воздуха над пластиной с отверстиями промывается водой. Эта вода не рециркулирует.
3. Нижняя сторона пластины с отверстиями и зоны крепления рукавов промываются специальными форсунками. Эти форсунки специальной конструкции расположены на нижней стороне пластины с отверстиями между рукавами. В процессе сушки эти форсунки продуваются сжатым воздухом, чтобы исключить отложения порошка на пластине с отверстиями и предотвратить этим обесцвечивание и денатурацию частиц продукта. Эти форсунки имеют двойное назначение, так как во время мойки они омыают наружную поверхность рукавов. При СИП эта часть воды рециркулирует.
4. Мойка корпуса фильтра выполняется стандартными втяжными СИП-форсунками. При СИП мойке эта часть воды рециркулирует.

#### Преимущества фильтра SANICIP™

- Малый перепад давления на фильтре, а значит, и во всей вытяжной системе, снижает потребление энергии и уровень шума.
- Оптимальные расход воздуха и количество порошка на единицу площади материала (поскольку продувается один рукав за один проход).
- Лучшее использование сырья, поскольку в установке не производится продукт второго сорта.
- Спиральное устройство подачи воздуха уменьшает силу столкновения с рукавами. Рукава не встрагиваются, что снижает их износ.
- В зависимости от особенностей здания выпускаются фильтры с 4 или 6 м рукавами.
- Фильтр занимает меньшее пространство.
- При модернизации старых установок фильтр легко заменяет циклоны, не требуя больших строительных работ.
- Система разрешена USDA ЗА.
- Короткое время сушки по сравнению с другими рукавными фильтрами, допускающими безразборную мойку.



Выбор системы дополнительной очистки воздуха после циклонов определяется тем, какой продукт, жидкий или сухой, удобнее утилизировать. Но в любом случае этот продукт не может рассматриваться как первосортный. Поэтому в настоящее время наблюдается тенденция отказа от циклонов и использования моющихся на месте рукавных фильтров.

#### *Сравнение различных сепараторов порошка*

	Циклон	Циклон + ру- кавный фильтр	Циклон + скруббер	SANICIP™
Выбросы	20-400 мг/нм <sup>3</sup>	5-20 мг/нм <sup>3</sup>	не более 20 мг/нм <sup>3</sup>	5-20 мг/нм <sup>3</sup>
Потери давле- ния в вытяжной системе (включая трубы и пр.)	280 мм вод. ст.	340 мм вод. ст.	340 мм вод. ст.	170 мм вод. ст.
Вспомогательные средства	нет	сжатый воздух	система цир- куляции жид- кости	сжатый воздух
Мойка	безразборная мойка	затруднена	безразборная мойка	безразборная мойка
Обработка гиг- роскопичных продуктов	возможна	затруднена	возможна	возможна *)
Использование отделенного про- дукта	первый сорт	первый и вто- рой сорт	не рекоменду- ется	первый сорт
Техническое об- служивание	минимальное	обслуживание системы сжатия воздуха и смена рукавов	минимальное	обслуживание системы сжа- тия воздуха и смена рукавов
Санитарные ус- ловия	хорошие	сравнительно хорошие	чуть хуже	хорошие

\*) Если влажность выходящего воздуха слишком велика, возможно образование пермеата.

## **Система пневмотранспорта и охлаждения**

Система пневмотранспорта служит для перемещения порошка. Транспортирующей средой служит воздух, количество которого определяется свойствами продукта. Продукты с высоким содержанием жира требуют большего расхода воздуха (5 объемов порошка), чем обезжиренное молоко (4 объема порошка). Однако не рекомендуется транспортировать порошок, содержащий более 30 % жира, так как это может привести к засорению каналов и циклона.

Для транспортировки можно использовать воздух любой температуры, и температура порошка, естественно, становится такой же, как у воздуха. Если применить горячий воздух, произойдет сушка продукта. Этот эффект, однако, слабо выражен, так как время контакта мало (скорость воздуха 20 м/с), а вода прочно связана с белками.

Подача порошка

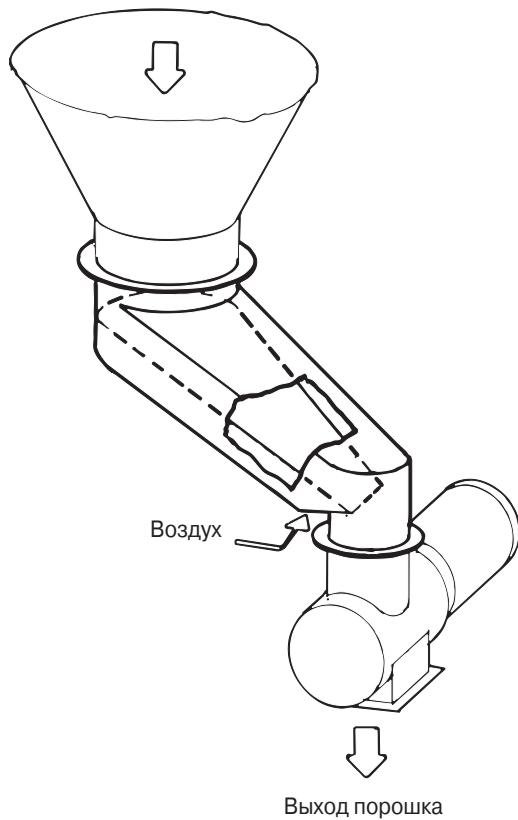


Рис. 61 Пневмоконвейер для предварительного охлаждения порошка.

Концентрат

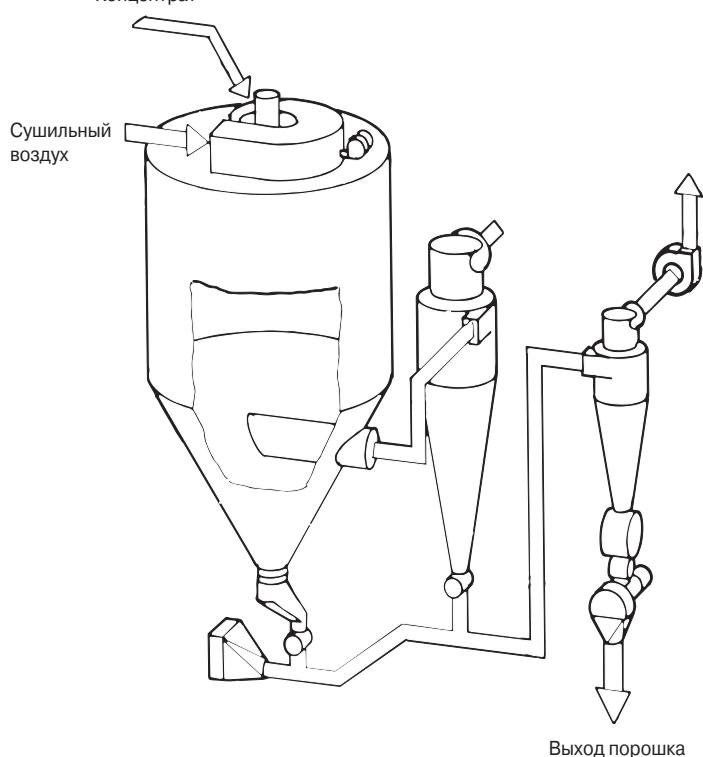


Рис. 62 Пневмотранспортная система.

Система пневмотранспорта обычно применяется в одноступенчатых распылительных сушках традиционной конструкции. Забираемый из окружающей среды воздух выполняет двойную функцию – транспортирует и охлаждает порошок. Для полного использования преимуществ охлаждения рекомендуется установить затвор между выходной камерой и каналом, который предотвратит попадание в транспортную систему теплого влажного воздуха. Обычно для этого применяется роторный затвор. Следует также избегать пульсаций потока порошка в результате падения отложений со стенок. Это можно сделать, используя пневмоконвейер с перфорированной пластиной, через которую подается холодный воздух. Одновременно это обеспечит охлаждение. См. рис. 61.

Канал пневмотранспорта проходит через выход основных циклонов и собирает выгружаемый оттуда порошок. Поток воздуха с частицами порошка поступает в циклон, где частицы отделяются от воздуха. В основании этого циклона порошок просеивается, после чего он готов к упаковке в мешки. См. рис. 62.

Если в силу климатических условий атмосферный воздух не обеспечивает охлаждения (из-за его высокой температуры или влажности), транспортирующий воздух можно охлаждать ледяной водой, имеющей температуру 1-2 °C. Температура, до которой требуется охлаждать воздух, зависит от продукта и внешних условий, но обычно близка к 8 °C. Из воздуха будет конденсироваться влага, поэтому необходимо предусмотреть секцию отвода конденсата. Обычно для этой цели воздух пропускают через лабиринт. Воздух, выходящий из этого устройства, не содержит капель, но его относительная влажность равна 100 %. Во избежание дальнейшей конденсации и образования капель, которые впитываются порошком и увеличивают его влажность, воздух нагревается до 15-20 °C, так что относительная влажность снижается.

Для расчета потребного количества ледяной воды используется IX диаграмма, учитывающая энтальпию воздуха при любых условиях.

Воздух можно также охлаждать в теплообменниках непосредственного охлаждения (использованием хладагента).

Пневмотранспортная система дешева и способна перемещать много порошка, но она полностью предотвращает агломерацию, что приводит к получению порошка высокой насыпной плотности. Для порошков, содержащих агломераты (быстро растворимое сухое молоко, см. стр. 185), пневмотранспортная система не применима.

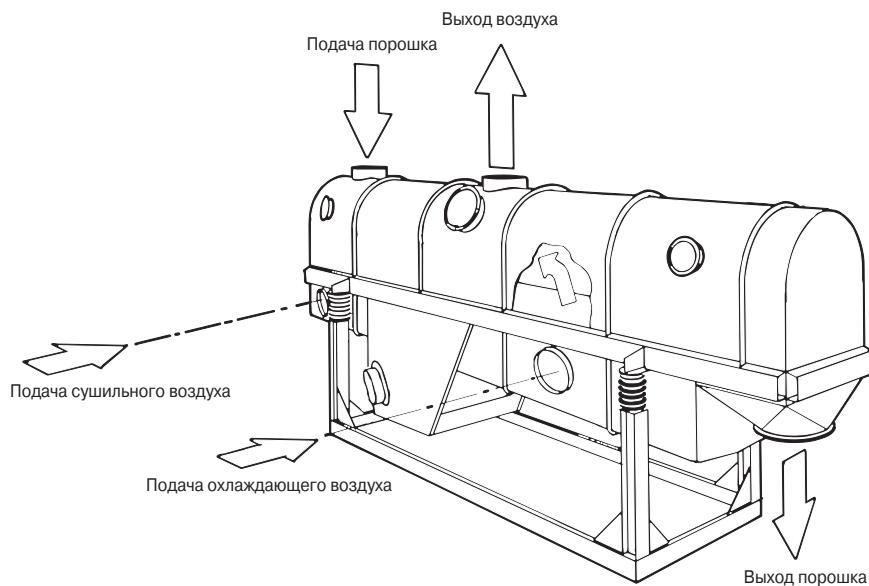


Рис. 63 Vibro-Fluidizer

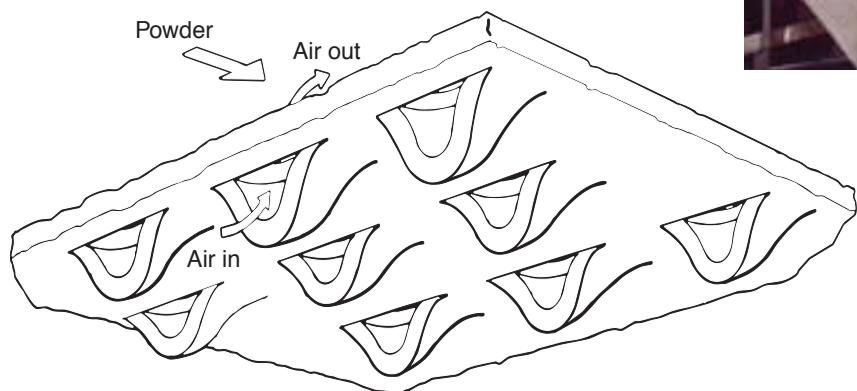


Рис. 64 Перфорированная пластина BUBBLE PLATE™.



## Двухступенчатая сушка и охлаждение в псевдоожиженном слое

Для повышения экономичности сушки этот процесс делится на две ступени. Первая про- текает в камере распылительной сушки, где жидкость превращается в частицы порошка и испаряется большая часть воды. Как будет обсуждаться ниже, см. стр. 119, испарение влаги из частиц идет тем труднее и требует тем большего времени, чем ближе остаточная влажность к 0 %.

Вторая ступень сушки выполняется в псевдоожиженном слое, см. рис. 63. Сушка в псев- доожиженном слое идет очень успешно, поскольку время пребывания в слое достаточно велико, чтобы влага из центра частицы достигла поверхности, где происходит испарение.

Воздух подается в ожидаемый слой порошка через специальную перфорированную платину, BUBBLE PLATE™, см. рис. 64. Пластина BUBBLE PLATE™ обладает следующими особенностями:

- Воздух направляется вниз, к поверхности пластины.
- Пластина имеет редкие но большие отверстия.
- Уникальный способ изготовления предотвращает образование трещин.
- Пластина очень хорошо освобождается от порошка.

Слой может быть виброкипящим, см. стр. 126, или газовым псевдоожиженным, см. стр. 131. Одновременно такие аппараты позволяют очень эффективно и бережно охлаждать содержащие жир или агломерированные продукты.

## Контрольно-измерительные приборы и автоматика

Для управления процессом сушки и регистрации рабочих параметров установка оснаща- ется контрольно-измерительными приборами и средствами автоматики. Система состоит из устанавливаемого по месту оборудования и программируемого логического контрол- лера (ПЛК) с монитором, который помещают в диспетчерской, отчасти, чтобы ПЛК находился в сухой атмосфере, но также и для того, чтобы операторы работали в помещении с пониженным уровнем шума.

Измерительные приборы современной распылительной сушилки, см. рис. 65, должны контролировать все существенные параметры процесса, включая температуру сушильного воздуха на входе в основную камеру и в аппараты псевдоожиженного слоя, а также темпе- ратуру воздуха на выходе. Все температуры регистрируются принтером, так что оператор может следить за развитием процесса или установить причину, по которой полученный порошок оказался низкого качества. Требуется также счетчик часов работы распылителя или высоконапорного насоса. Амперметр позволяет контролировать нагрузку, а по счет- чику часов работы можно определить время смены масла. Если распыление выполняется форсунками, необходим манометр для контроля давления сырья. Для управления давлени- ем в камере, которая обычно работает при разряжении 5-10 мм водяного столба, требуются преобразователи частоты для регулирования нагнетательного и вытяжного вентиляторов. Ими, конечно, можно управлять вручную, но в большинстве случаев управление выполня- ется автоматически. Это позволяет автоматически пускать и останавливать установку.



Рис. 65 Диспетчерская

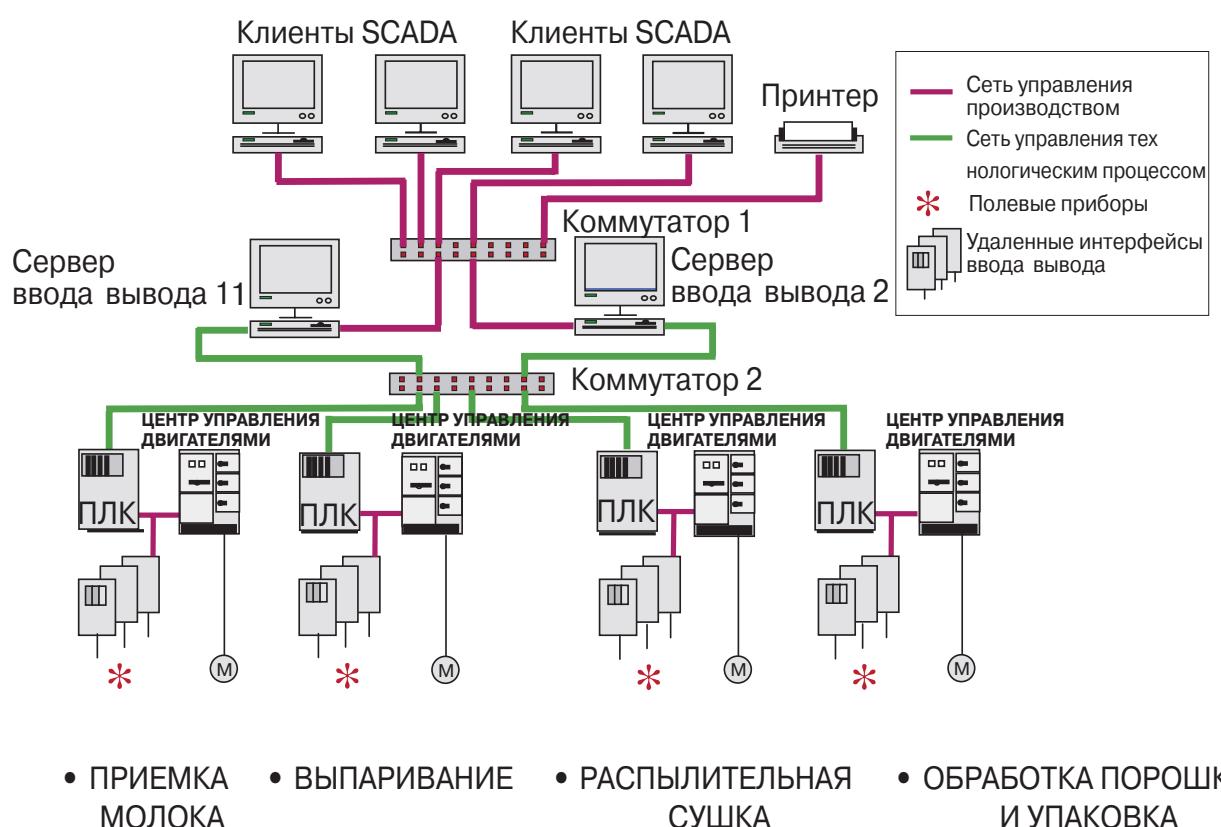


Рис. 66 Структурная схема системы управления

Температуру на входе можно регулировать либо давлением пара, либо подачей мазута. Температура на выходе обязательно должна поддерживаться автоматически, чтобы обеспечить постоянную остаточную влажность порошка. Если сырье распыляется роторным распылителем, температура на выходе регулируется изменением оборотов питающего насоса. Другая система, которая применяется не часто и только с форсуночными распылителями, состоит в поддержании постоянной температуры воздуха на выходе при постоянной скорости подачи сырья в распылитель посредством изменения температуры воздуха на входе.

Если распыление осуществляется форсунками, температура на выходе может поддерживаться постоянной путем изменения оборотов высоконапорного насоса. Это, естественно, приведет к изменению давления в форсунках и, следовательно, гранулометрического состава порошка. Однако при правильном подборе форсунок эти изменения могут быть незначительными.

Но сушильная установка это не только распылительная форсунка. Это еще и выпарной аппарат. Поскольку содержание сухого вещества в исходном молоке варьирует, а после некоторого периода работы трубы загрязняются (в них образуется микропленка отложений, изменяющая коэффициент K), производительность выпарного аппарата и выход концентрата не могут оставаться постоянными. Этому, конечно, можно противодействовать, вручную регулируя работу выпарного аппарата или распылительной сушилки, но данный процесс можно автоматизировать. Наиболее распространенное решение состоит в устраниении питающих резервуаров, функции которых принимает на себя последний корпус выпарного аппарата или специальная вакуумная камера. В нагревательной камере последнего корпуса выпарного аппарата устанавливаются датчики уровня. Уровень в выпарном аппарате поддерживается изменением расхода сырья или давления острого пара в термокомпрессоре.

Разработка ПЛК привела в последние годы к созданию систем управления, привлекательных и по цене, и по эффективности регулирования. ПЛК имеет много преимуществ и при применении в традиционных, сравнительно простых системах управления, состоящих из отдельных регуляторов, каждый из которых поддерживает заданное значение определенного параметра относительно к другим параметрам, что может сильно повлиять на поддержание заданных значений. См. рис. 66.

Это означает, что квалификация оператора меньше сказывается на работе установки и, следовательно, качестве продукции, что позволяет точнее соблюдать технические условия.

ПЛК также является идеальным средством пуска и останова всей установки. Это исключает непроизводительнуютрату времени. Кроме того, ПЛК управляет работой клапанов и насосов в циклах безразборной мойки установки.

ПЛК значительно облегчает регистрацию данных. Для любых выбранных параметров можно рассчитывать средние значения, строить кривые истории процесса (например, с часовым интервалом) и отображать их на мониторе и на бумаге.

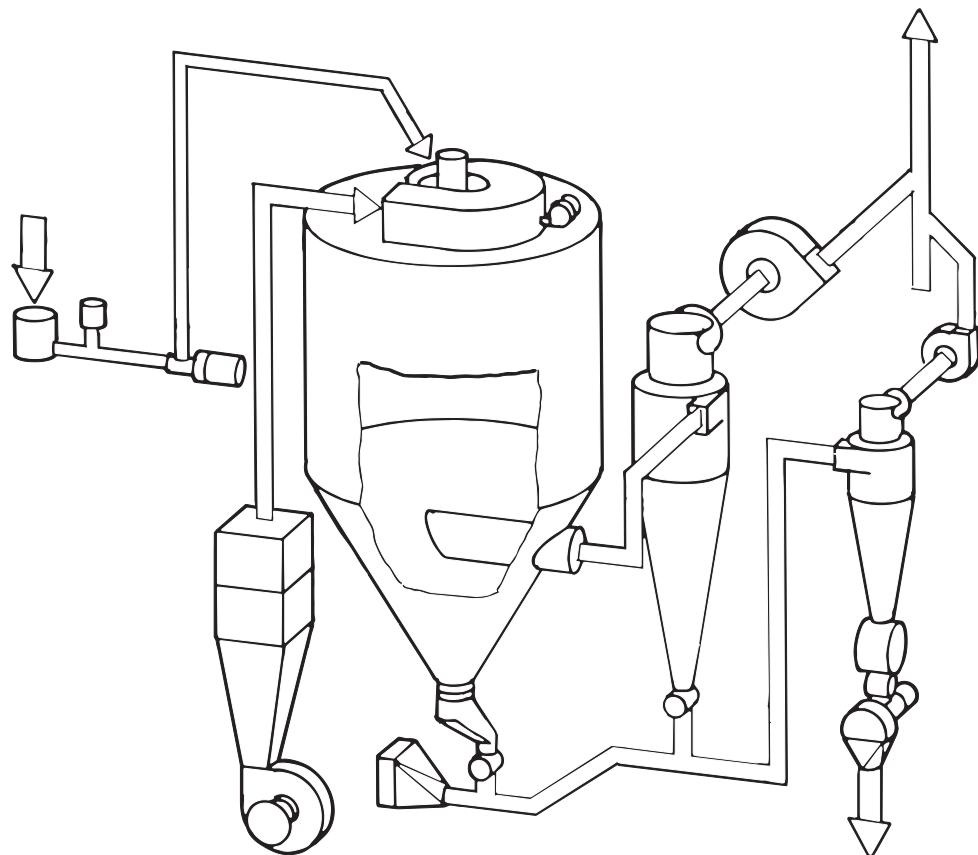


Рис. 67 Распылительная сушилка традиционной конструкции с пневмотранспортной системой (SDP).

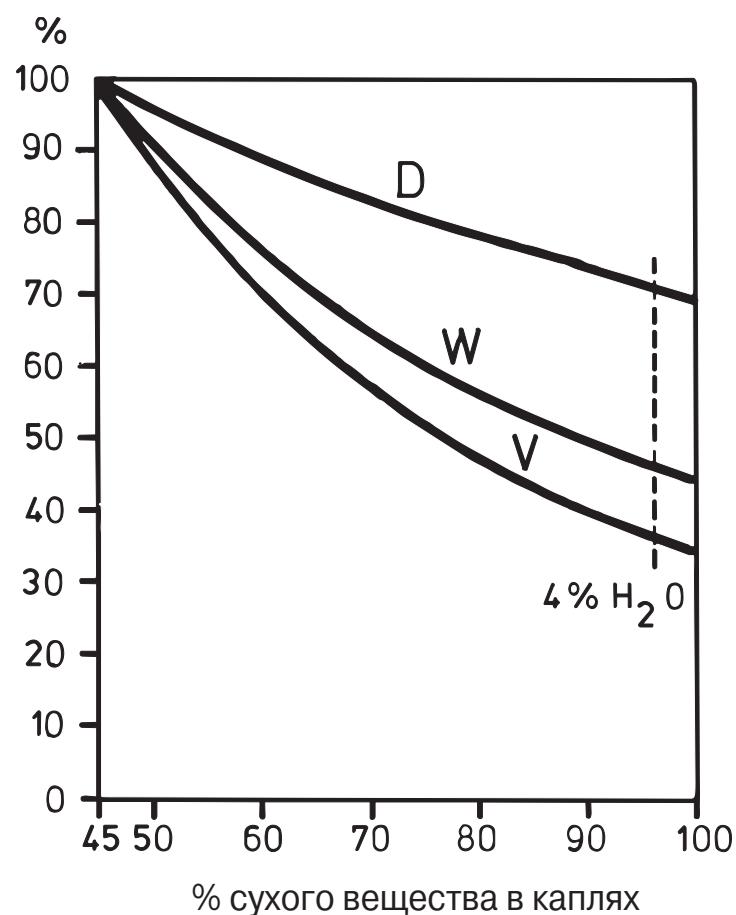


Рис. 68 Уменьшение массы, объема и диаметра капли при идеальных условиях сушки.

# Технология производства сухого молока

Распылительная сушка оказалась наиболее подходящей технологией удаления остатков воды из упаренного продукта, так как позволяет превратить концентрат молока в порошок, сохраняя ценные свойства молока.

Принцип действия всех распылительных сушилок состоит в превращении концентрата в мелкие капли, которые подаются в быстрый поток горячего воздуха. В силу очень большой поверхности капель (1 л концентрата распыляется на  $1,5 \times 10^{10}$  капель диаметром 50 мкм с общей поверхностью 120 м<sup>2</sup>) испарение воды происходит практически мгновенно, и капли превращаются в частицы порошка.

## Одноступенчатая сушка

Одноступенчатая сушка – это процесс распылительной сушки, при котором продукт высушивается до конечной остаточной влажности в камере распылительной сушилки, см. рис. 67. Теория образования капель и испарения в первом периоде сушки одинакова и для одноступенчатой и для двухступенчатой сушки и излагается здесь.

Начальная скорость капель, срывающихся с роторного распылителя, приблизительно равна 150 м/с. Основной процесс сушки протекает, пока капля тормозится под действием трения о воздух. Капли диаметром 100 мкм имеют путь торможения 1 м, а капли диаметром 10 мкм – только несколько сантиметров. Основное снижение температуры сушильного воздуха, вызванное испарением воды из концентрата, происходит в этот период. Гигантский тепло- и массообмен происходит между частицами и окружающим воздухом за очень короткое время, поэтому качество продукта может сильно пострадать, если оставить без внимания те факторы, которые способствуют ухудшению продукта.

При удалении воды из капель происходит значительное уменьшение массы, объема и диаметра частицы. При идеальных условиях сушки масса капли из роторного распылителя уменьшается приблизительно на 50 %, объем – на 40 %, а диаметр – на 75 %. См. рис. 68.

Однако идеальная техника создания капель и сушки пока не разработана. Какое-то количество воздуха всегда включается в концентрат при его перекачивании из выпарного аппарата и особенно при подаче концентрата в питающий резервуар из-за разбрызгивания. Но и при распылении концентрата роторным распылителем в продукт включается много воздуха, так как диск распылителя действует как вентилятор и подсасывает воздух. Включению воздуха в концентрат можно противодействовать, используя диски специальной конструкции. На диске с загнутыми лопатками (так называемом диске высокой насыпной плотности), см. рис. 69, воздух под действием все той же центробежной силы частично отделяется от концентрата, а в диске, омываемом паром, см. рис. 70, проблема частично решается тем, что вместо контакта жидкость-воздух здесь существует контакт жидкость-пар. Считается, что при распылении форсунками воздух не включается в концентрат или включается в очень малой степени. Однако оказалось, что некоторое количество воздуха включается в концентрат на ранней стадии распыления вне и внутри факела распыла из-за трения жидкости о воздух еще до образования капель. Чем выше производительность форсунки (кг/ч), тем больше воздуха попадает в концентрат.



Рис. 69 Диск с загнутыми лопатками для производства порошка с высокой насыпной плотностью.

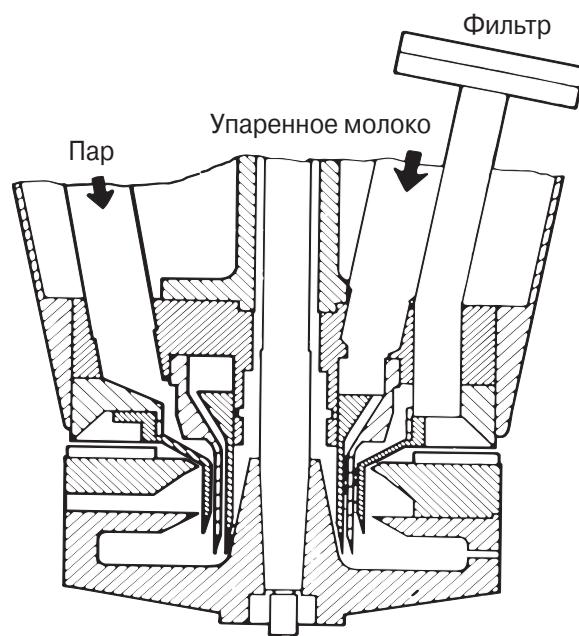


Рис. 70 Диск с обдувом паром.

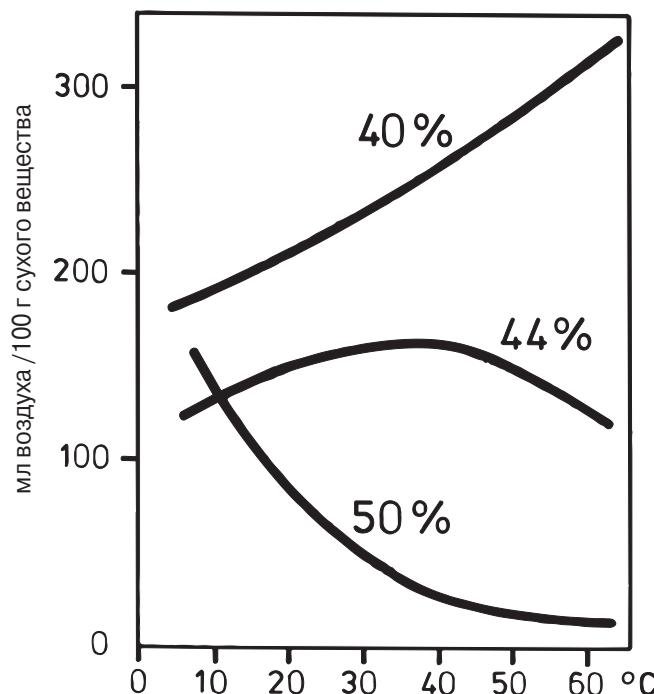


Рис. 71 Пенообразующая способность концентрата обезжиренного молока.

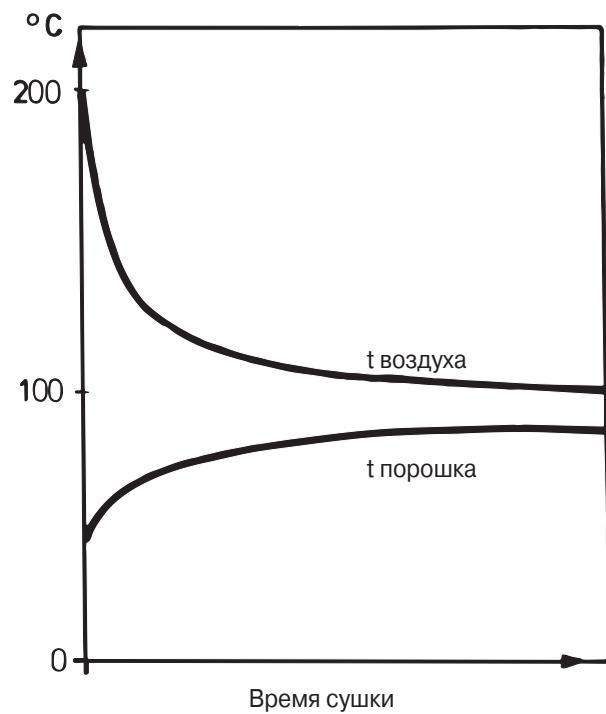


Рис. 72 Изменение температуры.

Способность концентрата включать в себя воздух (т.е. пенообразующая способность) зависит от его состава, температуры и содержания сухого вещества. Оказалось, что концентрат с низким содержанием сухих веществ имеет значительную пенообразующую способность, которая возрастает с температурой. Концентрат с высоким содержанием сухих веществ пенится значительно слабее, что особенно проявляется с возрастанием температуры, см. рис. 71. Вообще говоря, концентрат цельного молока пенится слабее, чем концентрат обезжиренного молока. Определение содержания воздуха в концентрате описано на стр. 185.

Таким образом, содержание воздуха в каплях (в форме микроскопических пузырьков) в значительной мере определяет уменьшение объема капли при сушке. Другой, еще более важный фактор, это температура окружающего воздуха. Как уже отмечалось, между сушильным воздухом и каплей происходит интенсивный обмен теплом и водяным паром. Поэтому вокруг частицы создается градиент температуры и концентрации, так что весь процесс становится сложным и не вполне ясным. Капли чистой воды (активность воды 100 %) при контакте с воздухом, имеющим высокую температуру, испаряются, сохраняя до самого конца испарения температуру смоченного термометра. С другой стороны, продукты, содержащие сухое вещество, при предельной сушке (т.е. при приближении активности воды к нулю) нагреваются к концу сушки до температуры окружающего воздуха, что применительно к распылительной сушилке означает температуру воздуха на выходе. См. рис. 72.

Поэтому градиент концентрации существует не только от центра к поверхности, но и между точками поверхности, в результате разные участки поверхности имеют разную температуру. Общий градиент тем больше, чем больше диаметр частицы, так как это означает меньшую относительную поверхность. Поэтому мелкие частицы высыхают более равномерно.

При сушке содержание сухих веществ, естественно, увеличивается из-за удаления воды, при этом увеличивается и вязкость, и поверхностное натяжение. Это означает, что коэффициент диффузии, т.е. время и зона диффузионного переноса воды и пара, становится меньше, и из-за замедления скорости испарения происходит перегрев. В предельных случаях происходит так называемое поверхностное твердение, т.е. образование на поверхности жесткой корки, через которую вода и пар или абсорбированный воздух диффундируют очень медленно. В случае поверхностного твердения остаточная влажность частицы составляет 10-30 %, на этой стадии белки, особенно казеин, очень чувствительны к нагреву и легко денатурируют, в результате образуется трудно растворимый порошок. Кроме того, аморфная лактоза становится твердой и почти непроницаемой для водяных паров, так что температура частицы возрастает еще больше, когда скорость испарения, т.е. коэффициент диффузии, приближается к нулю.

Поскольку внутри частицы остаются водяной пар и пузырьки воздуха, они перегреваются, и если температура окружающего воздуха достаточно высока, пар и воздух расширяются. Давление в частице возрастает, и она раздувается в шар с гладкой поверхностью, см. рис. 73. Такая частица содержит множество вакуолей, см. рис. 74. Если температура окружающего воздуха достаточно высока, частица может даже взорваться, но если этого и не произойдет, частица все равно имеет очень тонкую корку, около 1 мкм, и не выдержит механической обработки в циклоне или в системе транспортировки, так что она покинет сушилку с выбросным воздухом. См. рис. 75.



Рис. 73 Типичная частица после одноступенчатой сушки.

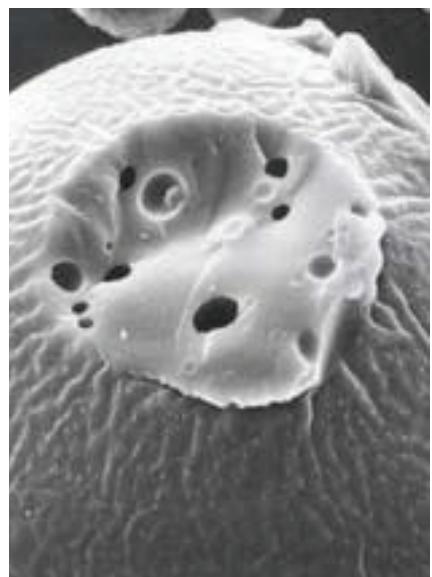


Рис. 74 Частица после распылительной сушки. Одноступенчатая сушка.

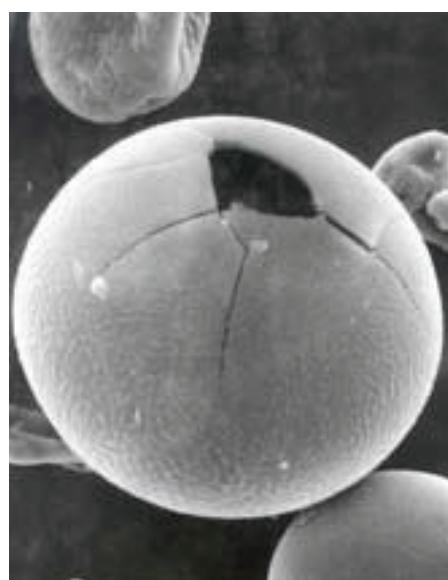


Рис. 75 Перегретая частица. Одноступенчатая сушка.

Если в частице мало пузырьков воздуха, то расширение даже при перегреве не будет слишком сильным. Однако перегрев в результате поверхностного твердения ухудшает качество казеина, что снижает растворимость порошка.

Если окружающая температура, т.е. температура на выходе из сушилки, поддерживается низкой, то низкой будет и температура частицы.

Температура на выходе определяется многими факторами, главные из которых:

- содержание влаги в готовом порошке
- температура и влажность сушильного воздуха
- содержание сухих веществ в концентрате
- распыление
- вязкость концентрата

#### ***Содержание влаги в готовом порошке***

Первый и важнейший фактор – это содержание влаги в готовом порошке. Чем ниже должна быть остаточная влажность, тем меньше требуемая относительная влажность воздуха на выходе, а это означает более высокую температуру воздуха и частиц.

#### ***Температура и влажность сушильного воздуха***

Содержание влаги в порошке напрямую связано с влажностью воздуха на выходе, и увеличение подачи воздуха в камеру приведет к чуть большему увеличению расхода выходящего воздуха, так как из-за усиленного испарения в воздухе будет присутствовать больше влаги. Большую роль играет также содержание влаги в сушильном воздухе, и если оно велико, необходимо повысить температуру воздуха на выходе, чтобы компенсировать добавочную влагу.

#### ***Содержание сухих веществ в концентрате***

Увеличение содержания сухих веществ потребует более высокой температуры на выходе, т.к. испарение идет медленнее (средний коэффициент диффузии меньше) и требует большей разности температур (движущей силы) между частицей и окружающим воздухом.

#### ***Распыление***

Улучшение распыления и создание более тонкодисперсного аэрозоля позволяет снизить температуру на выходе, т.к. относительная поверхность частиц увеличивается. Из-за этого испарение протекает легче, и движущая сила может быть уменьшена.

#### ***Вязкость концентрата***

Распыление зависит от вязкости. Вязкость возрастает с увеличением содержания белков, кристаллической лактозы и общего содержания сухих веществ. Нагрев концентрата (не забудьте о загустевании при старении) и увеличение скорости диска распылителя или давления форсунки позволяет решить эту проблему.



Общий КПД сушки выражается следующей приближенной формулой:

$$\zeta = \frac{T_i - T_o}{T_i - T_a} \quad (17)$$

где:

- $T_i$  = температура воздуха на входе
- $T_o$  = температура воздуха на выходе
- $T_a$  = температура окружающего воздуха

Очевидно, что для повышения эффективности распылительной сушки нужно либо увеличить температуру окружающего воздуха, т.е. подогревать отбираемый воздух (см. стр. 250), например, конденсатом из выпарного аппарата, либо увеличить температуру воздуха на входе, либо понизить температуру на выходе.

Зависимость  $\zeta$  от температуры служит хорошим показателем эффективности работы сушилки, поскольку температура на выходе определяется остаточной влажностью продукта, которая должна соответствовать определенному стандарту. Высокая температура на выходе означает, что сушильный воздух используется не оптимально, например, из-за плохого распыления, плохого распределения воздуха, высокой вязкости и т.д.

У нормальной распылительной сушилки, обрабатывающей обезжиренное молоко ( $T_i = 200^{\circ}\text{C}$ ,  $T_o = 95^{\circ}\text{C}$ ),  $\zeta \approx 0,56$ .

Обсуждавшаяся до сих пор технология сушки относилась к установке с системой пневмотранспорта и охлаждения, в которой выгружаемый со дна камеры продукт высущен до требуемого содержания влаги. На этой стадии порошок теплый и состоит из слипшихся частиц, очень слабо связанных в большие рыхлые агломераты, образовавшиеся при первичной агломерации в факеле распыла, где частицы разного диаметра обладают разной скоростью и поэтому сталкиваются. Однако при прохождении через систему пневмотранспорта агломераты подвергаются механическому воздействию и рассыпаются на отдельные частицы. Этот тип порошка, см. рис. 76, можно охарактеризовать следующим образом:

- отдельные частицы
- высокая насыпная плотность
- пыление, если это сухое обезжиренное молоко
- не быстрорастворимый

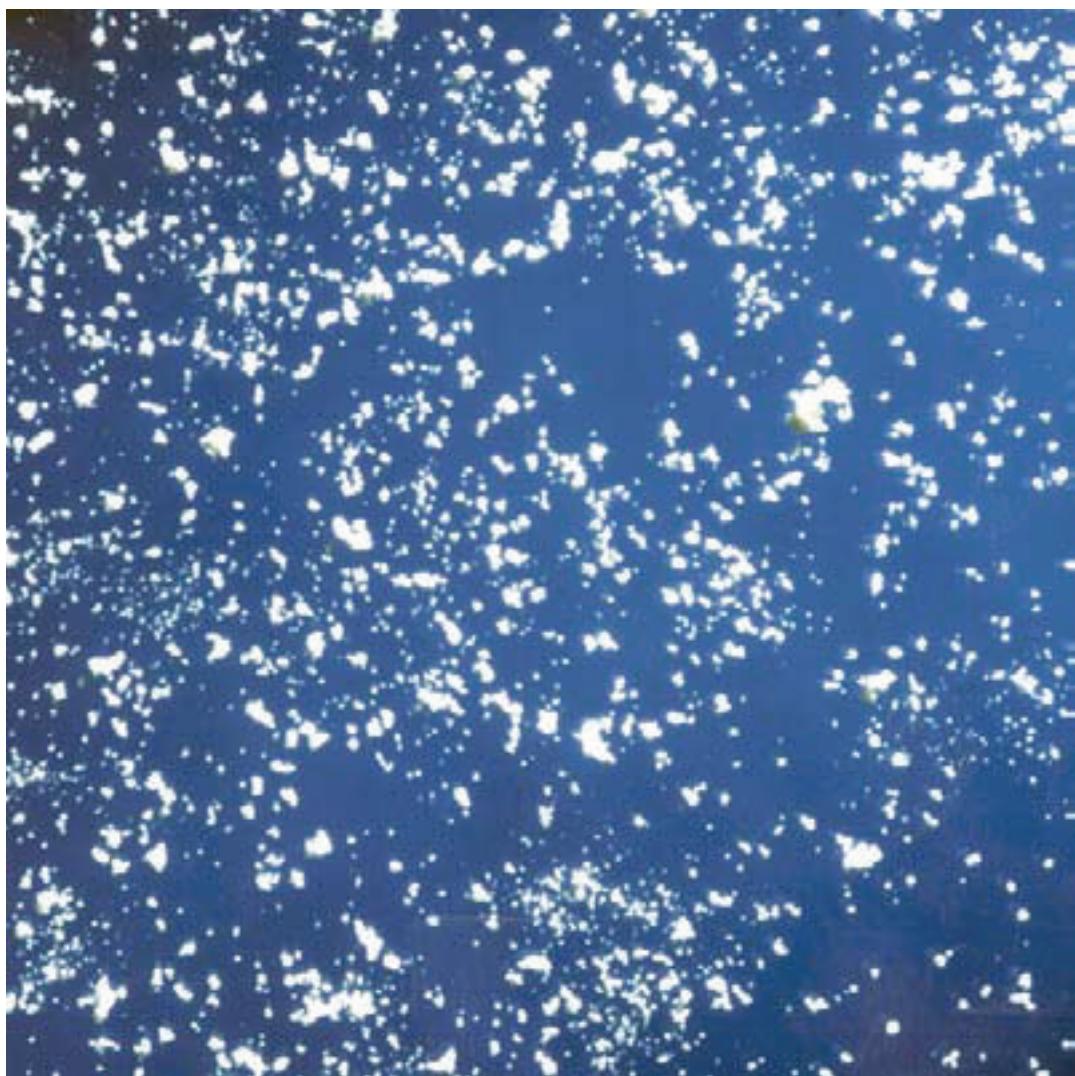


Рис. 76 Микрофотография сухого обезжиренного молока из установки с пневмотранспортной системой.

## Двухступенчатая сушка

Как уже отмечалось, температура частицы определяется температурой окружающего воздуха (температурой на выходе). Поскольку связанная влага трудно удаляется традиционной сушкой, температура на выходе должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить движущую силу ( $\Delta t$ , т.е. разность температур между частицей и воздухом), способную удалить остаточную влагу. Очень часто это ухудшает качество частиц, как обсуждалось выше.

Поэтому не удивительно, что была разработана совершенно иная технология сушки, предназначенная для испарения из таких частиц последних 2-10 % влаги.

Поскольку испарение на этой стадии из-за низкого коэффициента диффузии идет очень медленно, оборудование для досушивания должно быть таким, чтобы порошок оставался в нем длительное время. Такую сушку можно проводить в пневмотранспортной системе, используя горячий транспортирующий воздух для увеличения движущей силы процесса. Однако, поскольку скорость в транспортном канале должна быть  $\approx 20$  м/с, для эффективной сушки потребуется канал значительной длины. Другая система, это так называемая “горячая камера” с тангенциальным входом для увеличения времени выдержки. По завершении сушки порошок отделяется в циклоне и поступает в другую пневмотранспортную систему с холодным или осушенным воздухом, где порошок охлаждается. После отделения в циклоне порошок готов к упаковке в мешки.

Другая система досушки – это аппарат VIBRO-FLUIDIZER®, т.е. большая горизонтальная камера, разделенная приваренной к корпусу перфорированной пластиной на верхнюю и нижнюю секции. См. рис. 77. Для сушки и последующего охлаждения в распределительные камеры аппарата подается теплый и холодный воздух и равномерно распределяется по рабочей зоне специальной перфорированной пластиной, BUBBLE PLATE™. Это дает следующие преимущества.

- Воздух направляется вниз, к поверхности пластины, поэтому частицы движутся по пластине, которая имеет редкие, но большие отверстия и поэтому может долго работать без чистки. Кроме того, она очень хорошо освобождается от порошка. См. рис. 77а.
- Уникальный способ изготовления предотвращает образование трещин. Поэтому BUBBLE PLATE™ отвечает строгим санитарным требованиям и разрешена USDA.

Размер и форма отверстий и расход воздуха определяются скоростью воздуха, необходимой для псевдоожижения порошка, которая в свою очередь определяется свойствами порошка, такими как содержание влаги и термопластичность.

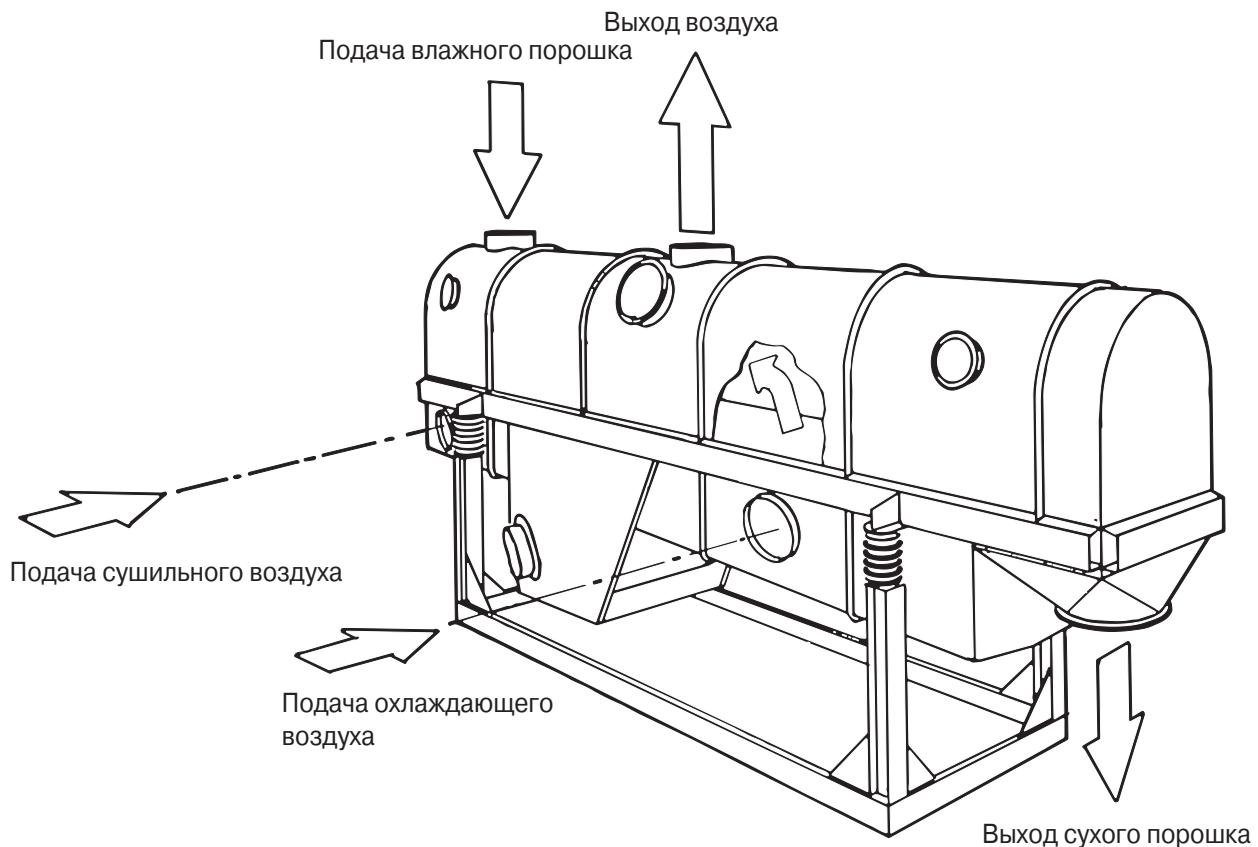


Рис. 77 Vibro-Fluidizer санитарной конструкции.

ОТСУТСТВУЕТ

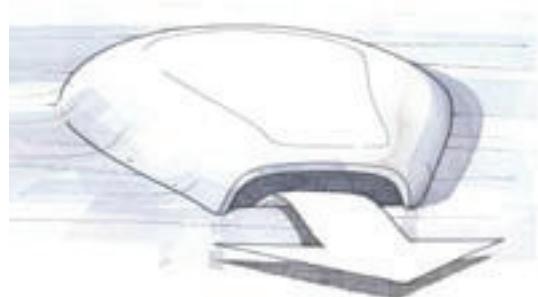


Рис. 77а BUBBLE PLATE™

Температура определяется требуемым испарением. Размер отверстий выбирается так, чтобы скорость воздуха обеспечивала псевдоожижение порошка на пластине. Скорость воздуха не должна быть слишком большой, чтобы агломераты не разрушались от истирания. Однако невозможно (а иногда и не желательно) избежать уноса некоторых (особенно мелких) частиц из псевдоожиженного слоя с воздухом. Поэтому воздух должен пройти через циклон или рукавный фильтр, где частицы отделяются и возвращаются в процесс.

Это новое оборудование позволяет бережно испарить из порошка последние проценты влаги. Но это означает, что распылительную сушилку можно эксплуатировать способом, отличным от описанного выше, при котором выходящий из камеры порошок имеет влажность готового продукта.

Преимущества двухступенчатой сушки можно резюмировать следующим образом:

- более высокая производительность на кг сушильного воздуха
- повышенная экономичность
- лучшее качество продукта:
  - хорошая растворимость
  - высокая насыпная плотность
  - низкое содержание свободного жира
  - низкое содержание абсорбированного воздуха
- Меньшие выбросы порошка

Ожиженный слой может быть либо виброкипящим слоем поршневого типа (Vibro-Fluidizer), либо неподвижным псевдоожиженным слоем обратного смещивания.

Подача концентрата

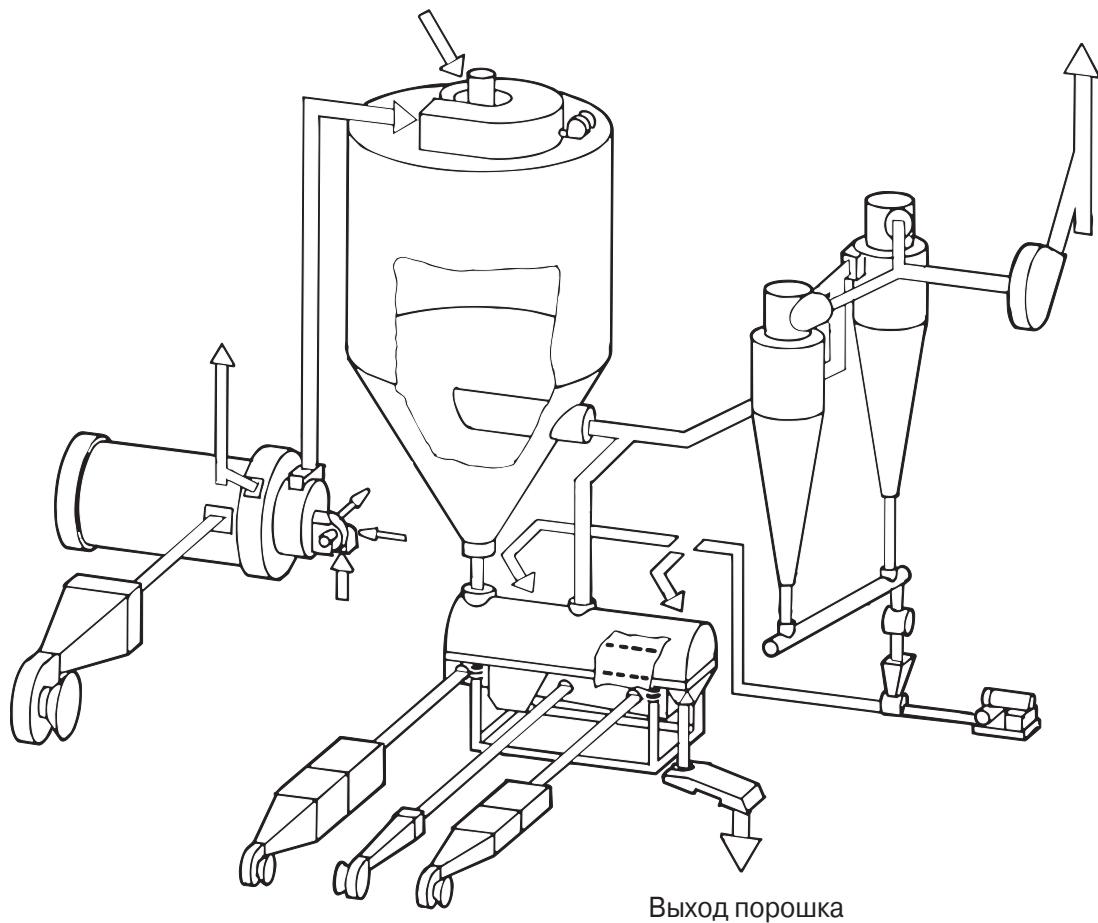


Рис. 78 Распылительная сушилка с аппаратом Vibro-Fluidizer для двухступенчатой сушки.



Рис. 79 Типичная частица после двухступенчатой сушки.

## Двухступенчатая сушка в аппарате Vibro-Fluidizer (поршневой поток)

В аппарате Vibro-Fluidizer весь псевдоожиженный слой вибрирует. Перфорации в пластине сделаны так, чтобы сушильный воздух направлялся вместе с потоком порошка. Для того чтобы перфорированная пластина не вибривала с собственной частотой, она установлена на специальных опорах. См. рис. 78.

Распылительная сушилка работает с меньшей температурой на выходе, что приводит к увеличению влагосодержания и снижению температуры частиц. Влажный порошок выгружается самотеком из сушильной камеры в Vibro-Fluidizer.

Существует, однако, предел снижения температуры, так как из-за возросшей влажности порошок становится липким даже при меньшей температуре и образует комки и отложения в камере.

Обычно применение аппарата Vibro-Fluidizer позволяет снизить температуру на выходе на 10-15 °C. Это приводит к гораздо более мягкой сушке, особенно на критической стадии процесса (от 30 до 10 % влажности), усыхание частиц (см. рис. 79) не прерывается поверхностным твердением, так что условия сушки близки к оптимальным. Более низкая температура частиц отчасти обусловлена более низкой температурой окружающего воздуха, но также и более высоким содержанием влаги, так что температура частиц оказывается близкой к температуре смоченного термометра. Это, естественно, положительно сказывается на растворимости готового порошка.

Уменьшение температуры на выходе означает более высокий КПД сушильной камеры в силу увеличения  $\Delta t$ . Очень часто сушку проводят при более высокой температуре и при более высоком содержании сухих веществ в сырье, что еще больше повышает КПД сушилки. При этом, конечно, возрастает и температура на выходе, но повышенное содержание влаги снижает температуру частиц, так что перегрев и поверхностное твердение частиц не происходят.

Опыт показывает, что температура сушки может достигать 250 °C или даже 275 °C при сушке обезжиренного молока, что поднимает КПД сушки до 0,75.

Как уже отмечалось, частицы, достигающие дна камеры, имеют более высокую влажность и более низкую температуру, чем при традиционной сушке. Со дна камеры порошок попадает непосредственно в сушильную секцию аппарата Vibro-Fluidizer и немедленно ожигается. Любая выдержка или транспортирование приведут к слипанию теплых влажных термопластичных частиц и образованию трудно разрушаемых комков. Это снизило бы эффективность сушки в аппарате Vibro-Fluidizer и часть готового порошка имела бы слишком высокую влажность, т.е. качество продукта пострадало бы.

Самотеком поступает в Vibro-Fluidizer только порошок из сушильной камеры. Мелочь из основного циклона и из циклона, обслуживающего Vibro-Fluidizer, (или из моющегося рукавного фильтра) подается в Vibro-Fluidizer транспортной системой.

Поскольку эта фракция представлена частицами меньшего размера, чем порошок из сушильной камеры, влажность частиц меньше, и они не требуют той же степени вторичной сушки. Очень часто они являются достаточно сухими, тем не менее, их обычно подают в последнюю треть секции сушки аппарата Vibro-Fluidizer, чтобы гарантировать требуемое содержание влаги в продукте.

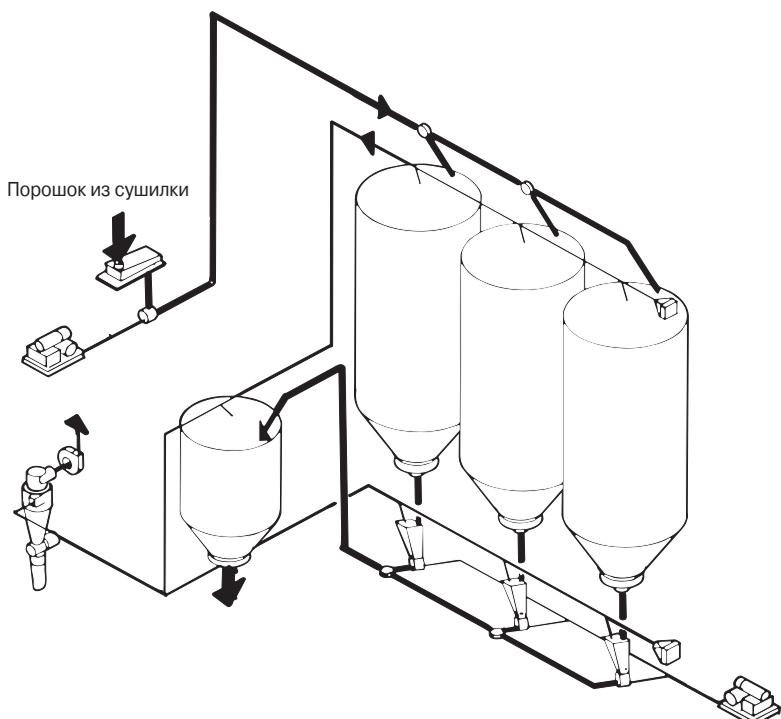


Рис. 80 Нагнетательная пневмотранспортная система между аппаратом Vibro-Fluidizer и бункерами.

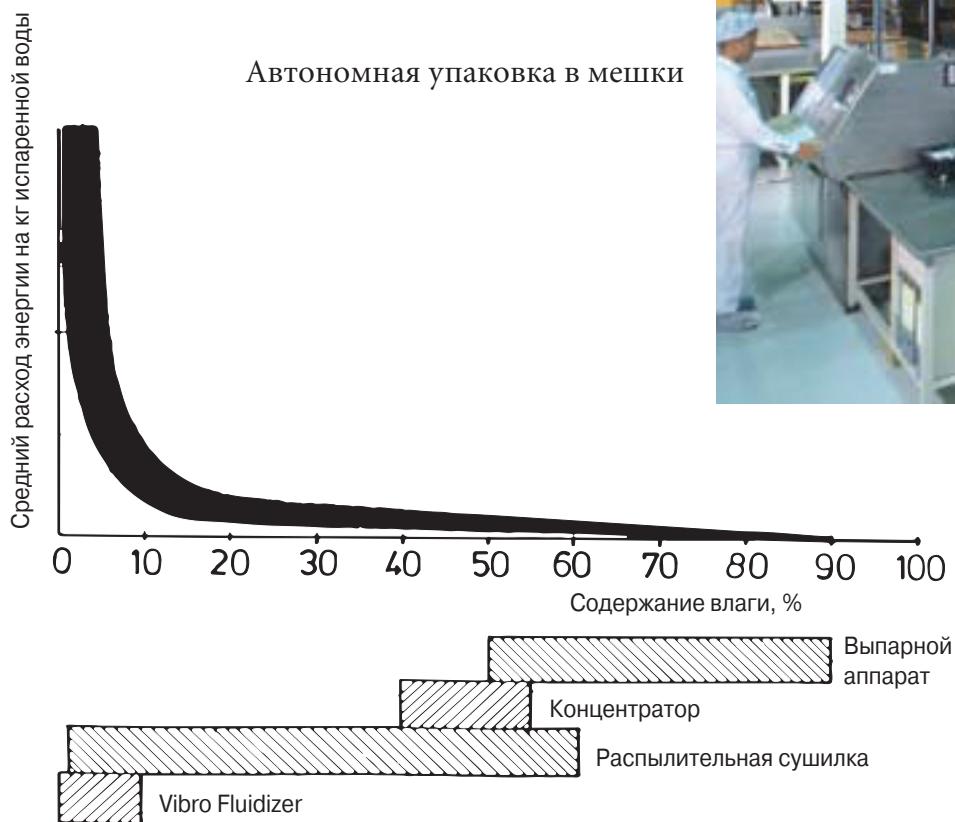


Рис. 81 Расход энергии на кг испаренной воды как функция остаточной влажности.

Точку выгрузки порошка из циклона не всегда можно расположить непосредственно над аппаратом Vibro-Fluidizer, чтобы порошок поступал в секцию сушки самотеком. Поэтому для перемещения порошка часто применяют нагнетательную пневмотранспортную систему. Нагнетательная пневмотранспортная система позволяет легко доставить порошок в любую часть установки, поскольку транспортная линия обычно представлена 3-х или 4-х дюймовой молочной трубой. Система состоит из воздуходувки с малым расходом и высоким давлением и продувного клапана, и обеспечивает сбор и транспортировку порошка, см. рис. 80. Количество воздуха невелико относительно количества транспортируемого порошка (всего 1/5).

Небольшая часть этого порошка опять уносится воздухом из аппарата Vibro-Fluidizer, а затем транспортируется из циклона обратно в Vibro-Fluidizer. Поэтому, если не предусмотреть специальных устройств, при останове сушилки требуется определенное время для прекращения такой циркуляции.

Например, можно установить в транспортной линии распределительный клапан, который будет направлять порошок в самую последнюю часть аппарата Vibro-Fluidizer, откуда он будет выгружен за несколько минут.

На заключительном этапе порошок просеивается и упаковывается в мешки. Поскольку порошок может содержать первичные агломераты, рекомендуется направлять его в бункер посредством еще одной нагнетательной пневмотранспортной системы, чтобы увеличить насыпную плотность.

Общеизвестно, что при испарении воды из молока расход энергии на кг выпаренной воды увеличивается с приближением остаточной влаги к нулю. См. рис. 81.

Как уже отмечалось, эффективность сушки зависит от температуры воздуха на входе и выходе.

Если расход пара в выпарном аппарате составляет 0,10-0,20 кг на кг испаренной воды, то в традиционной одноступенчатой распылительной сушилке он равен 2,0-2,5 кг на кг испаренной воды, т.е. в 20 раз выше, чем в выпарном аппарате. Поэтому всегда предпринимались попытки увеличить содержание сухих веществ в упаренном продукте. Это означает, что выпарной аппарат будет удалять большую долю воды, а расход энергии снизится. Конечно, это слегка увеличит расход энергии на кг испаренной воды в распылительной сушилке, но общий расход энергии снизится.

Указанный выше расход пара на кг испаренной воды – это средний показатель, поскольку расход пара в начале процесса гораздо ниже, чем в конце сушки. Расчеты показывают, что для получения порошка с влажностью 3,5 % требуется 1595 ккал/кг порошка, а для получения порошка с влажностью 6 % - только 1250 ккал/кг порошка. Другими словами, последний этап испарения требует приблизительно 23 кг пара на кг испаренной воды.



Коническая часть распылительной сушилки присоединенный к ней Vibro-Fluidizer

Таблица на следующей странице иллюстрирует эти расчеты. Первый столбец отражает рабочие условия в традиционной установке, где порошок из сушильной камеры направляется в циклоны системой пневмотранспорта и охлаждения. Следующий столбец отражает рабочие условия в двухступенчатой сушилке, в которой сушка от 6 до 3,5 % влажности осуществляется в аппарате Vibro-Fluidizer. Третий столбец представляет двухступенчатую сушку при высокой температуре на входе.

СИСТЕМА СУШКИ		Распылительная сушилка с пневмотранспортной системой	Распылительная сушилка с аппаратом Vibro-Fluidizer	Распылительная сушилка с аппаратом Vibro-Fluidizer при высокой температуре
<b>РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШИЛКА</b>				
Температура воздуха на входе	°C	200	200	230
Сушильный воздух	кг/ч	31 500	31 500	31 500
Обезжиренное молоко с 8,5 % СВ	кг/ч	12 950	16 150	19 800
Концентрат с 48 % СВ	кг/ч	2 290	2 860	3 510
Испарение в камере	кг/ч	1 150	1 400	1 720
Порошок из камеры:				
- 6 % влаги	кг/ч		1 460	1 790
- 3,5% влаги	кг/ч	1 140	-	-
Расход топлива	кг/ч	175	175	205
Потребляемая мощность:	кВт	120	125	130
Энергопотребление				
Распылительная сушка в целом	Мкал	1 818	1 823	2 120
Энергия/кг порошка в камере	ккал	1 595*	1 250*	1 184
<b>VIBRO-FLUIDIZER (VF)</b>				
Сушильный воздух	кг/ч		3 430	4 290
Температура воздуха на входе	°C		100	100
Испарение в VF	кг/ч		40	45
Порошок из VF, 3,5 % влажности	кг/ч		1 420	1 745
Расход пара	кг/ч		135	167
Потребляемая мощность:	кВт		20	22
Общее энергопотребление в VF	Мкал		95	115
<b>СУШКА В ЦЕЛОМ</b>				
Общее энергопотребление	Мкал	1 818	1 918	2 235
Общий расход энергии/кг порошка	ккал	1 595	1 350	1 280
Относительное энергопотребление	%	100	85	80
КПД сушки		0,54	0,62	0,66

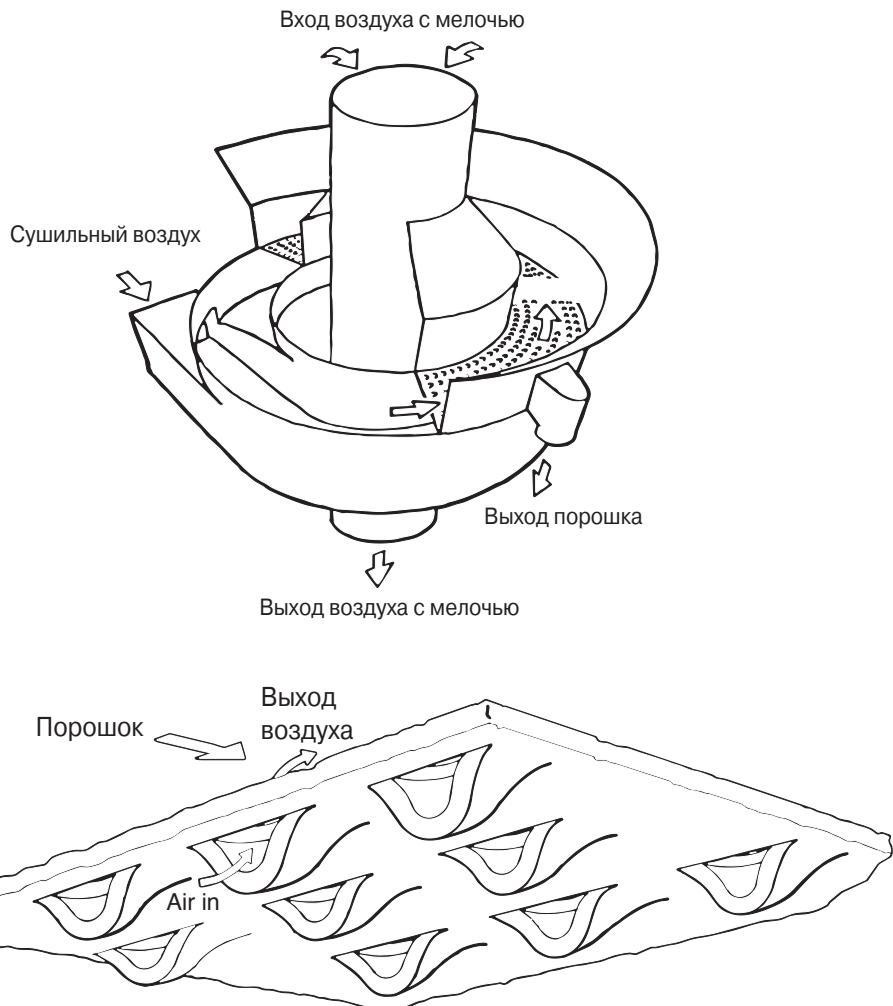


Рис. 82 Перфорированная пластина для направленной подачи воздуха (BUBBLE PLATE™).



Компактная распылительная сушилка (CDI)



Многоступенчатая распылительная сушилка (MSD)

Из показателей, отмеченных знаком \*), находим:

$$1595 - 1250 = 345 \text{ ккал/кг порошка}$$

Испарение на кг порошка составляет: 0,025 кг ( 6 % - 3,5 % + 2,5 %)

Значит, расход энергии на кг испаренной воды равен:

$$\frac{345}{0,025} = 13,800 \text{ ккал/кг}$$

что соответствует 23 кг греющего пара на кг испаренной воды.

В аппарате Vibro-Fluidizer средний расход пара составляет 4 кг на кг испаренной воды, естественно, он зависит от температуры и расхода сушильного воздуха. Даже если расход пара в аппарате Vibro-Fluidizer вдвое выше, чем в распылительной сушилке, расход энергии на испарение того же количества воды все равно оказывается гораздо ниже (поскольку время обработки продукта составляет 8-10 минут, а не 0-25 секунд, как в распылительной сушилке). И при этом производительность такой установки больше, качество продукта выше, выбросы порошка ниже, а функциональные возможности шире.

## **Двухступенчатая сушка с неподвижным псевдоожженным слоем (с обратным смешением)**

Для улучшения КПД сушки, выражаемого формулой (17), стр. 131, температура воздуха на выходе То при двухступенчатой сушке уменьшена (см. стр. 133) до того уровня, при котором порошок с содержанием влаги 5-7 % становится липким и начинает оседать на стенках камеры.

Однако создание псевдоожженного слоя в конической части камеры обеспечивает дальнейшее усовершенствование процесса. Воздух для вторичной сушки подается в камеру под перфорированной пластиной, через которую распределяется по слою порошка. Такой тип сушилки может работать в режиме, при котором первичные частицы высыхают до влажности 8-12 %, что соответствует температуре воздуха на выходе 65-70 °C. Такая утилизация сушильного воздуха позволяет значительно уменьшить размеры установки при той же производительности сушилки.

Сухое молоко всегда считалось трудным для псевдоожжения. Однако пластина специальной запатентованной конструкции, см. рис. 82 и стр. 134, обеспечивает движение воздуха и порошка в том же направлении, в котором движется первичный сушильный воздух. Эта пластина при условии правильного выбора высоты слоя и скорости начала псевдоожжения позволяет создавать статический псевдоожженный слой для любого выработанного из молока продукта.

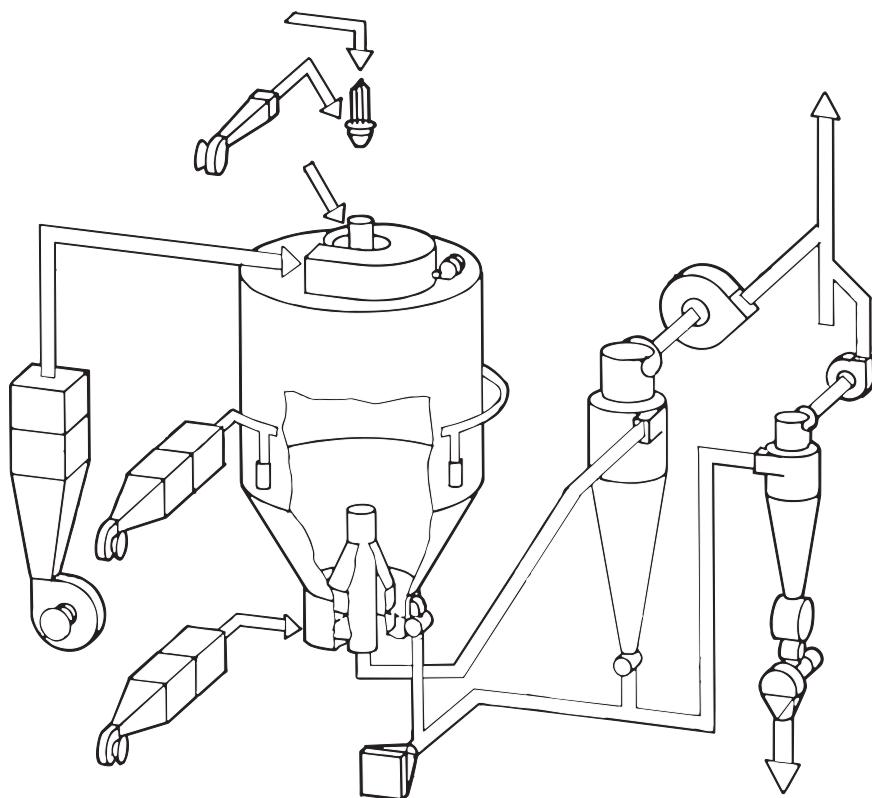


Рис. 83 Компактная распылительная сушилка с пневмотранспортной системой (CDP).

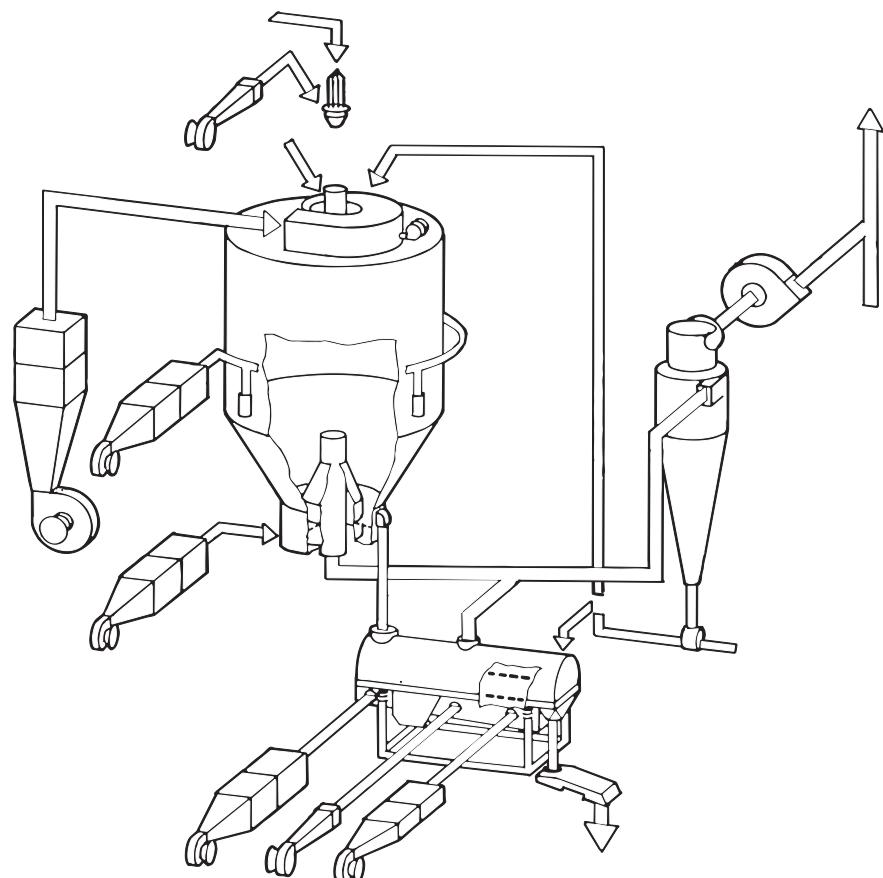


Рис. 84 Компактная распылительная сушилка с аппаратом Vibro-Fluidizer в качестве агломератора-инстантизатора (CDI).

Выпускаются аппараты со статическим псевдоожиженным слоем (SFB) трех конфигураций:

- с кольцевым псевдоожиженным слоем (сушилки Compact)
- с циркуляционным псевдоожиженным слоем (сушилки MSD)
- с комбинацией таких слоев (сушилки IFD)

### ***Кольцевой псевдоожиженный слой (сушилки Compact)***

Кольцевой псевдоожиженный слой обратного смешения располагается в нижней части конуса традиционной сушильной камеры вокруг центральной трубы отвода отработанного воздуха. Таким образом, в конической части камеры нет деталей, мешающих потоку воздуха, и это вместе со струями, выходящими из псевдоожиженного слоя, предотвращает образование отложений на стенках конуса даже при обработке липких порошков с высоким содержанием влаги. Цилиндрическая часть камеры защищена от отложений системой обдува стенок: небольшое количество воздуха тангенциально подается с высокой скоростью через сопла специальной конструкции в том же направлении, в котором закручивается первичный сушильный воздух.

В силу вращения воздушно-пылевой смеси и возникающего в камере эффекта циклона только небольшое количество порошка уносится отработанным воздухом. Поэтому доля порошка, попадающего в циклон или моющийся рукавный фильтр, так же как и выбросы порошка в атмосферу, для этого типа сушилок снижены.

Порошок непрерывно выгружается из псевдоожиженного слоя, перетекая через перегородку регулируемой высоты, таким образом поддерживается определенный уровень псевдоожиженного слоя.

Из-за низкой температуры воздуха на выходе эффективность сушки значительно увеличена по сравнению с традиционной двухступенчатой сушкой, как иллюстрирует помещенная на следующей странице таблица.

После выхода из сушильной камеры порошок может охлаждаться в пневмотранспортной системе, как описано на стр. 116. См. рис. 83. Образующийся порошок состоит из отдельных частиц и имеет такую же или лучшую насыпную плотность, чем полученный двухступенчатой сушкой и охарактеризованный на стр. 133.

Продукты, содержащие жир, следует охлаждать в виброожиженном слое, в котором одновременно осуществляется агломерация порошка. В этом случае фракция мелочи возвращается из циклона в распылитель для агломерации. См. рис. 84.



Псевдоожженный слой возвратного смешивания в основании сушильной камеры.

СИСТЕМА СУШКИ		Двухступенчатая сушка в распылительной сушилке с VF	Распылительная сушка с кольцевым псевдоожженным слоем (Compact)	Распылительная сушка с циркуляционным псевдоожженным слоем (MSD)
РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШКА				
Температура воздуха на входе	°C	230	230	260
Сушильный воздух	кг/ч	31,500	31,500	31,500
Обезжиренное молоко с 8,5 % СВ	кг/ч	19,800	24,000	31,300
Концентрат с 48 % СВ	кг/ч	3,510	4,250	5,540
Испарение в камере	кг/ч	1,720	2,010	2,620
Порошок из камеры:				
-6% влаги	кг/ч	1,790	-	-
-9% влаги	кг/ч	-	2,240	2,920
Расход топлива	кг/ч	205	205	230
Потребляемая мощность:	кВт	130	140	150
Энергопотребление				
Распылительная сушка в целом	Мкал	2,120	2,130	2,380
Энергия/кг порошка в камере	ккал	1,184	950	820
АППАРАТ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ		VF	SFB	SFB
Сушильный воздух	кг/ч	4,290	6,750	11,500
Температура воздуха на входе	°C	100	115	120
Испарение в VF/SFB	кг/ч	45	125	165
Порошок из псевдоожженного слоя, 3,5% влаги	кг/ч	1,745	2,115	2,755
Расход пара	кг/ч	167	290	400
Потребляемая мощность:	кВт	20	25	35
Общее энергопотребление в псевдоожженном слое	Мкал	115	195	265
СУШКА В ЦЕЛОМ				
Общее энергопотребление	Мкал	2,235	2,325	2,645
Общий расход энергии/кг порошка	ккал	1,280	1,038	960
Относительное энергопотребление (см. стр. 61)	%	80	65	60
КПД сушки		0.66	0.75	0.80

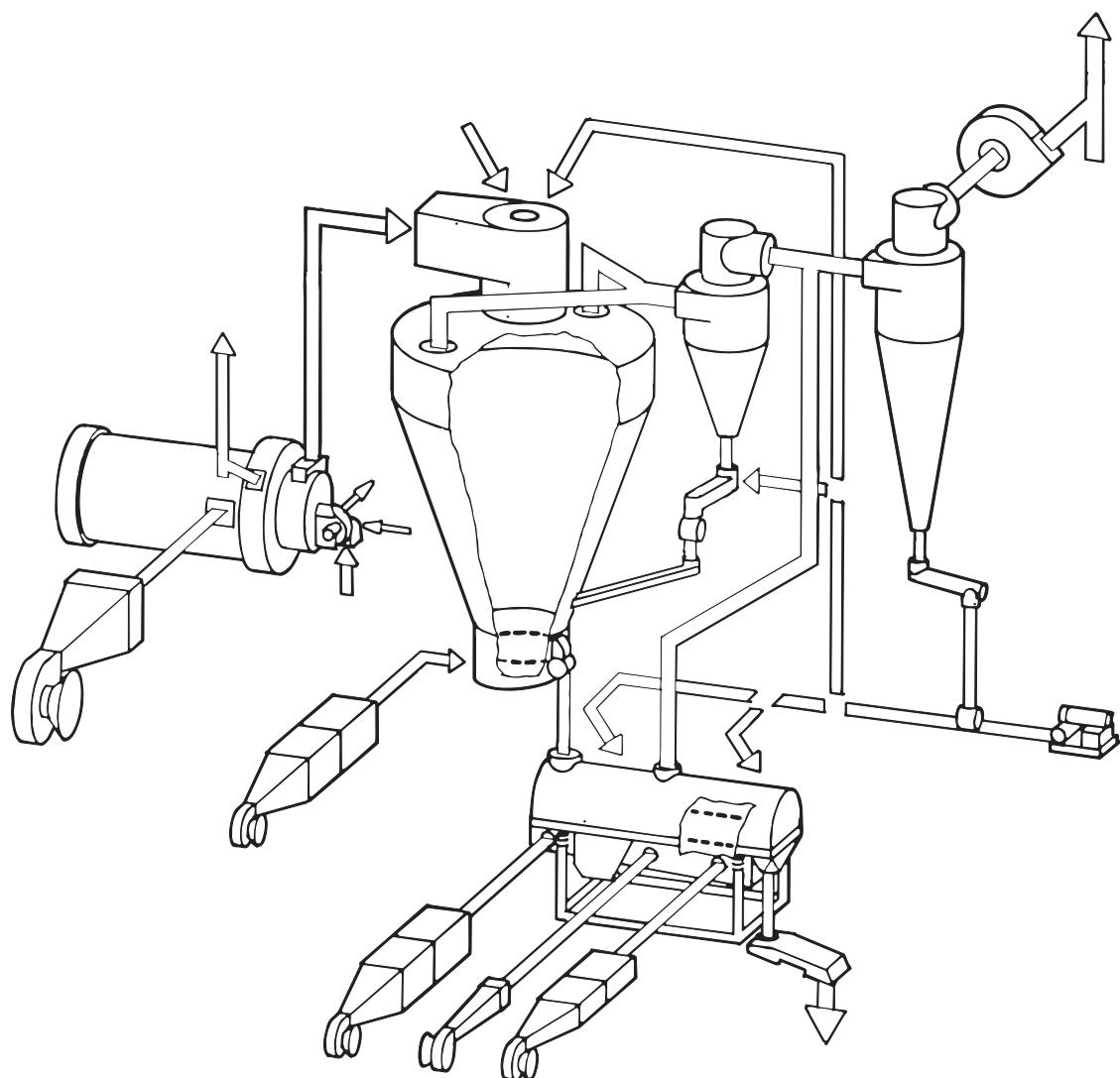


Рис. 85 Многоступенчатая распылительная сушилка (MSD).

### **Циркуляционный псевдоожиженный слой (сушилки MSD)**

Для еще большего повышения КПД сушки без создания проблем с налипанием отложений была разработана совершенно новая концепция распылительной сушилки - Multi-Stage Dryer (многоступенчатая сушилка), MSD.

В этом аппарате сушка выполняется в три ступени, каждая из которых приспособлена к характерной для нее влажности продукта. На ступени предварительной сушки концентрат распыляется прямоточными форсунками, расположенными в канале горячего воздуха. Воздух подается в сушилку вертикально с высокой скоростью через воздухораспределитель, который обеспечивает оптимальное смешивание капель с сушильным воздухом. Как уже отмечалось, на этой испарение протекает мгновенно, пока капли движутся вертикально вниз через сушильную камеру специальной конструкции. Содержание влаги в частичках снижается до 6-15 %, в зависимости от типа продукта. При такой высокой влажности порошок обладает высокой термопластичностью и липкостью. Поступающий с высокой скоростью воздух создает эффект Вентури, т.е. подсасывает окружающий воздух и увлекает мелкие частицы во влажное облако вблизи распылителя. Это приводит к "спонтанной вторичной агломерации", см. стр. 153. Поступающий снизу воздух имеет достаточную скорость для псевдоожижения слоя осевших частиц, а его температура обеспечивает вторую ступень сушки. Воздух, выходящий из этого псевдоожиженного слоя возвратного смешивания, вместе с отработанным воздухом первой ступени сушки выходит из камеры сверху и подается в первичный циклон. Из этого циклона порошок возвращается в псевдоожиженный слой обратного смешивания, а воздух подается во вторичный циклон для конечной очистки.

Когда влажность порошка снижается до определенного уровня, он выгружается через роторный затвор в Vibro-Fluidizer для завершающей сушки и последующего охлаждения. Сушильный и охлаждающий воздух из аппарата Vibro-Fluidizer проходит через циклон, где от него отделяется порошок. Этот мелкий порошок возвращается в распылитель, в коническую часть камеры (в статический псевдоожиженный слой) или в Vibro-Fluidizer. В современных сушилках циклоны заменяются рукавными фильтрами с СИП.

В установке образуется грубодисперсный порошок, что обусловлено "спонтанной вторичной агломерацией" в облаке распылителя, где постоянно поднимающиеся снизу сухие мелкие частицы налипают на полусухие частицы, образуя агломераты. Процесс агломерации продолжается, когда распыленные частицы вступают в контакт с частицами псевдоожиженного слоя. См. рис. 85.

Такую установку можно эксплуатировать при очень высокой температуре воздуха на входе (220-275 °C) и чрезвычайно коротком времени контакта, достигая, тем не менее, хорошей растворимости порошка. Такая установка очень компактна, что снижает требования к размерам помещения. Это, а также сниженная за счет более высокой температуры на входе стоимость эксплуатации (на 10-15 % меньше по сравнению с традиционной двухступенчатой сушкой), делает такое решение очень привлекательным, особенно для агломерированных продуктов.

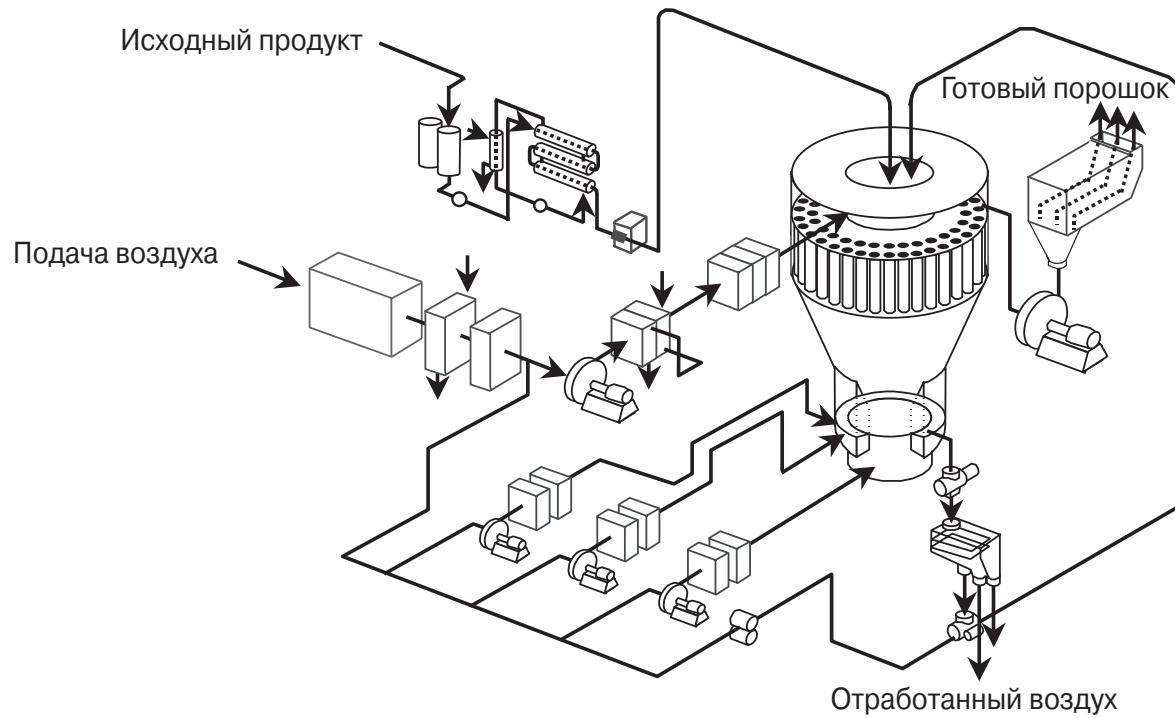


Рис. 85а Сушилка с встроенным фильтром.



Рис. 85б Сопло обратной продувки.



Встроенный псевдоожженный слой

**Распылительная сушка с встроенным фильтром и псевдоожженными слоями (IFD)**

Запатентованная конструкция сушилки с встроенным фильтром, см. рис. 85а, использует проверенные системы распылительной сушки, такие как:

Система подачи с подогревом, фильтрованием и гомогенизацией концентрата, оборудованная высоконапорными насосами. Оборудование такое же, как в традиционных распылительных сушилках.

- Распыление производится либо струйными форсунками, либо атомайзером. Струйные форсунки применяются, в основном, для жирных или продуктов с высоким содержанием белка, а роторные распылители – для любых продуктов, и особенно тех, которые содержат кристаллы.
- Сушильный воздух фильтруется, нагревается и распределяется устройством, которое создает вращающийся или вертикальный поток.
- Сушильная камера сконструирована так, чтобы обеспечить максимальную гигиеничность и предельно снизить потери тепла, например, благодаря использованию съемных пустотелых панелей, см. стр. 74.
- Встроенный псевдоожженный слой представляет собой комбинацию слоя обратного смешения для сушки и слоя поршневого типа для охлаждения. Аппарат с псевдоожженным слоем – полностью сварной и не имеет полостей. Между слоем обратного смешения и окружающим его слоем поршневого типа имеется воздушный зазор для предотвращения переноса теплоты. Здесь используются новые запатентованные пластины Niro BUBBLE PLATE™. См. стр. 119.

Система удаления воздуха, при всей революционной новизне, основана на тех же принципах, что и рукавный фильтр Niro SANICIP™. Мелочь собирается на фильтрах, встроенных в сушильную камеру. Рукава фильтра опираются на сетки из нержавеющей стали, прикрепленные к потолку по окружности сушильной камеры. Эти фильтрующие элементы очищаются обратной продувкой, как и фильтр SANICIP™. См. стр. 110.

Рукава продуваются по одному или по четыре за раз струей сжатого воздуха, которая подается в рукав через сопло, см. рис. 85б. Это обеспечивает регулярное и частое удаление порошка, который падает в псевдоожженный слой.

Здесь используется тот же фильтрующий материал, что и в рукавном фильтре SANICIP™, и обеспечивается такой же расход воздуха на единицу площади материала.

Сопла обратной продувки выполняют две функции. При работе сопло служит для продувки, а при безразборной мойке через него подается жидкость, промывающая рукава изнутри наружу, к грязной поверхности. Чистая вода впрыскивается через сопло обратной продувки, распыляется сжатым воздухом по внутренней поверхности рукава и выдавливается наружу. Эта запатентованная схема очень важна, поскольку промывкой снаружи очистить фильтрующий материал очень трудно или невозможно.

Для чистки нижней стороны потолка камеры вокруг рукавов применяются форсунки специальной конструкции, также играющие двойную роль. Во время сушки через форсунку подается воздух, предотвращающий отложение порошка на потолке, а при мойке она используется как обычная CIP-форсунка. Камера чистого воздуха очищается стандартной форсункой безразборной мойки.



Камера IFD™ со специальными изолирующими панелями

## Преимущества установки IFD™

### Продукт

- Более высокий выход первосортного порошка. В традиционных сушилках с циклонами и рукавными фильтрами из фильтров собирается продукт второго сорта, доля которого составляет приблизительно 1 %.
- Продукт не подвергается механическому воздействию в каналах, циклонах и рукавных фильтрах, устраняется необходимость в возврате мелочи из внешних сепараторов, поскольку распределение потоков внутри сушилки обеспечивает оптимальную первичную и вторичную агломерацию.
- Качество продукта улучшается, поскольку установка IFD™ может работать при более низкой температуре воздуха на выходе, чем традиционная распылительная сушилка. Это означает, что можно достичь более высокой производительности сушки на кг воздуха.

### Безопасность

- Система защиты проще, поскольку весь процесс сушки протекает в одном аппарате.
- Защиты требует меньшее число компонентов.
- Стоимость обслуживания ниже

### Проектирование

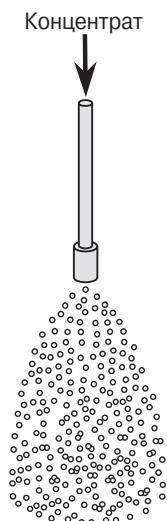
- Более простая установка
- Меньшие размеры здания
- Более простая опорная конструкция

### Защита окружающей среды

- Меньшая возможность утечки порошка внутрь рабочей зоны
- Более простая очистка, так как площадь контакта оборудования с продуктом сокращена.
- Меньший объем стоков при безразборной мойке
- Меньший выброс порошка, до 10-20 мг/нм<sup>3</sup>.
- Экономия энергии до 15 %
- Меньший уровень шума в связи с меньшим падением давления в вытяжной системе

ТИП	ОПРЕДЕЛЕНИЕ	ПРИМЕРЫ
Спонтанная первичная агломерация	Случайные столкновения первичных распыленных частиц.	Любые распылители
Принудительная первичная агломерация	Намеренно устроенное столкновение первичных распыленных частиц из разных распыляющих устройств.	Столкновение столкновением факелов от разных форсунок.
Спонтанная вторичная агломерация	Случайные столкновения первичных распыленных частиц и мелочи.	Многоступенчатая сушилка или сушилка с встроенным фильтром.
Принудительная вторичная агломерация	Намеренно устроенное столкновение первичных распыленных частиц и мелочи, возвращенной в зону агломерации.	Установки с возвратом мелочи.

Рис. 86 Определение типов агломерационных процессов.



Спонтанная первичная агломерация.

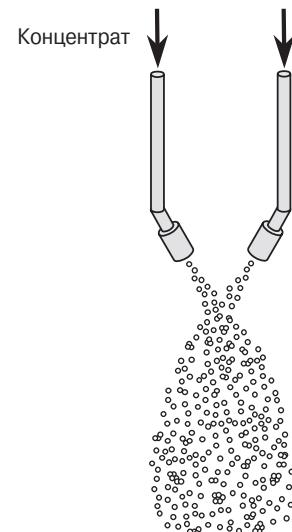


Рис. 86b Принудительная первичная агломерация.

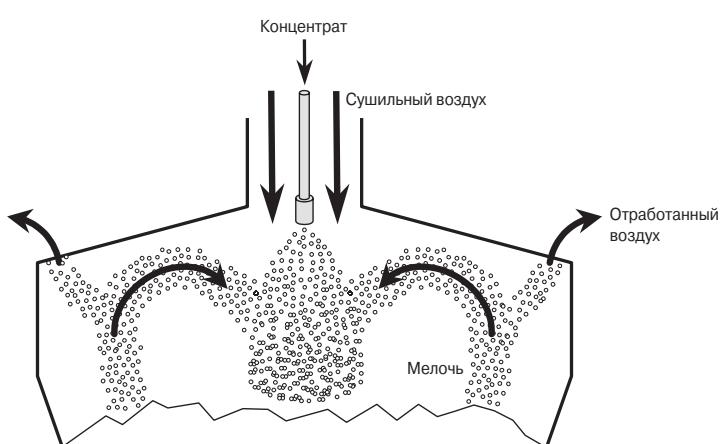


Рис. 86c Спонтанная вторичная агломерация.

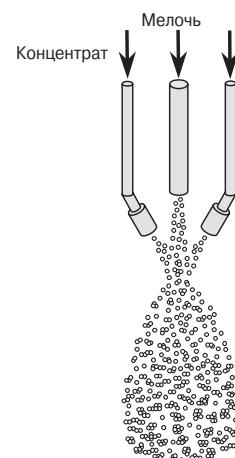


Рис. 86d Принудительная вторичная агломерация.

## Агломерация

Агломерация – это процесс слипания мелких частиц друг с другом, в результате которого образуются более крупные соединения частиц, агломераты, что облегчает растворение порошка в воде.

### Агломерация при распылительной сушке

Цель распылительной сушки – получение частиц с большой относительной поверхностью, т.е. мелких частиц.

Однако восстановить влагосодержание порошка из мелких частиц труднее: чтобы порошок растворился, его нужно диспергировать в воде, а это требует интенсивного перемешивания. Крупные порошки легче диспергируются, но получение крупных частиц в процессе распылительной сушки ведет к ухудшению их растворимости, см. стр. 124.

Агломерация позволяет добиться и хорошей диспергируемости, и полной растворимости.

В процессе распылительной сушки возможны два варианта агломерации: спонтанная и вынужденная, в обоих вариантах это может быть первичная или вторичная агломерация, см. рис. 86.

#### *Спонтанная первичная агломерация*

это результат случайного столкновения частиц в одном облаке распыления, обусловленного тем, что частицы разного диаметра имеют разный путь торможения. Это явление характерно и для форсунок, и для роторных распылителей. См. рис. 86а.

#### *Принудительная первичная агломерация*

это управляемый процесс создания агломератов с определенными свойствами, например, за счет столкновения частиц из двух или большего числа облаков распыления, обычно это делается в распылителе со многими форсунками, направленными так, чтобы их факелы распыла сталкивались. См. рис. 86б.

#### *Спонтанная вторичная агломерация*

это результат эффекта Вентури при подаче сушильного воздуха в камеру, так как он подсасывает сухие частицы порошка во влажное облако распыления. Влажные частицы сталкиваются с сухими частицами, захваченными из отработанного воздуха, который в сушилках MSD и IFD движется в противотоке. См. рис. 86в.

#### *Принудительная вторичная агломерация*

это управляемое получение агломератов, достигаемое возвратом мелочи в облако распыления. Спонтанная агломерация, всегда протекающая в сушилке, усиливается вводом собранной мелочи в облако распыления. Мелочь, по определению, представляет собой фракцию мелких частиц порошка, возвращаемую в процесс из циклона или рукавного фильтра. Эти мелкие сухие частицы вводятся в сушилку вблизи распылителя, где они сталкиваются с распыленными влажными частицами, образуя состоящие из множества частиц агломераты размером 100-500 мкм, в зависимости от параметров процесса. См. рис. 86г.

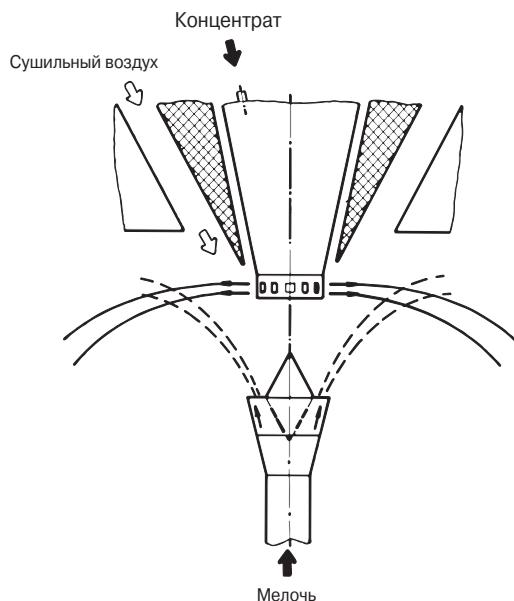


Рис. 87 Возврат мелочи в роторный распылитель “старого типа”.

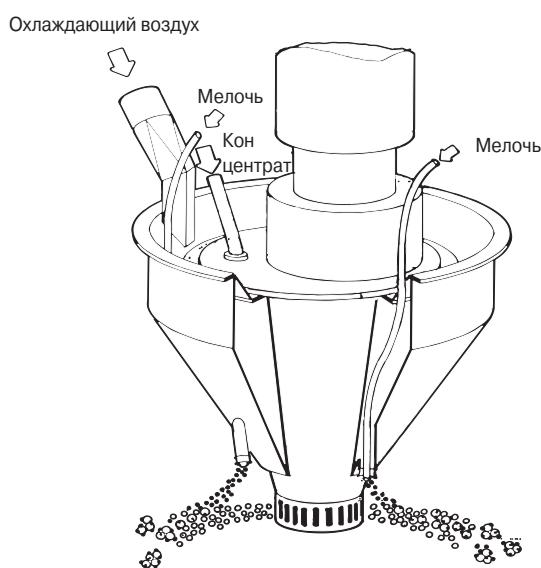


Рис. 88 Возврат мелочи для принудительной вторичной агломерации в роторном распылителе FRAD.

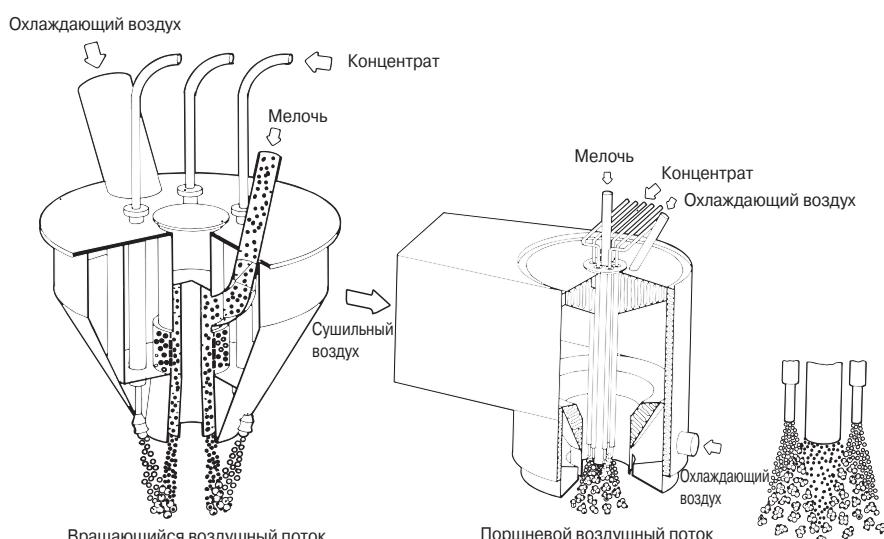


Рис. 89 Возврат мелочи для принудительной вторичной агломерации в форсуночном распылителе.

В силу особого характера воздушного потока в сушилках MSD и IDF, в них протекает интенсивная спонтанная вторичная агломерация. Для производства высококачественного цельного или обезжиренного сухого молока этой спонтанной агломерации достаточно, и мелочь возвращается в псевдоожиженный слой сушилки, откуда они вновь уносятся воздухом в зону распыления. Однако агломерацию можно усилить за счет принудительной первичной агломерации (столкновением перекрывающихся факелов распыла от разных форсунок в многофорсуночном распылителе) или за счет принудительной вторичной агломерации (подачей мелочи в зону распыления). Еще большую функциональную гибкость обеспечивает распылитель специальной конструкции, в котором можно менять расстояние между отдельными форсунками или между форсунками и трубой возврата мелочи.

В зависимости от типа распылителя возврат мелочи осуществляется разными способами:

#### При роторном распылении

Цель состоит в том, чтобы ввести мелочь как можно ближе к диску распылителя. Это можно сделать снизу, см. рис. 87, подавая ее нагнетательной пневмотранспортной системой через 3-4" трубу с распределителем мелочи на конце. Однако на такой трубе легко образуются отложения, если воздухораспределитель не отрегулирован должным образом. Такая регулировка, однако, не обязательно обеспечит оптимальное распределение воздуха для сушки.

Поэтому в современных сушилках мелочь вводится сверху через воздухораспределитель (система FRAD) – 4 трубы возврата мелочи располагаются непосредственно над облаком распыления. Дефлекторы на конце каждой трубы обеспечивают правильный ввод и распределение мелочи. См. рис. 88.

#### При форсуночном распылении

Устройство возврата мелочи является составной частью узла распыления, форсунки располагаются вокруг центрального канала возврата мелочи. Мелочь вводится в канал распределения мелочи тангенциально или через центральную трубу, см. рис. 89. Форсунки могут быть приварены к подающему стволу под определенным углом, так что вращение подающего ствола форсунки вокруг своей оси изменяет точку столкновения с возвращаемой мелочью.

#### ***Разделение***

это процесс отделения части мелочи, захваченной выходящим из сушильной камеры основным сушильным воздухом. Эффективность разделения определяется характером и скоростью потока воздуха в сушильной камере и поэтому тесно связана с конструкцией камеры и лишь в малой мере зависит от нормальных рабочих параметров, например, от настройки воздухораспределителя или изменения расхода сушильного воздуха.

Агломерированный порошок выходит из нижней части камеры или из встроенного псевдоожиженного слоя и попадает в Vibro-Fluidizer. При движении вниз вдоль стенок конической части камеры происходит некоторая стабилизация протекающей агломерации. В статическом псевдоожиженном слое и в вибропитающем слое порошок контактирует с теплым воздушным потоком, который испаряет избыток влаги, как и в случае двухступенчатой сушки.



### ***Истирание***

это частичное разрушение агломератов в псевдоожиженном слое или в системе транспортировки порошка, которое приводит к образованию либо агломератов меньшего размера и мелочи (абразивное истирание), либо большого числа более мелких частиц (фрагментация). Данное явление, о котором часто забывают, - результат соударений агломерата с другими телами, которыми могут быть стенки оборудования либо другие частицы. Наиболее вероятная причина истирания в псевдоожиженном слое – взаимодействие частиц, поскольку высокая скорость воздушной струи на выходе из отверстия перфорированной пластины может приводить к соударению частиц с очень большой скоростью. Интенсивность истирания зависит от скорости воздушных струй, которая определяется перепадом давления через перфорированную пластину, скоростью начала псевдоожижения и конструкцией перфорированной пластины.

### ***Классификация***

это отделение мелочи в псевдоожиженном слое. Эффективность классификации определяется, в основном, скоростью начала псевдоожижения, но от конструкции аппарата зависит, все ли захваченные воздухом мелкие частицы будут унесены из псевдоожиженного слоя.

По завершении сушки порошок поступает в секцию охлаждения, где охлаждается сначала воздухом, имеющим температуру окружающей среды, а затем охлажденным осущенным воздухом. Затем продукт проходит через просеиватель, где удаляются слишком крупные частицы. Можно также использовать просеиватель с двумя ситами, который дополнительно удаляет из продукта оставшиеся мелкие частицы и агломераты. Эту фракцию можно возвращать вместе с мелочью в распылитель, и таким образом получать порошок с узким распределением размеров агломератов. Однако удаление мелочи из псевдоожиженного слоя обычно достаточно для обеспечения гранулометрического состава продукта, и установки с просеивателями применяются только для производства продуктов с особо строгими требованиями к размеру частиц. На рис. 90 показана схема установки с выпарным аппаратом и распылительной сушилкой.

### ***Структура агломерата и свойства продукта***

От устройства и настройки системы возврата мелочи, особенно расположения точки ввода мелочи относительно распылителя, зависит структура агломерата, которая влияет на ряд свойств продукта – насыпную плотность, механическую прочность и диспергируемость.

Зависимость свойств порошка от структуры агломерата иллюстрируется схемой на рис. 90а.

Если мелочь вводится в облако вблизи распылителя, где первичные распыленные частицы содержат много влаги и потому отличаются пластичностью и липкостью, частицы мелочи могут проникать внутрь первичных частиц или полностью покрываться концентратом (см. рис. 90б). Такие агломераты имеют “луковичную” структуру. Если столкновение происходит на большем расстоянии от распылителя, образуются менее компактные агломераты. Это структуры типа “малина” и, при меньшей плотности агломерата, “виноград”.

“Луковичные” агломераты характеризуются высокой механической прочностью и насыпной плотностью, но зачастую плохо диспергируются. Плохая диспергируемость может снизить общую оценку качества продукта.

СТРУКТУРА АГЛОМЕРАТА:

Лук→Малина→Плотная гроздь→Неплотная гроздь

ВЛАЖНОСТЬ СТАЛКИВАЮЩИХСЯ ЧАСТИЦ

Высокая → Низкая

МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ:

Высокая → Низкая

НАСЫПНАЯ ПЛОТНОСТЬ (без истирания)

Высокая → Низкая

НАСЫПНАЯ ПЛОТНОСТЬ (после истирания)

Высокая → Низкая → Высокая

МЕДЛЕННО ДИСПЕРГИРУЮЩИЕСЯ ЧАСТИЦЫ:

Много → Мало

ДИСПЕРГИРУЕМОСТЬ (после истирания):

Плохая → Хорошая → Плохая

Рис. 90а Зависимость свойств порошка от структуры агломерата.

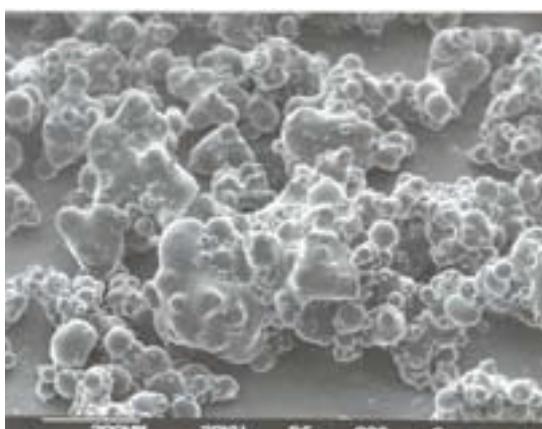


Рис. 90б “Луковичный” агломерат.

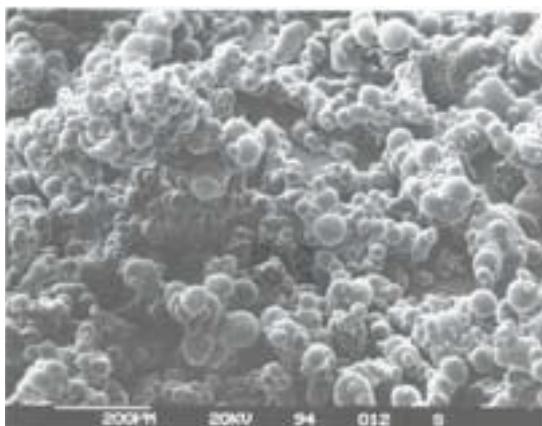


Рис. 90с Структура агломерата “плотная гроздь”.

Более рыхлые агломераты имеют меньшую насыпную плотность и механическую прочность, но лучше восстанавливаются в воде. Однако структура “рыхлый виноград” уже имеет слишком низкую механическую плотность, такой порошок легко истирается, что тоже снижает его способность восстанавливаться в воде. Идеальным компромиссом считается структура “плотный виноград” (см. рис. 90в), такой порошок и достаточно хорошо восстанавливается в воде, и не разрушается при транспортировке и упаковке.

Существуют следующие способы улучшения агломерации:

- повышение содержания сухих веществ в концентрате
- возврат большего количества мелочи в распылитель
- ввод мелочи ближе к распылителю
- уменьшение расстояния от форсунки до статического псевдоожженного слоя
- повышение влажности частиц на выходе первой ступени сушки
- увеличение размеров первичных частиц
- снижение температуры пастеризации молока перед выпариванием

Порошок, выгруженный из просеивателя, не следует транспортировать пневматической системой или быстроходными шнеками во избежание его истирания. Сейчас существуют низкоскоростные вакуумные системы транспорта, которые не повреждают агломераты. Однако лучше всего поместить установку на такой высоте, чтобы порошок заполнял мешки или контейнеры самотеком.

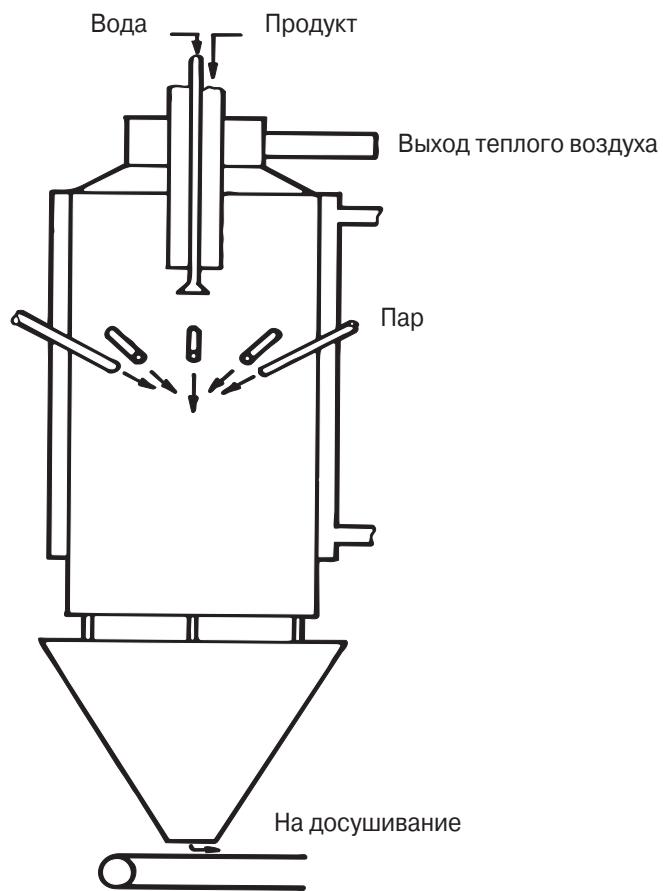


Рис. 91 Увлажняющий инстантизатор Пиблса.

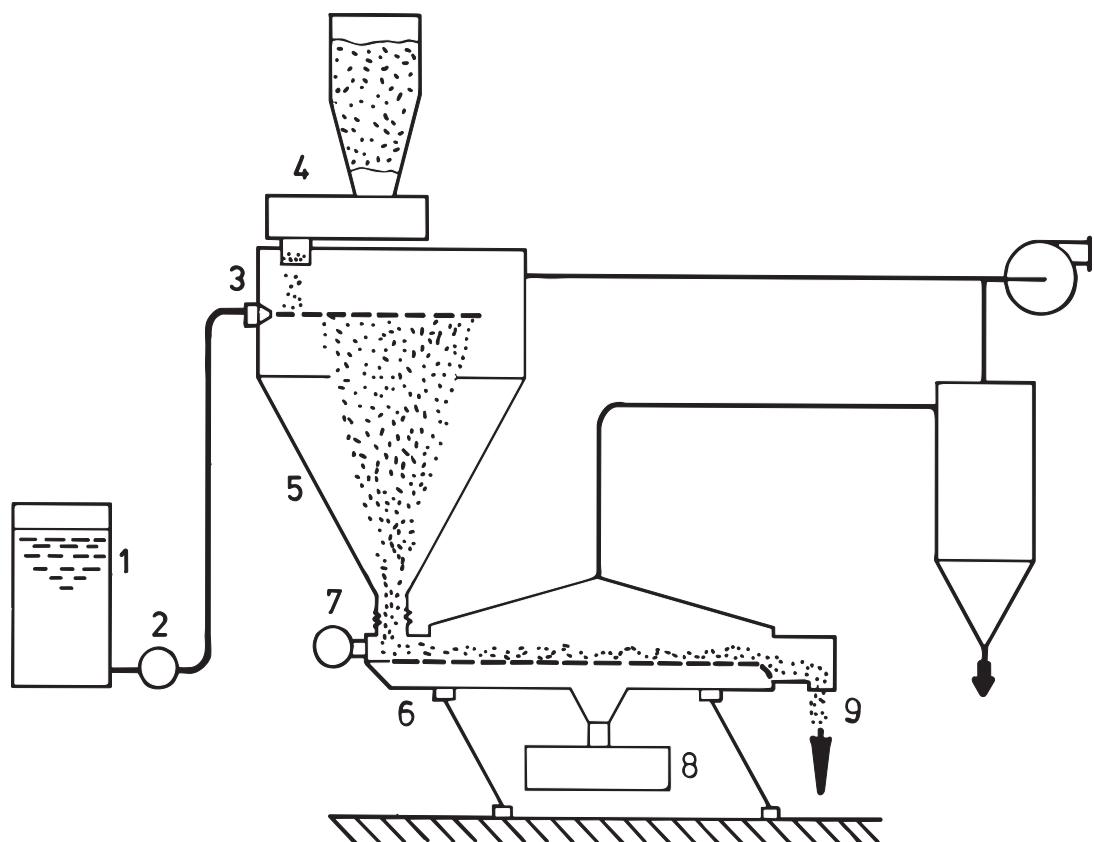


Рис. 92 Установка увлажняющей агломерации (Nestle).

## Увлажняющая агломерация

Многие порошки достаточно агломерировать, чтобы сделать их быстрорастворимыми, поэтому было разработано множество технологий агломерации порошков, состоящих из одиночных частиц – таких, которые обычно производятся установками с системой пневмотранспорта, описанными на стр. 116 и 141.

Первые разработки были выполнены Дэвидом Д. Пиблсом (David D. Peebles) в начале пятидесятых, а в 1954 на рынке появилось быстрорастворимое обезжиренное сухое молоко. Вскоре оно вытеснило обычный продукт распылительной сушки с розничного рынка. Инстантайзер Пиблса представлен на рис. 91.

Другой пример установки увлажняющей агломерации показан на рис. 92. Этот метод был разработан Нестле для агломерации сухого молока, шоколадных напитков и супов. При агломерации сухого обезжиренного молока танк (1) заполнен 10 % раствором сухого обезжиренного молока, охлажденным до 6 °C. Жидкость распыляется под давлением 20 бар посредством насоса (2) и форсунки (3), которая создает плоскую струю, имеющую скорость до 8 м/с. Сухое обезжиренное молоко подается вибровинтовым конвейером (4) и распыляется над струей, при контакте с которой частицы достаточно увлажняются (до 10-15 %), чтобы стать липкими, так что их столкновение в камере (5) приводит к агломерации. Затем порошок сушится (6) при температуре 90 °C до влажности 3 % и упаковывается в мешки.

Основные особенности процесса увлажняющей агломерации:

- смачивание поверхности частиц
- агломерация
- повторная сушка
- охлаждение
- сортировка

### **Увлажнение**

Поверхность частиц смачивают влажным воздухом, паром или распыленной водой – чистой или содержащей сухое молоко, сахар или иные растворимые компоненты. Вода может также содержать добавки, такие как витамины (водорастворимые), минералы, красители или поверхностно-активные вещества. Увлажняющий агент можно распылять форсунками или роторным распылителем. В случае роторного распылителя с двумя питающими трубами можно использовать комбинацию пара и воды или двух увлажнителей, которые по каким-либо причинам нельзя смешивать.

Если продукт нерастворим, в увлажнитель можно добавить связующее. Это позволяет агломерировать даже такие продукты, которые не поддаются агломерации иными способами.

### **Агломерация**

Вызванное турбулентностью столкновение влажных липких частиц и их слипание в агломераты – существенная часть увлажняющей агломерации.

Поскольку порошки разного состава ведут себя при увлажнении и агломерации не одинаково, они требуют различного оборудования для оптимального проведения процесса.

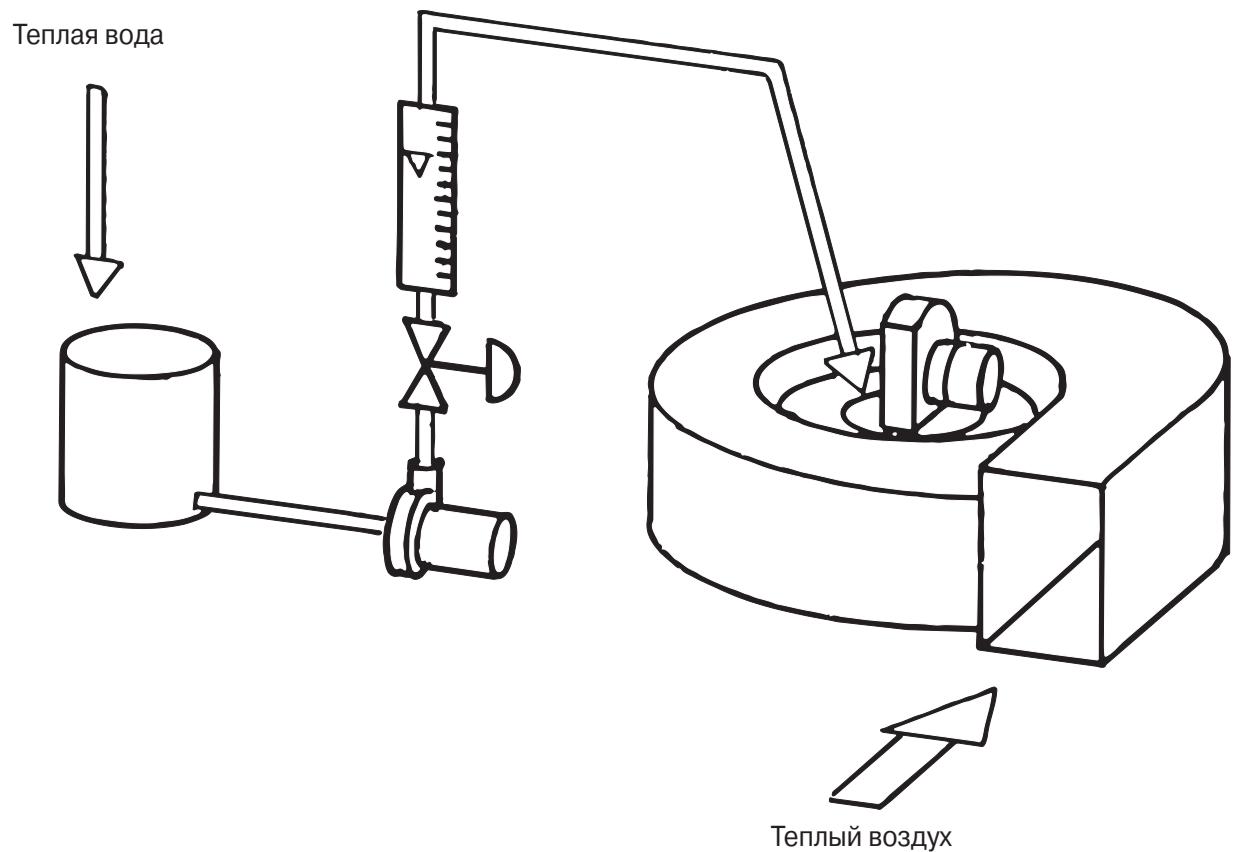


Рис. 93 Система питания для установки увлажняющей агломерации  
(смачивание теплой водой, разбрьзгиваемой распылителем).

В принципе, есть два способа агломерации:

- капельная агломерация
- поверхностная агломерация

### Капельная агломерация

В этом процессе агломерации взвешенные в воздухе частицы смачиваются каплями жидкости, распыленной форсункой или роторным распылителем, см. рис. 93. Порошок подается либо в зону вокруг роторного распылителя или форсунки (самотеком или нагнетательным пневмоконвейером), либо снизу (нагнетательным пневмоконвейером).

Агломерация происходит при столкновении в воздухе смоченных и имеющих липкую поверхность частиц. Достигая стенки, агломераты скатываются вниз, и на этом процесс агломерации прекращается.

Капельную агломерацию можно также выполнять, распыляя увлажнитель через форсунки над виброожиженным слоем в аппарате Vibro-Fluidizer. Для получения устойчивых агломератов порошок должен содержать связующий материал, такой как углеводы.

Некоторые порошки (с высоким содержанием жира или сахара) при смачивании становятся настолько липкими, что в конической части агломерационной камеры образуются большие отложения. Для их удаления требуется вращающийся скребок или аналогичное устройство. Другое и более эффективное решение – неподвижный скребок, снимающий отложения с медленно вращающейся конической части агломерационной камеры. Вращающаяся камера используется для агломерации порошков, содержащих зерновые и крахмал, таких как детское питание.

Капельная агломерация особенно широко применяется для обработки порошков, содержащих жир (цельное сухое молоко) или большое количество сахара (шоколадные молочные смеси). Для получения цельного сухого молока, быстрорастворимого в холодной воде, необходимо установить дозатор лецитина между двумя аппаратами Vibro-Fluidizer (см. стр. 227). Однако качество готового продукта не будет таким же высоким, как при производстве на сушильной установке, оборудованной системой возврата мелочи, аппаратами псевдоожиженного слоя и дозатором лецитина.

### Поверхностная агломерация

При поверхностной агломерации увлажнителем служит либо пар, либо теплый воздух с высокой относительной влажностью. Поверхность холодных сухих частиц смачивается в результате конденсации водяных паров, и частицы становятся липкими. Агломерация происходит, если такие частицы подвергаются достаточно сильному механическому воздействию. Такое воздействие может быть достигнуто, например, в завихрителе, куда увлажнитель подается тангенциально, а порошок – по центральной оси. Очень важно, чтобы увлажняющий воздух или пар не содержал капель воды, так как интенсивное механическое воздействие на чрезмерно увлажненный продукт приведет к получению слишком плотного плохо растворяющегося агломерата.

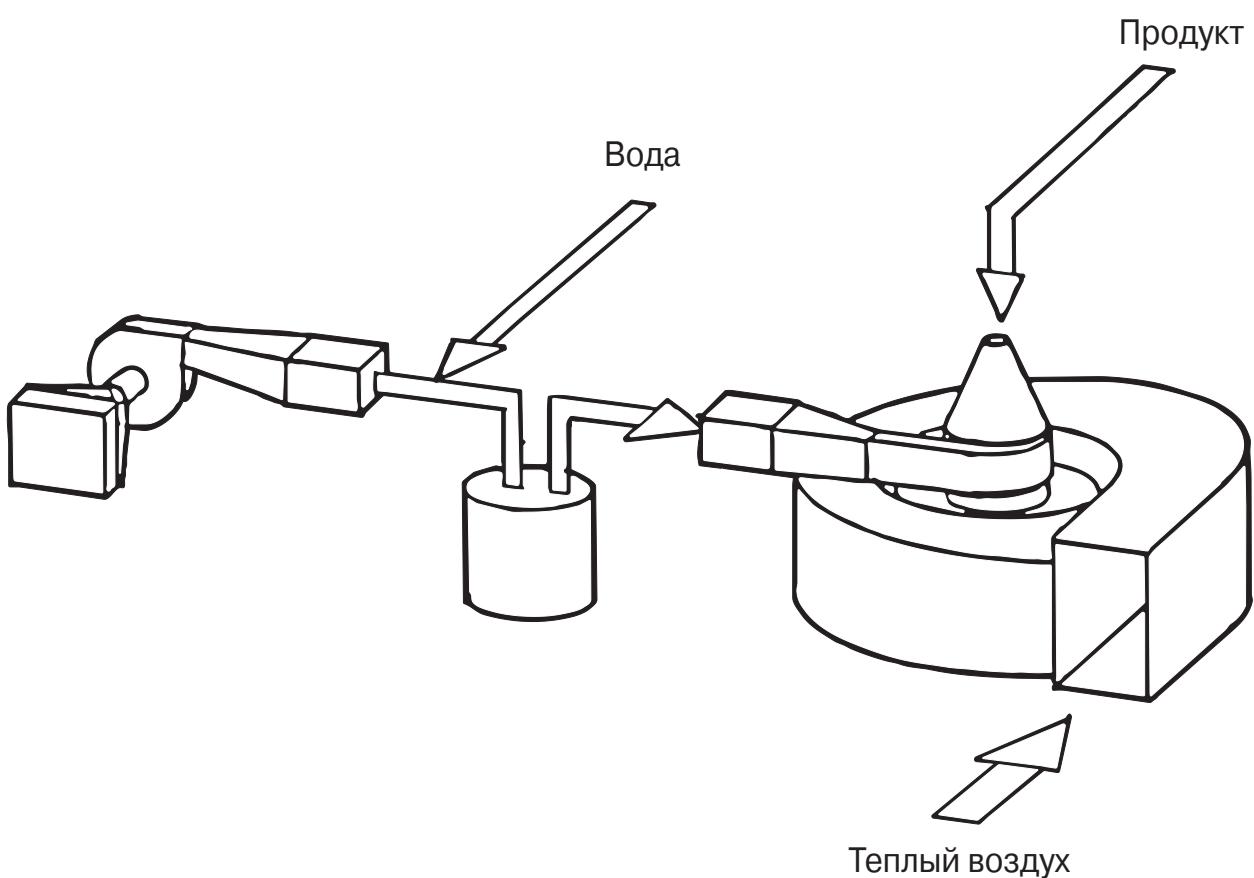


Рис. 94 Система питания для установки увлажняющей агломерации. Увлажнение теплым влажным воздухом.

Теплый влажный воздух обычно получают инжекцией пара в теплый воздух (при определенной температуре), так чтобы достичь относительной влажности 100 %. Капли удаляются в конденсаторе, после чего воздух дополнительно нагревается до достижения требуемой влажности. Регулируя температуру воздуха перед инжекцией пара и температуру после подогрева, можно получить воздух требуемой температуры и влажности. См. рис. 94.

Поверхностная агломерация применяется, в основном, для получения крупных агломератов сухого обезжиренного молока. Свойства готового продукта в большой степени зависят от того, какой материал подвергается агломерации. Ниже приведены технические условия на рекомендуемый для этой цели порошок:

Насыпная плотность при встряхивании 1250 раз:	0,80 г/см <sup>3</sup>
Индекс азота сывороточного белка:	2-3 мг/г порошка *)
Индекс растворимости:	≤ 0,1 мл
Плотность частиц:	1,35 г/см <sup>3</sup>
Средний размер частиц:	около 50 мкм
Доля частиц крупнее 100 мкм:	не более 25 %

\*) соответствует температуре пастеризации перед выпариванием ≈ 90 °C

Поверхностная агломерация может применяться и для обработки сухого цельного молока, но при этом получается слишком плотный агломерат, который трудно восстанавливает влагосодержание.

### ***Повторная сушка***

Поскольку для агломерации порошок увлажняют, чтобы сделать частицы липкими, эту дополнительную влагу затем требуется испарить.

Слишком сильное механическое воздействие, такое как в пневмотранспортной системе, может вновь разрушить агломераты. Поэтому сушку необходимо выполнять в аппарате Vibro-Fluidizer, как отмечалось на стр. 119. Но поскольку загружаемый в Vibro-Fluidizer увлажненный порошок можно сравнить с мокрым снегом, для его псевдоожижения требуется относительно высокая скорость воздуха. В противном случае образуются комки, и эффективность сушки снижается.

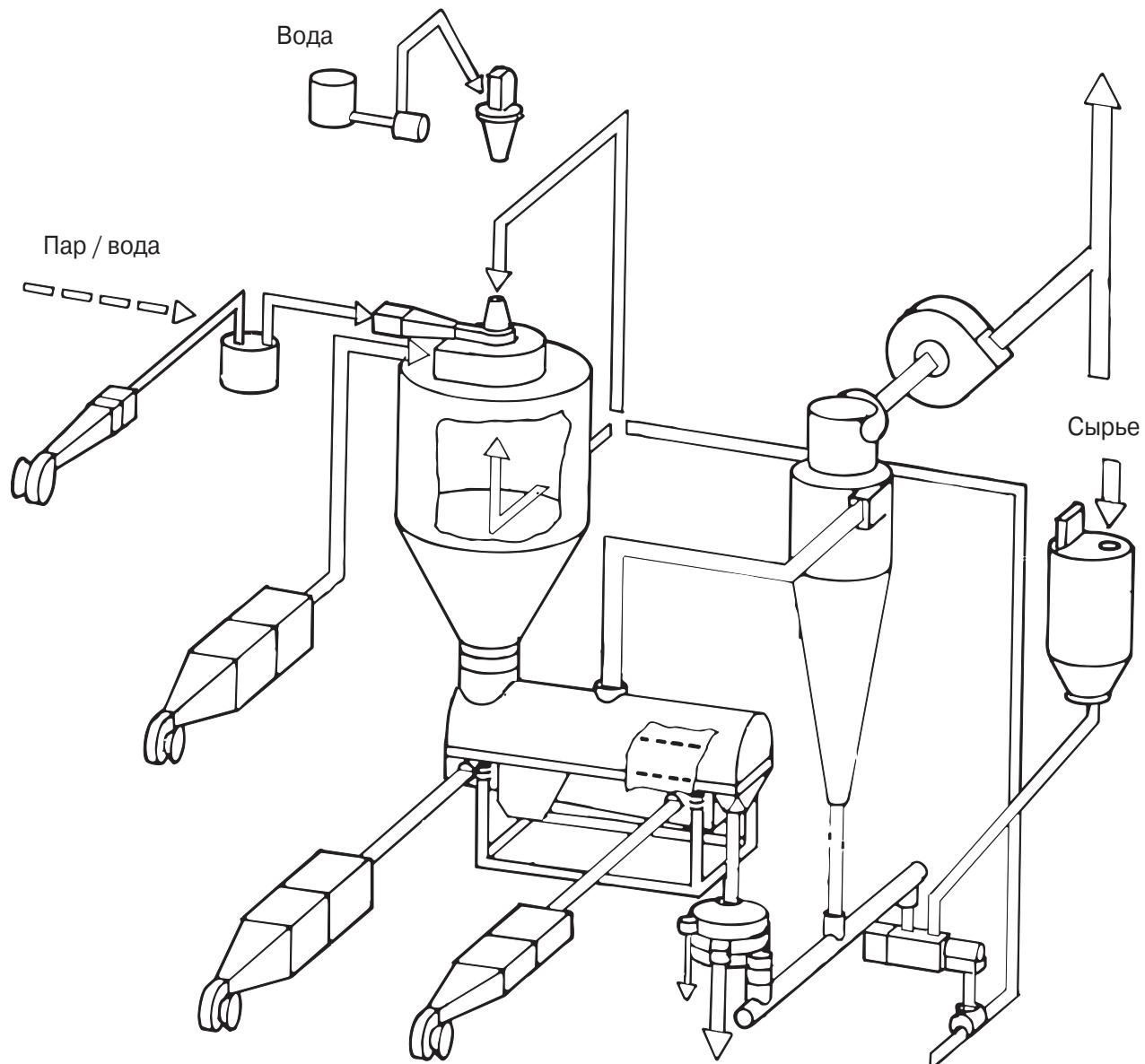


Рис. 95 Многоцелевая установка увлажняющей агломерации Niro.

### **Охлаждение**

Как и повторную сушку, охлаждение рекомендуется проводить в аппарате Vibro-Fluidizer.

### **Сортировка**

Обычно существуют четкие требования в отношении распределения размеров готового агломерата. Поэтому продукт требуется просеивать. Это делается на двух, расположенных одно под другим, ситах с разным размером ячеек. Это позволяет отделить от готового продукта слишком крупные агломераты и комки. Этот крупный продукт можно размоловать и вернуть в процесс. Отсев с верхнего сита разделяется на нижнем сите на основной продукт и мелочь, состоящую из одиночных частиц и недостаточно крупных агломератов. Эта фракция мелочи, как и фракция из циклона аппарата Vibro-Fluidizer, возвращается в процесс.

Система подачи порошка состоит из бункера и винтового конвейера с переменной частотой вращения. Порошок через продуваемый секционный затвор поступает в пневмотранспортную линию высокого давления и подается в блок агломерации.

Как правило, установки увлажняющей агломерации делают пригодными для обработки разных продуктов. Поэтому в одной установке часто объединяют оборудование и для капельной, и для поверхностной агломерации. Вращающееся коническое дно легко встраивается в установку, что позволяет агломерировать любые продукты на основе молока. Если требуется получать жирсодержащие продукты, растворимые в холодной воде, установку легко оснастить оборудованием для ввода лецитина. На рис. 95 показана технологическая схема установки увлажняющей агломерации фирмы NIRO, которая может реализовать все упомянутые способы агломерации.

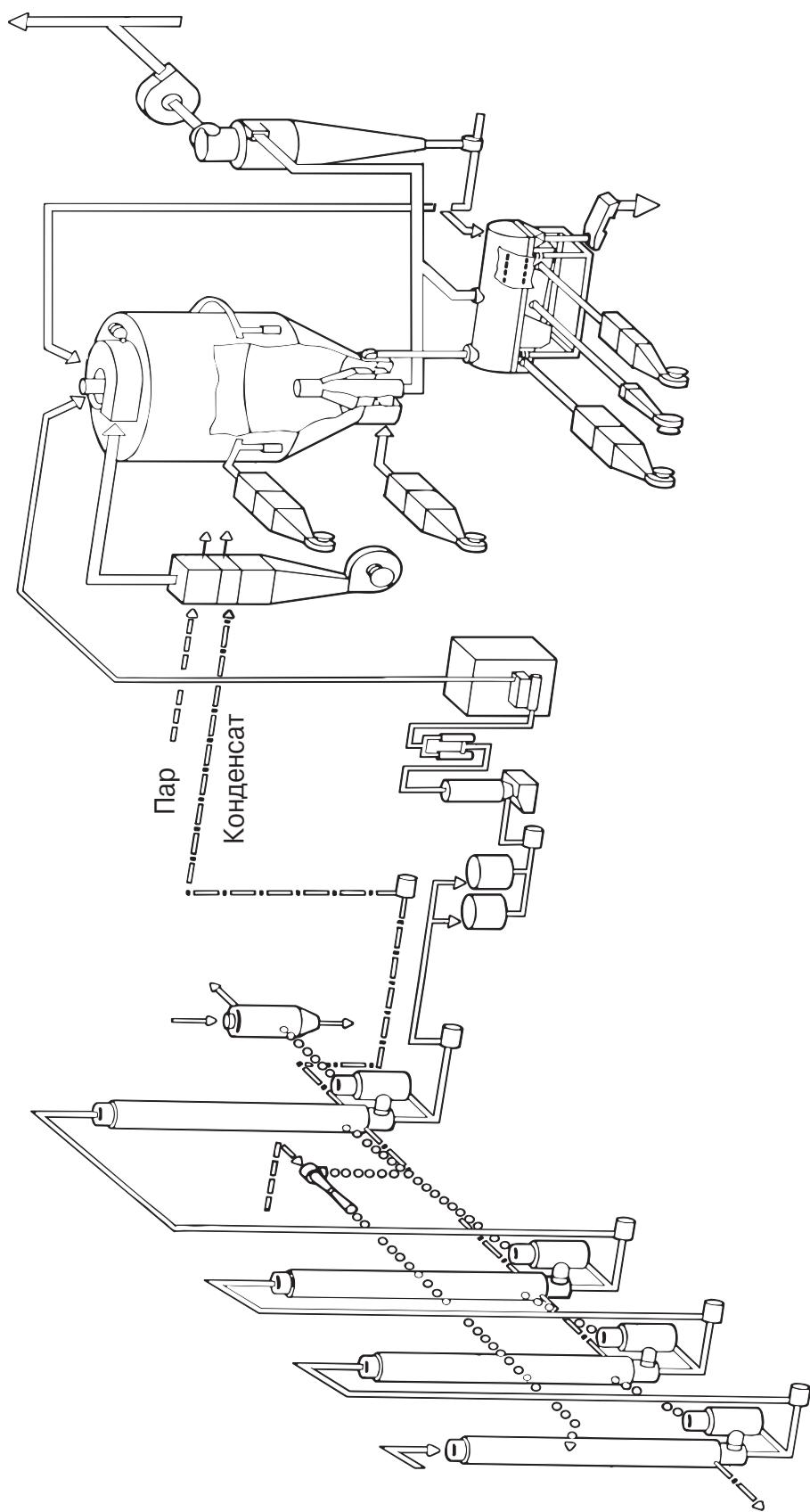


Рис. 96 Подогрев конденсатом.

# Экономия тепла в линии по производству сухого молока

---

После обсуждения основных факторов, влияющих на экономию тепла в отдельных машинах и аппаратах, мы можем рассмотреть всю производственную линию, которая сбрасывает в окружающую среду значительное количество тепла в форме теплого конденсата из выпарного аппарата и теплого воздуха из распылительной сушилки. Есть несколько способов утилизации этой энергии:

- Подогрев
- Рекуперация теплоты
- Другие средства экономии энергии

## Подогрев

### Подогрев сушильного воздуха конденсатом

Из выпарного аппарата с механической компрессией выгружается значительное количество конденсата с температурой от 50 до 70 °C, в зависимости от того, на какой стадии выпаривания он образуется.

Простой способ утилизации этой энергии заключается в подогреве сушильного воздуха. Конденсат из первого корпуса выпарного аппарата с температурой около 70 °C обычно возвращают в паровой котел в качестве питательной воды. Преимущества такой воды в том, что она теплая и мягкая. Но конденсат из последних корпусов также можно использовать. Его обычная температура 56 °C, см. рис. 96.

Четырехкорпусной выпарной аппарат, работающий в комплексе с двухступенчатой распылительной сушилкой с температурой сушки 230 °C, см. стр. 141, производит около 12000 кг/ч конденсата с температурой 56 °C.

Подогрев сушильного воздуха до 47 °C снижает расход мазута до 170 кг/ч, однако потребуется установить более мощные насос конденсата и приточный вентилятор для преодоления возросшего гидравлического сопротивления системы. Общая экономия энергии иллюстрируется следующими данными:

Окружающий воздух подогревается от 10 до 47 °C

Конденсат охлаждается от 56 до 32 °C

Без подогревателя

Расход топлива:	205 кг/ч
Расход пара:	167 кг/ч
Расход электроэнергии:	152 кВт
соответствует 1280 ккал/кг порошка	

С подогревателем

Расход топлива:	170 кг/ч
Расход пара:	167 кг/ч
Расход электроэнергии:	159 кВт
соответствует 1090 ккал/кг порошка	

т.е. фактическая экономия составляет 15 %.

Другое преимущество состоит в том, что конденсат охлаждается до 32 °C и его можно направлять непосредственно на станцию очистки сточных вод, где слишком высокая температура недопустима.

По сравнению с одноступенчатой сушилкой экономия энергии составляет 32 %.

В выпарных аппаратах с термокомпрессией, где молоко в результате подогрева и тепловой обработки нагревается от 5 до 72 °C, мощность компрессора обеспечивает только выпаривание, и выходная температура концентрата ≈ 50 °C, а конденсата ≈ 10 °C. Только в том случае, если тепловая обработка ведется при температуре выше 72 °C (за счет дополнительного расхода пара), температура конденсата будет достаточно высока для подогрева сушильного воздуха.

## **Подогрев сушильного воздуха вторичным паром из выпарного аппарата**

Вторичный пар из последнего корпуса выпарного аппарата (с температурой 45-50 °C) обычно проходит через теплообменник “труба в трубе”, где охлаждается, нагревая поступающий холодный продукт, затем подается в конденсатор, где конденсируется холодной водой из градирни или из природного источника.

Напрашивается мысль использовать для этой цели вместо холодной воды сушильный воздух, т.е. одновременно конденсировать вторичный пар и подогревать сушильный воздух.

Четырехкорпусной выпарной аппарат, работающий в комплексе с двухступенчатой распылительной сушилкой с температурой сушки 230 °C, см. стр. 149, производит приблизительно 800 кг/ч вторичного пара с температурой около 47 °C. Однако воздух с температурой 10 °C при расходе 31 500 кг/ч позволяет конденсировать только 400 кг/ч. Поэтому потребуется дополнительный водяной конденсатор. Другое неудобство этой системы в том, что такой дополнительный конденсатор должен иметь достаточную производительность, чтобы справляться с возросшей нагрузкой при увеличении температуры окружающего воздуха. Кроме того, при пуске выпарного аппарата должны работать, по крайней мере, вентиляторы сушилки, чтобы обеспечить стабильные условия в выпарном аппарате. Поэтому такой способ экономии энергии в распылительной сушилке на практике не используется, но описан здесь, поскольку он запатентован.

# Рекуперация тепла

## Скруббер

Тепло отработанного воздуха можно утилизировать различными способами. Если скруббер (см. стр. 107) использует молоко или сыворотку в качестве абсорбента, одновременно с промывкой происходит испарение. Конечно, основное назначение скруббера – удалить порошок из отработанного воздуха во избежание загрязнения атмосферы. Однако отработанный воздух охлаждается в скруббере до температуры смоченного термометра, т.е. 45 °C, таким образом, его тепло используется для предварительного выпаривания молока перед подачей в выпарной аппарат. Скруббер вносит существенный вклад в экономию тепла при производстве сухого молока, эта экономия вместе с возвратом продукта оправдывает эксплуатационные расходы и увеличивает окупаемость капиталовложений.

Процесс выпаривания иллюстрируется I-X диаграммой. См. рис. 97. Начальная точка процесса отражает состояние воздуха на входе в скруббер. Этот воздух содержит влагу, отчасти поступившую с наружным воздухом (его обычное влагосодержание – 7 г/кг сухого воздуха), отчасти – в результате испарения при сушке (42 г/кг сухого воздуха для рассмотренного на странице 141 примера с двухступенчатой распылительной сушилкой, работающей при 230 °C). Суммарное влагосодержание – 50 г/кг сухого воздуха (точка А). Если температура на выходе сушилки – входе скруббера равна 80 °C, а на выходе из скруббера – 50 °C, влагосодержание воздуха на выходе скруббера составит 65 г/кг сухого воздуха (точка В), поскольку процесс идет по адиабате. Следовательно, испарение составит  $65 - 50 = 15$  г влаги / кг сухого воздуха.

Поскольку расход воздуха, включая воздух из аппарата Vibro-Fluidizer, составляет 42000 кг/ч, испарение в скруббере равно 630 кг/ч, т.е. 3,5 % от общего испарения.

Однако экономия тепла достигается только при условии, что абсорбентом служит продукт – обезжиренное молоко или сыворотка. При производстве сухого цельного молока абсорбентом служит вода.

Температура в скруббере создает благоприятные условия для роста бактерий. Поэтому скруббер можно использовать лишь при условии, что это не помешает производству персортного молока. Если установка эксплуатируется согласно инструкции, которая предусматривает промежуточную чистку через 10 часов работы, бактериальное обсеменение будет минимальным, т.к. это время значительно меньше времени развития бактерий.

Как и подогрев воздуха конденсатом, использование скруббера дает комплекс преимуществ, поскольку скруббер не только утилизирует тепло, но и очищает воздух и обладает существенной производительностью по испарению. Однако часть этих преимуществ теряется, поскольку каждые 10 часов требуется выполнять чистку. Поэтому скрубберы с продуктом в качестве абсорбента не часто применяются в молочной промышленности.

Все вышеупомянутые системы энергосбережения, кроме двухступенчатой сушки, требуют совместной работы выпарного аппарата и распылительной сушилки. Однако бывают ситуации, когда работает только распылительная сушилка. Поэтому были разработаны рекуператоры тепла, работающие только с распылительной сушилкой.

## Рекуператоры тепла

Рекуператор позволяет использовать тепло отработанного воздуха распылительной сушилки, имеющего температуру 80-95 °C, например, для подогрева сушильного воздуха.

Но ее можно применять и для нагрева моющей жидкости или для обогрева помещений. Ниже обсуждается только вариант подогрева сушильного воздуха.

В принципе существует две системы рекуперации тепла:

- воздух-воздух
- воздух-жидкость-воздух

Обе системы устанавливаются после сепаратора мелочи. Для повышения эффективности теплообмена можно установить также рукавный фильтр, поскольку даже при оптимальном подборе скорости воздуха сепаратор не позволяет полностью исключить отложения на теплообменной поверхности. Рекуператор можно эксплуатировать несколько дней без чистки, но если чистка необходима, для этой цели в аппарат встраивается система безразборной мойки.

Если рекуператор охлаждает отработанный воздух ниже температуры конденсации (которая зависит от влагосодержания воздуха), то энталпия конденсации тоже используется для подогрева. В этом случае рукавный фильтр перед рекуператором необходим для предотвращения отложений на границе влажной зоны. Такой рекуператор обеспечивает еще большую экономию по сравнению с рассмотренным ниже случаем, в котором конденсация не предусмотрена.

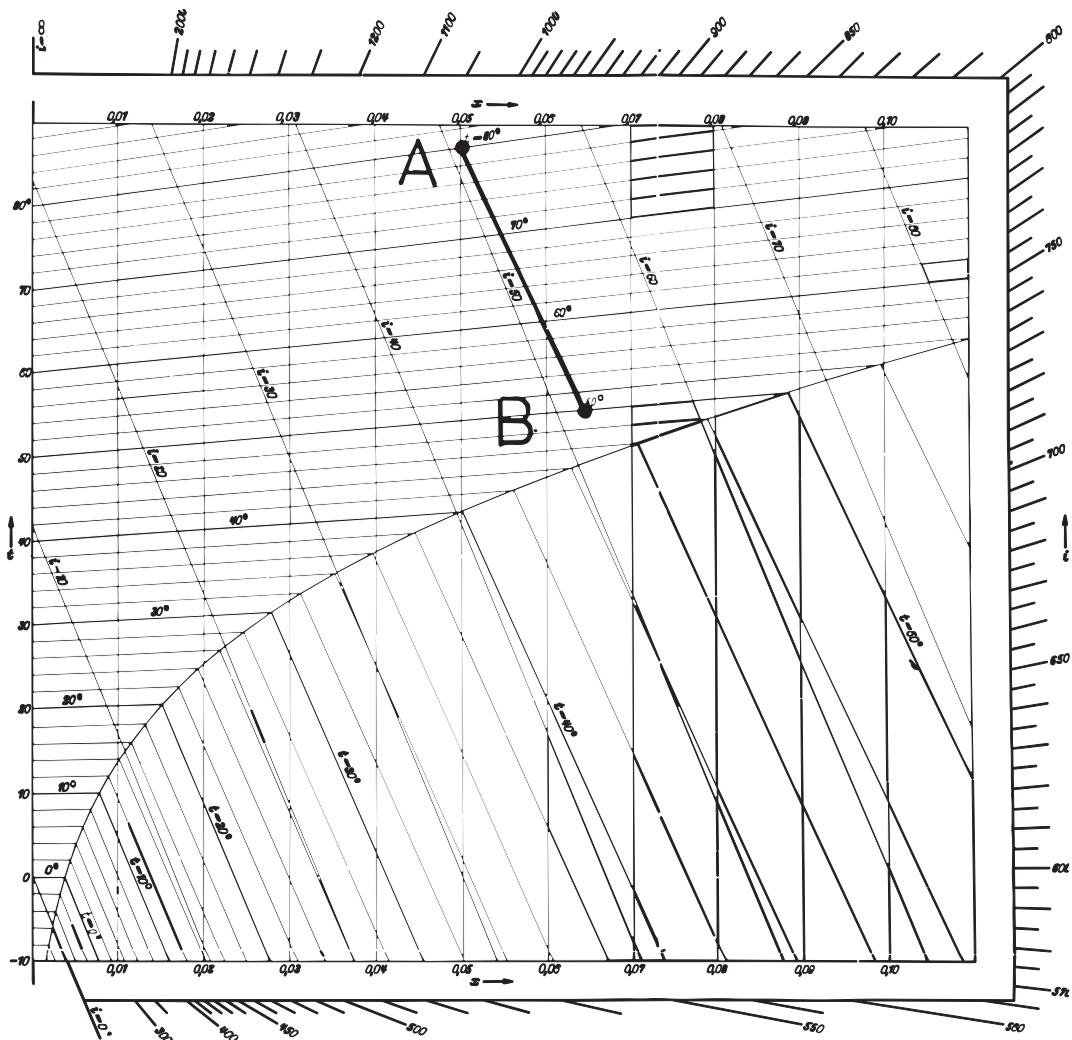


Рис. 97 Диаграмма энталпия-влагосодержание для системы воздух-вода (набор адиабат для температуры воды 45 °C).

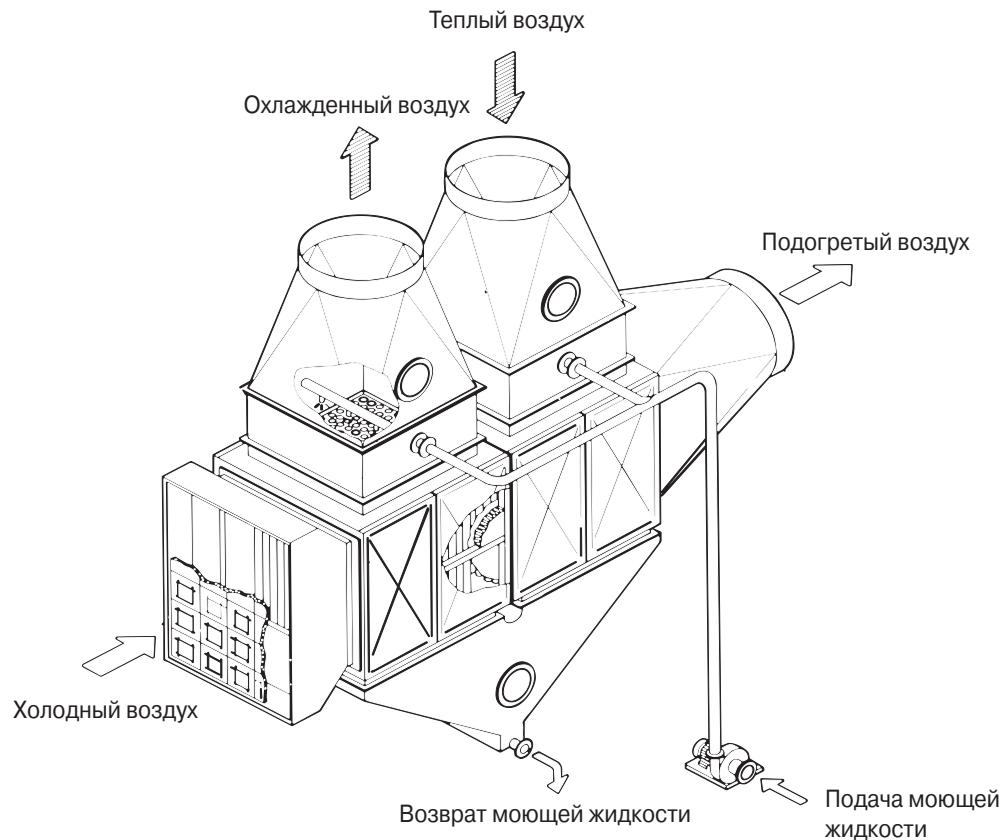


Рис. 98 Рекуператор воздух-воздух.

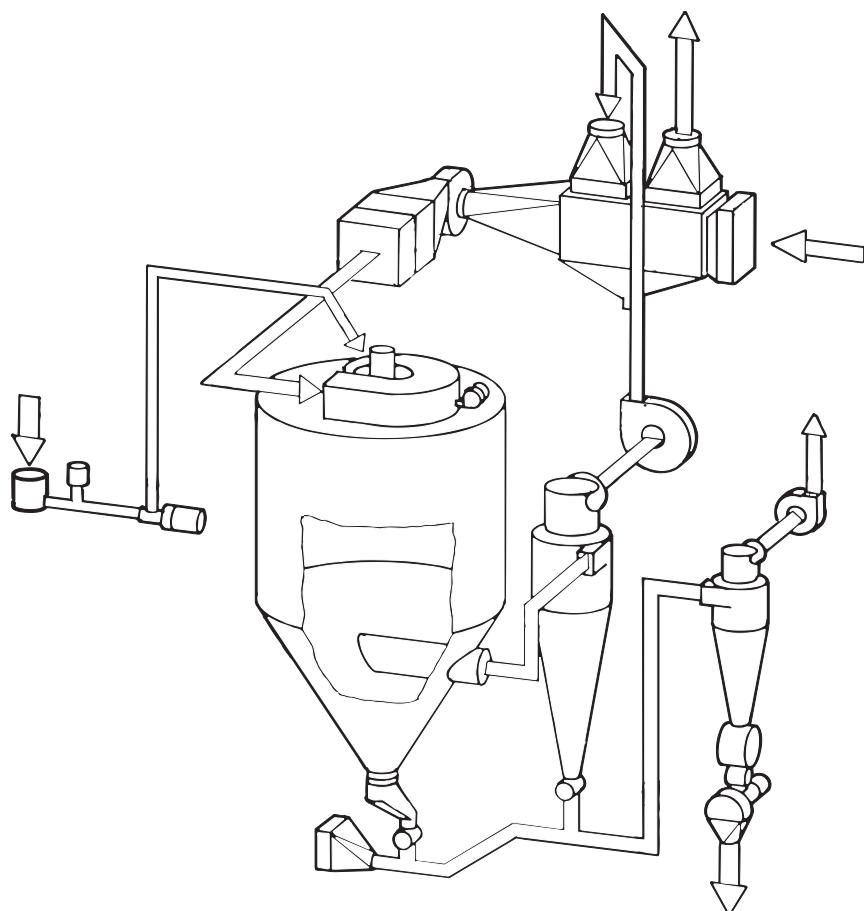


Рис. 99 Одноступенчатая распылительная сушилка с рекуператором воздух-воздух.

### *Рекуператор воздух-воздух*

В рекуператорах воздух-воздух, см. рис. 98, сушильный воздух подогревается отработанным воздухом, движущимся через теплообменник в противотоке. Теплообменник представляет собой пучок труб, внутри которых течет отработанный теплый воздух, а снаружи – приточный холодный воздух.

Встраивание такого оборудования в уже действующую установку может оказаться трудным и дорогим делом, если для этого потребуются длинные воздуховоды большого диаметра, которые без теплоизоляции будут терять сбереженное тепло.

Новые установки легче оснастить такими рекуператорами, так как их проектируют с учетом минимизации длины воздуховодов. См. рис. 99.

Температура, до которой можно подогреть воздух, зависит от температуры выходящего воздуха. Поэтому такой тип рекуператора больше всего подходит для одноступенчатой распылительной сушилки, где выходящий воздух имеет высокую температуру. Ниже даются расчеты для одноступенчатой сушилки, параметры которой указаны на странице 141.

Окружающий воздух подогревается от 10 до 52 °C

Выходящий воздух охлаждается от 93 до 51 °C

#### Без рекуператора

Расход топлива: 175 кг/ч

Расход электроэнергии: 120 кВт

соответствует 1595 ккал/кг порошка

#### С рекуператором

Расход топлива: 140 кг/ч

Расход электроэнергии: 135 кВт

соответствует 1305 ккал/кг порошка

т.е. фактическая экономия составляет 18%.

### *Рекуператор воздух-жидкость-воздух*

Другая система, более удобная для монтажа, это рекуператор типа воздух-жидкость-воздух, см. рис. 100. Данная система представлена двумя теплообменниками, между которыми циркулирует промежуточный теплоноситель, например, вода. См. рис. 100а. В условиях холодных зим, когда температура теплоносителя может опускаться ниже нуля градусов, в воду добавляют антифриз. Поскольку коэффициент теплообмена для пары сред воздух-вода выше, чем для пары воздух-воздух, такая система эффективнее, чем рекуператор типа воздух-воздух, несмотря на наличие двух теплообменников.

Теплообменник для выходящего воздуха представляет собой пучок труб, внутри которых движется запыленный воздух. По межтрубному пространству в противотоке движется вода. Приточный воздух нагревается в обычном теплообменнике из оребренных труб. Для циркуляции воды используется центробежный насос.

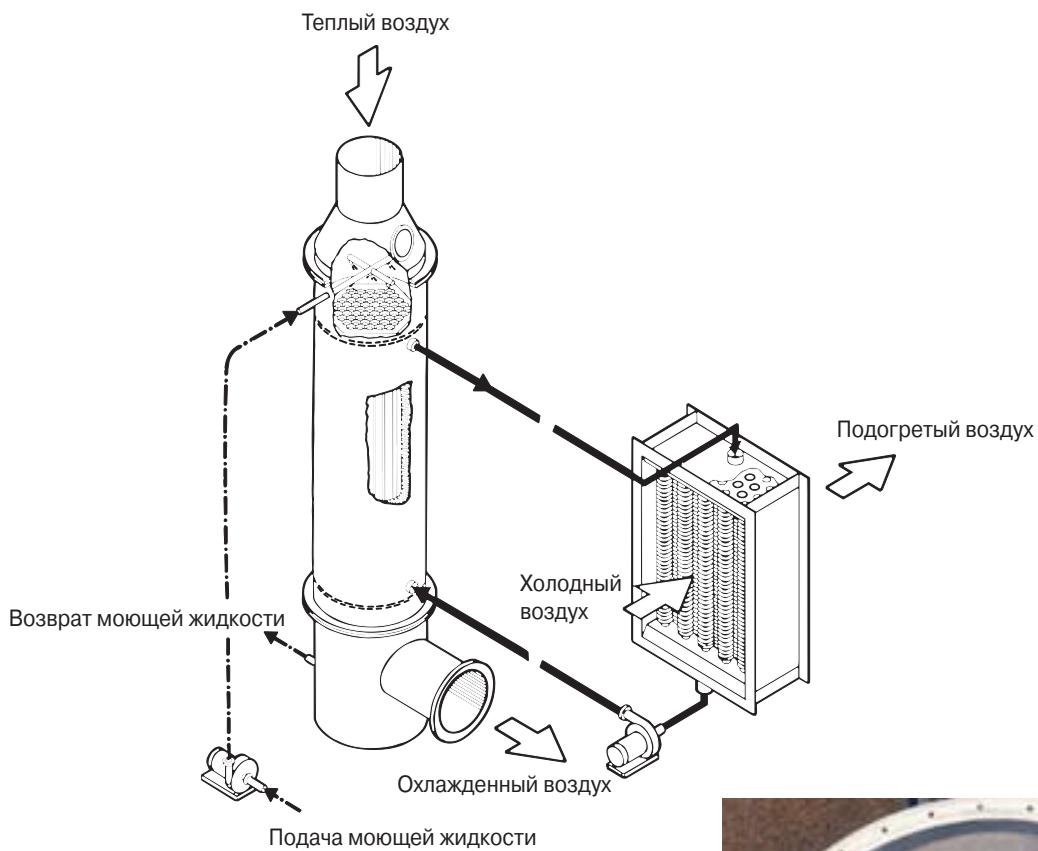


Рис. 100 Рекуператор воздух-жидкость-воздух.

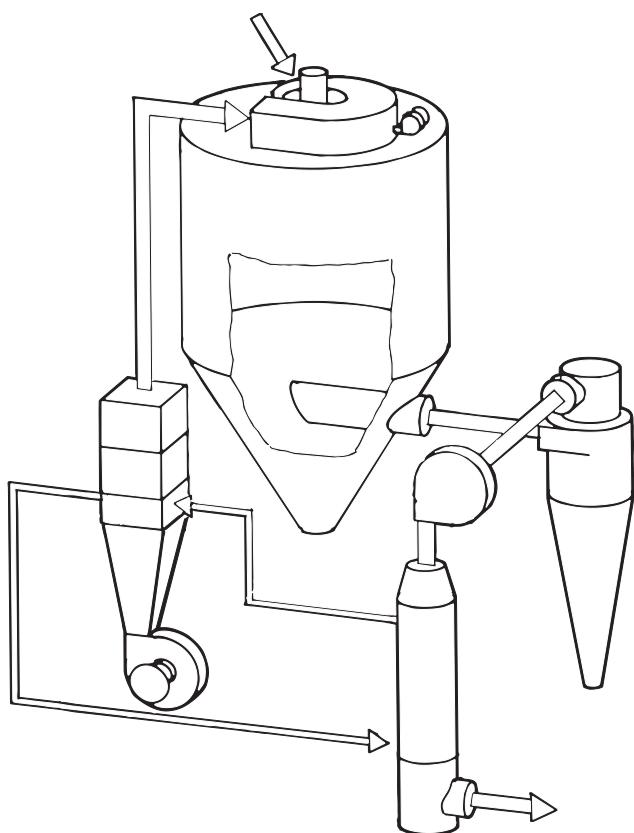
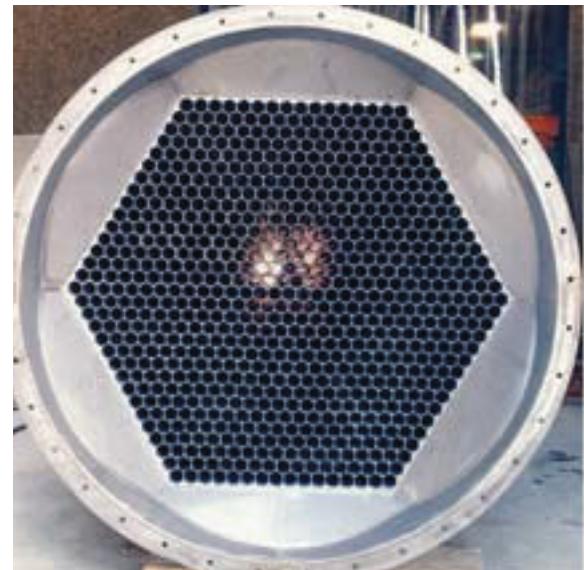


Рис. 100а Одноступенчатая распылительная сушилка с рекуператором воздух-жидкость-воздух.

Ниже приведен расчет экономии энергии при установке такого рекуператора на одноступенчатой сушилке:

Окружающий воздух подогревается от 10 до 60 °C  
Выходящий воздух охлаждается от 93 до 44 °C

Без рекуператора

Расход топлива:	175 кг/ч
Расход электроэнергии:	120 кВт
соответствует 1595 ккал/кг порошка	

С рекуператором

Расход топлива:	130 кг/ч
Расход электроэнергии:	142 кВт
соответствует 1225 ккал/кг порошка	
т.е. фактическая экономия составляет 23%.	

Если воздух нагревается мазутной или газовой горелкой, жидкий теплоноситель, после того как он отберет теплоту у отработанного воздуха, можно направлять в теплообменник, расположенный в канале продуктов горения, это дополнительно увеличивает экономию энергии.

## Другие средства экономии энергии

На стадии проектирования завода по производству сухого молока можно предусмотреть такой простой способ подогрева сушильного воздуха, как размещение воздухозаборных фильтров внутри помещения, где установлена сушилка. В таком случае приточный воздух поглощает тепло, излучаемое сушилкой и, возможно выпарным аппаратом и другим оборудованием, особенно если приток воздуха в помещение осуществляется сверху, а фильтры расположены внизу, или наоборот. Недостаток этого способа заключается в том, что в случае проникновения холодного наружного воздуха и охлаждения, например, циклонов, возникает опасность конденсации и отложений. Кроме того, приточный воздух поглощает не только теплоту, но и влагу, что увеличивает температуру воздуха на выходе, т.е. снижает теплоемкость.

Если применяется поверхностный нагреватель воздуха с мазутной или газовой горелкой, непосредственно на него можно установить рекуператор для передачи тепла продуктов горения рабочему воздуху. Продукты горения обычно имеют температуру  $\geq 300$  °C, но их расход невелик; кроме того, всегда существует опасность утечки в теплообменнике и попадания продуктов горения в рабочий воздух. Вместо этого можно использовать теплообменник с циркуляцией воды.

Все вышеуказанные теплообменные системы работают на одинаковом уровне температур и потому не могут применяться совместно.

Другой способ экономить энергию – пускать оборудование, необходимое для производства сухого молока, в правильной последовательности, т.е. не включать распылительную сушилку слишком рано, когда концентрат еще не готов, поскольку во время такого ожидания теряется большое количество энергии. Такие проблемы решаются применением компьютерных систем управления, в том числе управления пуском.

Продаваемое сухое молоко должно отвечать требованиям в отношении предельного содержания влаги, для обезжиренного сухого молока это обычно 4 %. Во время хранения сухое молоко обязательно поглощает какое-то количество влаги, которое зависит от условий хранения и упаковочного материала. Поэтому изготовленное сухое молоко должно иметь более низкую влажность, чтобы компенсировать поглощение влаги при хранении. Не требуется объяснять, что чем ближе влажность произведенного продукта к допустимому уровню, тем больше экономия энергии, т.к. содержание влаги в порошке прямо связано с температурой на выходе. То есть, большее содержание влаги означает большую производительность на единицу энергии.

Выбор той или иной системы утилизации тепла определяется местными условиями, такими как стоимость пара, мазута и электроэнергии. Кроме того, нужно учесть различные нормы процентной ставки по кредиту. Каждый случай требует тщательных расчетов для выработки оптимального решения, которое обеспечит скорейшую окупаемость.

# Лабораторные методы контроля сырого молока, концентрата и сухого продукта

---

При промышленном производстве сухого молока продукт должен отвечать определенным бактериологическим, химическим и физическим нормам. Очевидно, что качество готового продукта зависит от качества молочного сырья. Поэтому для рентабельного производства важно получать первосортное молочное сырье и иметь возможность контролировать характеристики сырья и готового продукта, которые очень часто нормируются государственными постановлениями.

В этой главе дается описание большинства общепринятых методов анализа и тех изменений рабочих параметров, которые необходимо сделать, чтобы вернуть характеристики продукта к норме.

## Качество сырого молока

### Обезжиренное молоко

Молоко должно быть свежим и храниться при температуре не выше 5 °C не дольше 48 часов после дойки, а также не должно подвергаться никакой обработке, кроме:

- отделения сливок и примесей посредством центробежного сепаратора;
- одной тепловой обработки при температуре не выше 72 °C и длительности не более 15 с.

Молоко должно иметь качество “класса А” и не содержать никаких добавок или взвешенных частиц (при фильтровании через фильтр с ячейкой 100 мкм). Ниже приводятся типичные технические условия:

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| - Общее содержание сухих веществ:  | прибл. 9 %                                |
| - Колониеобразующие единицы (КОЕ): | не более 250000/мл                        |
| - Титр термофильных бактерий:      | не более 100/мл                           |
| - Титр термофильных спор:          | не более 10/мл                            |
| - Проба на осадок:                 | не более 0,5 мг                           |
| - pH:                              | от 6,6 до 6,8                             |
| - Титруемая кислотность:           | не более 0,15 % по молочной кислоте       |
| - Молочная кислота:                | не более 10 мг/100 г                      |
| - Содержание белка:                | 37...38 % по сухому обезжиренному остатку |
| - Содержание жиров:                | не более 0,05 %                           |
| - Неконденсирующиеся газы:         | не более 0,02 % вес.                      |

## Цельное молоко

Молоко должно быть свежим и храниться при температуре не выше 5 °C не дольше 48 часов после дойки, а также не должно подвергаться никакой обработке, кроме:

- отделения сливок и примесей посредством центробежного сепаратора;
- нормализации по содержанию жира посредством сепарирования сливок и (или) добавления обезжиренного молока;
- одной тепловой обработки при температуре не выше 72 °C и длительности не более 15 с.

Молоко должно иметь качество “класса А” и не содержать никаких добавок (кроме свежих сливок для нормализации) или взвешенных частиц (при фильтровании через фильтр с ячейкой 100 мкм). Ниже приводятся типичные технические условия:

- Общее содержание сухих веществ:	прибл. 12 %
- Колониеобразующие единицы (КОЕ):	не более 250 000/мл
- Титр термофильных бактерий:	не более 100/мл
- Титр термофильных спор:	не более 10/мл
- Проба на осадок:	не более 0,5 мг
- pH:	от 6,6 до 6,8
- Титруемая кислотность:	не более 0,15 % по молочной кислоте
Молочная кислота:	не более 10 мг/100 г
- Содержание белка:	37...38 % по сухому обезжиренному остатку
- Содержание жиров:	не более 28 % по сухому веществу
- Неконденсирующиеся газы:	не более 0,01% вес.

## Сладкая сыворотка

Сыворотка, полученная при производстве сыра из свежего коровьего молока и не содержащая добавок. Сыворотка подвергается одной предварительной обработке – отделению жира и нерастворимых частиц.

Типичные технические условия на сладкую сыворотку:

- Общее содержание сухих веществ:	прибл. 6 %
- Количество казеиновой пыли:	не более 200 мг/кг
- pH:	не менее 6,3
- Титруемая кислотность:	не более 0,12 % по молочной кислоте
Молочная кислота:	не более 20 мг/100 г
- Содержание жиров:	не более 0,05 %
- Содержание лактозы:	70...74 % по сухому обезжиренному остатку
- Содержание белка:	не менее 12 % по сухому обезжиренному остатку
- Содержание кальция:	не более 300 ppm
- Содержание магния:	не более 100 ppm
- Содержание хлоридов:	не более 1200 мг/л
- Неконденсирующиеся газы:	не более 0,02 % вес.

Если температура хранения сыворотки между сыроварней и выпариванием превышает 10 °C, время хранения не должно превышать 1 часа. Если температура хранения меньше 10 °C, его длительность не должна превышать десяти часов.

# Лабораторный контроль молочного сырья

## Кислотность (рН)

Показатель рН – это мера активности водородных ионов ( $H^+$ ) в водных растворах. Наиболее точно рН определяется электрометрически посредством рН-метра. Значение рН для нормального свежего молока от здоровых коров равно  $6,6 \pm 0,1$ . Значение выше 6,7 указывает на мастит, а ниже 6,5 – на присутствие молозива или бактериальное загрязнение. Молоко, отклоняющееся по рН, не принимается для производства сухого молока, поскольку его термоустойчивость, вероятно, понижена.

## Титруемая кислотность

Кислотность молока измеряется, например, титрованием 0,1 н раствором NaOH и выражается количеством NaOH, необходимым для сдвига значения рН от  $6,6 \pm 0,1$  (рН свежего молока) до 8,2...8,4 (интервал перехода фенолфталеина).

Молочная кислота – это органическая кислота с одной карбоксильной группой,  $CH_3-COOH$ , имеющая молекулярную массу 90. Следовательно, один мл 0,1 н NaOH соответствует

$$\frac{90 \times 0,1}{1000} = 0,009 \text{ г молочной кислоты}$$

Если на титрование идет, например, 14,5 мл 0,1 н NaOH, результат часто выражается таким способом:

$$14,5 \times 0,009 \approx 0,13 \% \text{ молочной кислоты} \quad (\text{см. рисунок 101}).$$

Однако свежее молоко практически не содержит молочной кислоты, и NaOH расходуется на нейтрализацию следующих компонентов:

Углекислота	соответствует	0,01 % молочной кислоты
Цитраты		- 0,01 % молочной кислоты
Казеин		- 0,07 % молочной кислоты
Альбумин, глобулин		- 0,01% молочной кислоты
Фосфаты		- 0,03% молочной кислоты
Титруемая кислотность	соответствует	0,13% молочной кислоты

Таким образом, определение “кислотности” свежего молока посредством титрования – это, скорее, измерение буферной емкости молока.

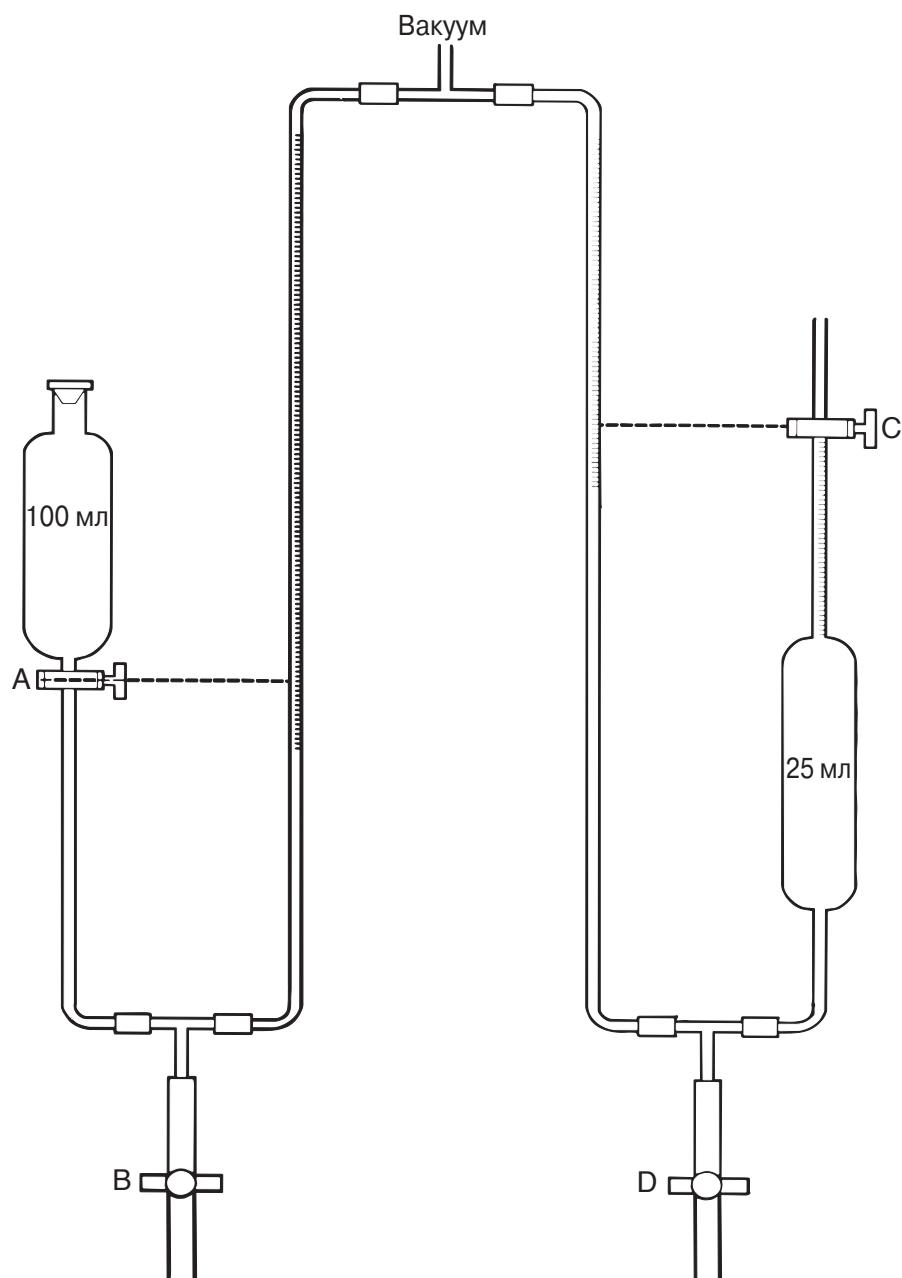


Рис. 102 Лабораторное оборудование для измерения содержания воздуха в концентрате молока.

Поэтому значение имеет дополнительная кислотность, которая образуется в результате деятельности вырабатывающих молочную кислоту бактерий во время сбора, транспортировки и обработки молока. Нет нужды говорить, что дополнительная кислотность будет выше, если молоко не охлаждается.

Чтобы избежать неопределенности в том, в какой степени титруемая кислотность обусловлена дополнительной кислотностью, следует непосредственно измерять содержание молочной кислоты. Это позволит определить, из-за какого оборудования развивается кислотность молока. Данная кислотность отражает не только активность бактерий, выживших при пастеризации, но и предшествующую активность бактерий, убитых при тепловой обработке.

## Лабораторный контроль концентрата молока

### Содержание воздуха в концентрате молока

Необходимо принять все меры, чтобы предотвратить попадание воздуха в концентрат, так как он нарушает предварительную обработку и сушку цельного молока.

Содержание воздуха в концентрате можно измерить с помощью оборудования, показанного на рис. 102. Аппарат вакуумируют при закрытой стеклянной пробке и кранах В, С и D и открытом кране А. Систему заполняют раствором NaCl, который всасывается в вакуумируемый аппарат, так что свободными остаются 100 мл сосуд для концентрата и 1-2 см<sup>3</sup> в мерной стеклянной трубке на "стороне воздуха". После этого тестируемый концентрат заливают в 100 мл сосуд, который вновь закрывается. Отмечают количество воздуха (1-2 см<sup>3</sup>) в "воздушном сосуде". Затем вновь включают вакуумный насос и медленно открывают кран А. По пропорции расширения "известного" количества воздуха в "воздушном сосуде" (объем воздуха в мерной стеклянной трубке) и расширения неизвестного количества воздуха в концентрате можно рассчитать содержание воздуха в мл на 100 мл концентрата. См. методы анализа Niro, № В 4 а.

### Растворимость

Индекс растворимости обычно измеряется для сухого молока, см. стр. 201. Но если, например, слишком низкая растворимость сухого молока не обусловлена нарушением нормального режима сушки, рекомендуется проверить растворимость концентрата. Необходимое для анализа количество концентрата рассчитывается следующим образом:

$$\text{г концентрата} = \frac{\text{г порошка, как и стр.104, x 100}}{\% \text{ с. в. концентрата}}$$

В остальном анализ выполняется, как для сухого молока.

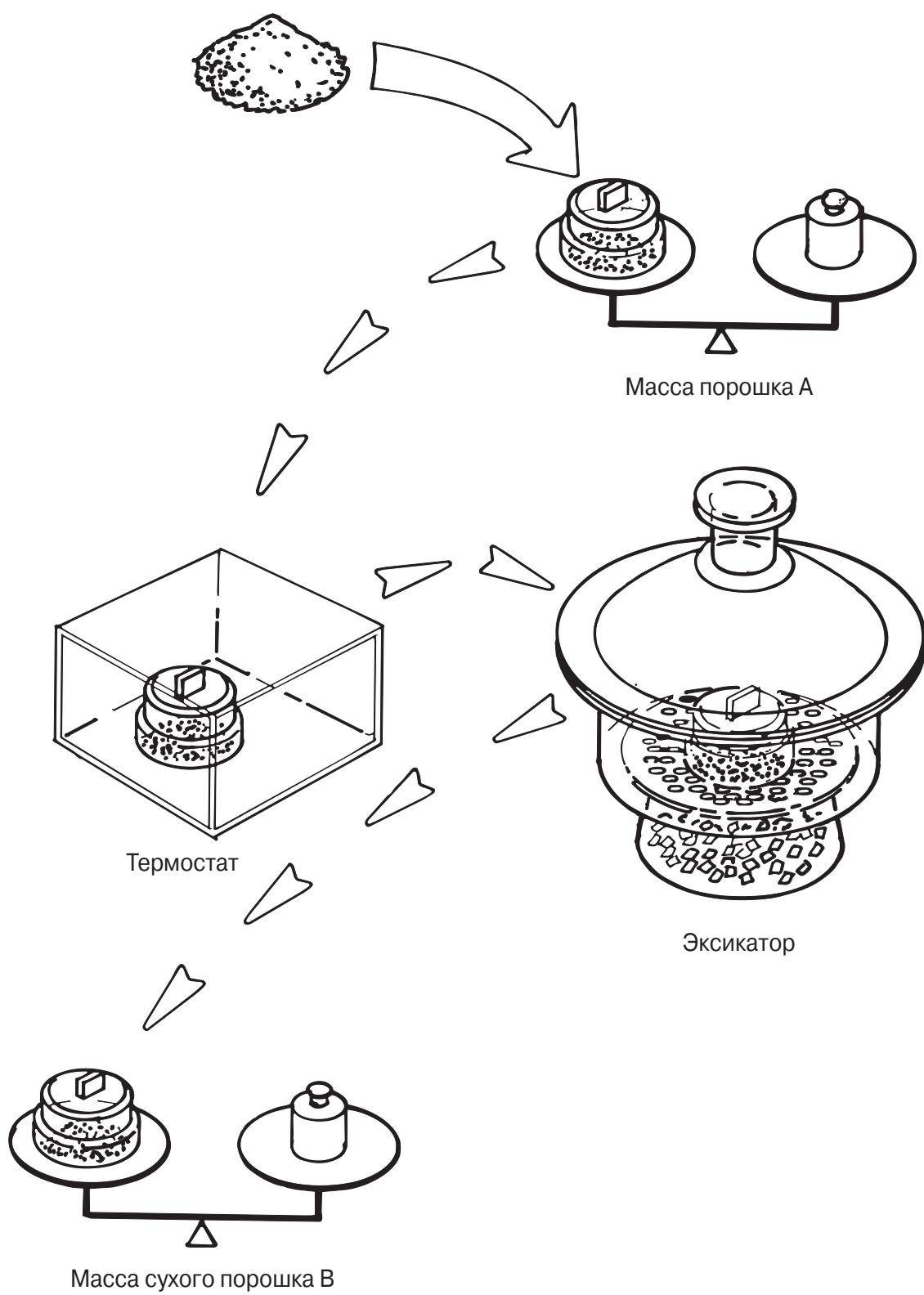


Рис. 103 Определение влажности.

## Пригорелые частицы

Этот анализ обычно проводится для сухого молока, см. стр. 202. Но если, например, слишком большое число пригорелых частиц не обусловлено нарушением нормального режима распылительной сушки, рекомендуется рассмотреть лабораторный фильтр под микроскопом. Если бурые частицы не имеют структуры, характерной для распыленных частиц, а представляют собой желеобразные комки, проблема, вероятно, связана с отложениями в трубах выпарного аппарата. В этом случае проверяется содержание пригорелых частиц в концентрате. Для анализа берется следующее количество концентрата:

$$\text{г концентрата} = \frac{\text{г порошка, как и стр.104, х 100}}{\% \text{ с. в. концентрата}}$$

В остальном анализ выполняется, как для сухого молока.

## Лабораторный контроль сухого молока

### Влагосодержание

Любое сухое молоко должно соответствовать требованиям в отношении остаточной влажности. Для обезжиренного молока это обычно 4 %, а для цельного – 2,5 %. Эти требования могут отличаться в разных странах.

Содержание влаги влияет на срок хранения сухого молока. Высокая влажность (высокая активность воды  $A_w$ ) уменьшает срок, поскольку способствует денатурации белков и переходу лактозы из аморфной в кристаллическую форму, из-за чего в цельном молоке увеличивается содержание свободных жиров, которые легко окисляются. Реакция Мейларда, т.е. реакция между  $\text{NH}_2$ -группами лизина (аминокислоты) и лактозой протекает интенсивнее, и порошок становится бурым и комковатым. Содержание продуктов реакции Мейларда прямо пропорционально времени хранения, температуре и остаточной влажности. Влажность можно регулировать, изменением температуры на выходе сушилки или подводом дополнительного тепла в Vibro-Fluidizer. Нужно избегать поглощения влаги порошком, в частности, в зонах с влажным климатом рекомендуется осушать охлаждающий воздух.

Упаковочный материал должен быть таким, который пропускает минимальное количество влаги. Поскольку диффузия водяных паров происходит всегда (а направление диффузии определяется давлением водяных паров), рекомендуется хранить порошок в сухом холодном месте, где давление водяного пара будет низким.

Остаточная влажность определяется простой сушкой в термостате. Порошок сушится при температуре 102-105 °C в течение трех часов. Затем рассчитывается разность масс (т.е. потеря массы) и влажность в процентах от массы порошка, см. рис. 103.

Разработаны также экспресс-методы определения влажности. Обычно в них используется мощная греющая лампа с регулируемым напряжением. Такие анализы всегда менее точны, чем сушка в термостате, но очень полезны для управления установкой, так как оператор может быстро получить из лаборатории ответ, необходимый для задания оптимальных параметров сушки.

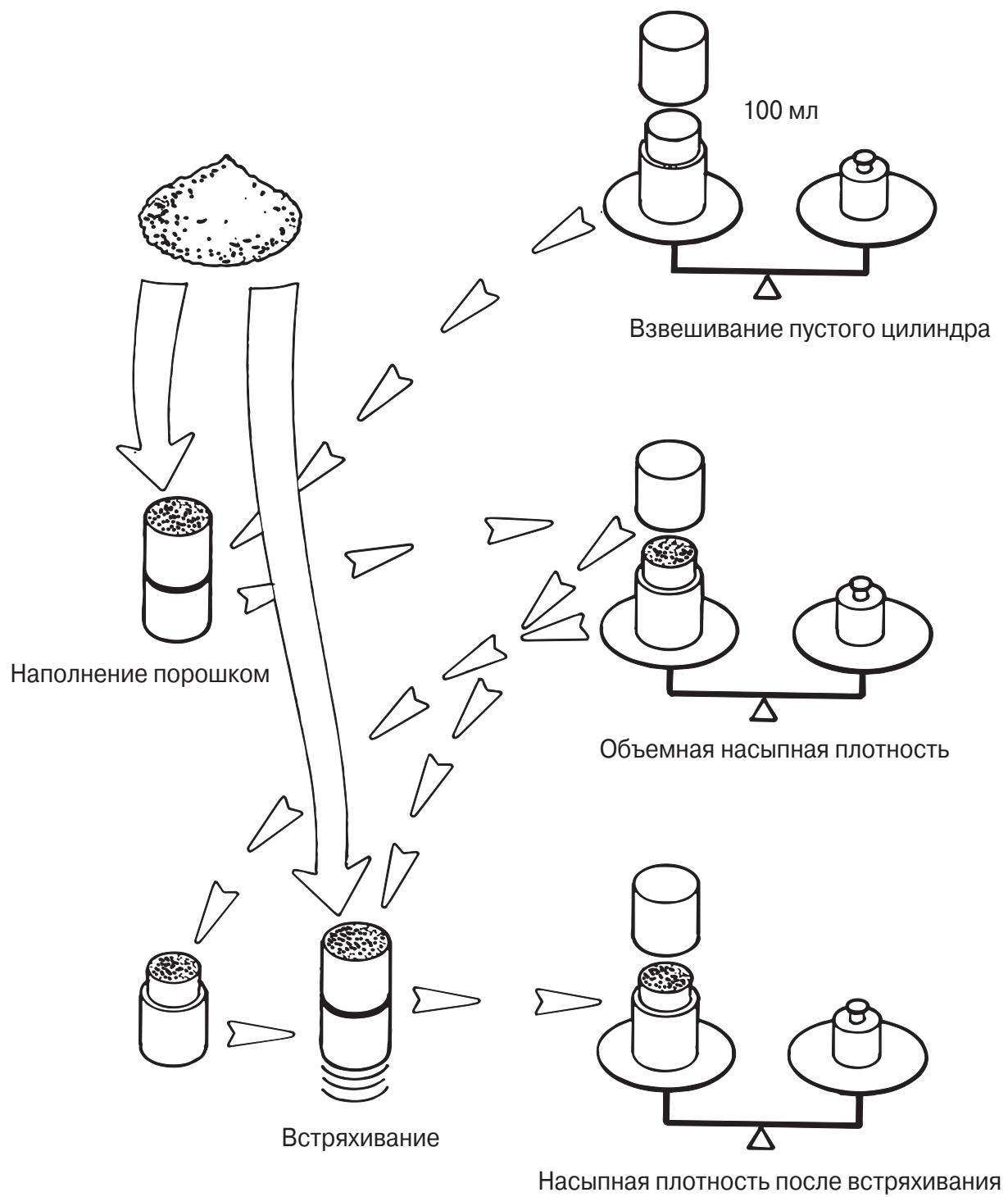


Рис. 104 Определение насыпной плотности порошка.

Автоматическое определение влажности производится по инфракрасному излучению. Отражение инфракрасных лучей от пробы прямо пропорционально содержанию влаги. Такой сигнал используется, чтобы управлять температурой на выходе, изменяя скорость питающего насоса или подачу тепла в секцию нагрева аппарата Vibro-Fluidizer.

## Насыпная плотность

Насыпная плотность – свойство продукта, важное в экономическом, торговом и функциональном отношении. При транспортировке порошка на большие расстояния производители, конечно, заинтересованы в высокой насыпной плотности для снижения объема груза. Кроме того, высокая насыпная плотность экономит упаковочный материал и объем складского помещения.

Насыпную плотность некоторых порошков понижают посредством агломерации – из-за внешнего вида или для получения быстрорастворимого продукта.

Насыпная плотность это масса порошка, занимающего единицу объема, и выражается в г/мл, г/100 мл или г/л. Обратная величина, объем насыпного материала, выражается в мл/100 г или мл/г. Объем насыпного материала используют, если измерение выполняют посредством мерного цилиндра. Таким цилиндром измеряют объем 100 г порошка. Можно также измерить массу порошка в 100 мл цилиндре, чтобы определить насыпную плотность. Естественно, из одной величины легко рассчитать другую. См. рис. 104. Насыпную плотность можно измерить без встряхивания порошка (объемная), после 10 встряхиваний (“уложенная”), 100 или 1250 встряхиваний. Для встряхивания применяют различные типы оборудования. Его можно выполнять и вручную. Естественно, плотность зависит от интенсивности встряхивания.

Насыпная плотность сухого молока – очень сложный показатель, который зависит от нескольких других свойств. Однако основные факторы, определяющие насыпную плотность, это:

- Плотность частиц, которая зависит от
  - плотности сухих веществ (т.е. от состава продукта)
  - содержания абсорбированного воздуха в частицах
- Количество воздуха между частицами (зависит от агломерации частиц)
- Сыпучести

Эти свойства обсуждаются ниже.

## Плотность частиц, абсорбированный воздух

Плотность частиц определяется плотностью сухих веществ частиц и содержанием в них абсорбированного воздуха. Плотность сухих веществ частиц это плотность частиц без воздуха, она определяется их химическим составом. Если состав продукта и плотность отдельных компонентов известны, плотность сухих веществ ( $D_s$ ) рассчитывается по следующей формуле:

$$D_{\text{Solids}} = \frac{100}{\frac{\%A}{D_A} + \frac{\%B}{D_B} + \frac{\%C}{D_C} + \text{и т.д} + \%W} \quad (18)$$

где  $\%A$ ,  $\%B$ ,  $\%C$  – доли компонентов, а  $D_A$ ,  $D_B$ , и  $D_C$  – соответствующие плотности сухих веществ.  $\%W$  – процентное содержание влаги. Ниже приводятся плотности сухих веществ типичных компонентов сухого молока:

Сухие вещества без воздуха и влаги:

Плотность, г/мл при 20 °C

Молочный жир	0.94
Сухое обезжиренное молоко	1.52
Казеинат-кальций-фосфатный комплекс	1.39
Аморфная лактоза	1.52
Бета-лактоза	1.59
Альфа-лактоза моногидрат	1.545

Плотность сухих веществ порошка невозможно изменить без изменения его состава, т.е. она постоянна для данного продукта.

Плотность частиц можно измерить газовым пикнометром. Однако, поскольку этот прибор доступен не во всех лабораториях, далее обсуждается метод с применением петролейного эфира. Определенное количество порошка смешивается с определенным объемом эфира в мерном цилиндре.

$$D_{\text{частиц}} = \frac{W}{V_1 - V_2} \quad (19)$$

где:

$D_{\text{частиц}}$ : плотность частиц в  $\text{г}/\text{см}^3$

$W$ : масса порошка в г

$V_1$ : объем порошка + эфира в мл

$V_2$ : объем эфира в мл

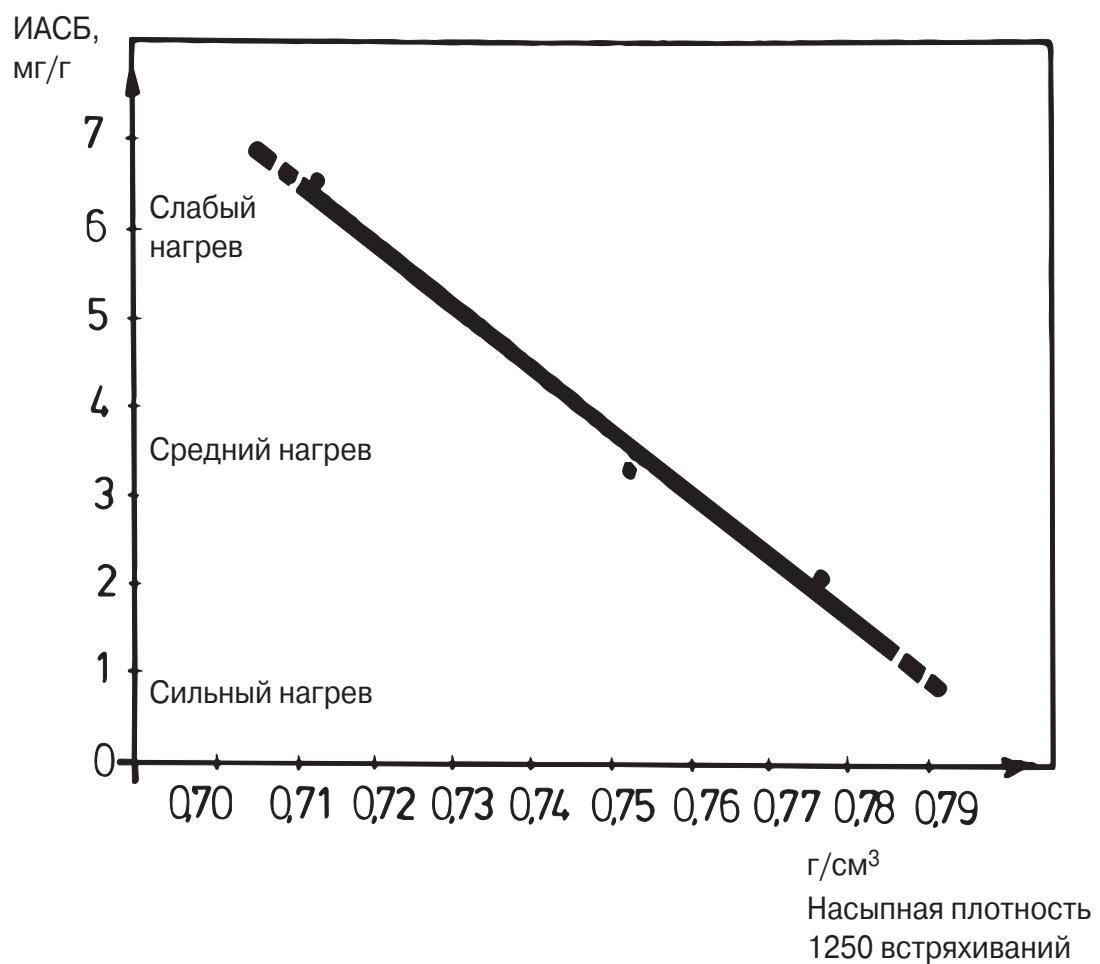


Рис. 105 Зависимость насыпной плотности сухого обезжиренного молока от температуры пастеризации (выраженной через индекс азота сывороточного белка).

Объем абсорбированного воздуха вычисляется по следующей формуле:

$$V_{oa} = \frac{100}{D \text{ частиц}} - \frac{100}{D \text{ solids}} \quad (20)$$

где:

$V_{oa}$  = объем абсорбированного воздуха, см<sup>3</sup>/100 г порошка

$D \text{ частиц}$  = плотность частиц, см. формулу (19)

$D_s$  = Плотность сухих веществ, см. формулу (18)

Содержание абсорбированного воздуха и, следовательно, плотность частиц, зависит от многих факторов, которые обсуждались выше. Это:

- Температура пастеризации молока перед выпариванием
- Количество воздуха в концентрате
- Пенообразующая способность концентрата
- Тип применяемого диска или размер форсунки
- Содержание сухих веществ в концентрате
- Условия сушки (одно- или двухступенчатый процесс)

#### Температура пастеризации молока перед выпариванием

Температура пастеризации молока перед выпариванием влияет на степень денатурации сывороточных белков и, таким образом, на физические свойства продукта и его поведение при сушке. Высокая температура пастеризации увеличивает количество денатурированных белков, которые очень компактны в отличие от нативных белков, похожих по структуре на губку. Нативные сывороточные белки имеют более высокую водосвязывающую способность. Поэтому для удаления остатков влаги потребуется большая  $\Delta t$ , т.е. движущая сила, что приведет к поверхностному отвердению частиц. То есть, чем больше денатурация, тем ниже содержание абсорбированного воздуха (выше плотность частиц и насыпная плотность) и наоборот. См. рис. 105.

#### *Количество воздуха в концентрате*

Чем больше воздуха в концентрате, тем больше абсорбция воздуха в частицах, особенно если высокая температура воздуха на критической стадии сушки вызывает поверхностное отвердение. См. стр. 105.

#### *Пенообразующая способность концентрата*

От пенообразующей способности сырья зависит, сколько попавшего в концентрат воздуха останется в нем и в распыляемых каплях. См. стр. 105.

**Тип применяемого диска или размер форсунки**

Помимо пенообразующей способности концентрата, на количество воздуха в нем сильно влияет тип диска или размер форсунки.

**Содержание сухого вещества в концентрате**

Концентрация сырья играет важную роль, чем выше концентрация, тем меньше содержание абсорбированного воздуха.

**Условия сушки (одно- или двухступенчатый процесс)**

Один из важнейших факторов – это условия сушки и температура частицы во время этого процесса. Двухступенчатая сушка, как более мягкая, т.е. более низкотемпературная, приводит к меньшему включению воздуха.

**Воздух между частицами**

Это свойство продукта также зависит от очень многих факторов. Чем меньше воздуха между частицами, тем выше насыпная плотность продукта.

Количество такого воздуха определяется распределением размеров частиц и степенью агломерации. Содержание воздуха между частицами можно рассчитать следующим образом:

$$V_{ia} = \frac{100}{D \text{ порошка}} - \frac{100}{D \text{ частиц}} \quad (21)$$

где:

$V_{ia}$  = объем воздуха между частицами, см<sup>3</sup>/100 г порошка

$D$  порошка = Насыпная плотность порошка (100 встряхиваний), г/см<sup>3</sup>, стр. 105

$D$  частиц = Плотность частиц, г/см<sup>3</sup>, см. формулу (19)

Порошок из частиц одинакового размера был бы идеальным продуктом в отношении условий сушки, но имел бы слишком низкую насыпную плотность из-за слишком большого объема воздуха между частицами. В этом отношении идеальным был бы порошок с широким распределением размеров частиц, в котором мелкие частицы заполняли бы промежутки между средними и крупными. Это обеспечило бы высокую насыпную плотность. Однако слишком мелкие частицы трудно возвращать в процесс, и из-за них порошок пылит. Кроме того, они плохо сказываются на сыпучести.

Поэтому желательно широкое распределение размеров, но без слишком мелких частиц. Это достигается с помощью высокого содержания сухих веществ и высокой вязкости, снижения скорости диска или давления форсунки или применения форсунки большего размера. В одноступенчатой сушилке это дает очень сомнительный результат, так как более крупные частицы требуют большей температуры на выходе, что повышает содержание абсорбированного воздуха по причинам, обсуждавшимся выше (поверхностное отвердение частиц). Так что порошки очень высокой насыпной плотности можно получить только в двухступенчатой сушилке.

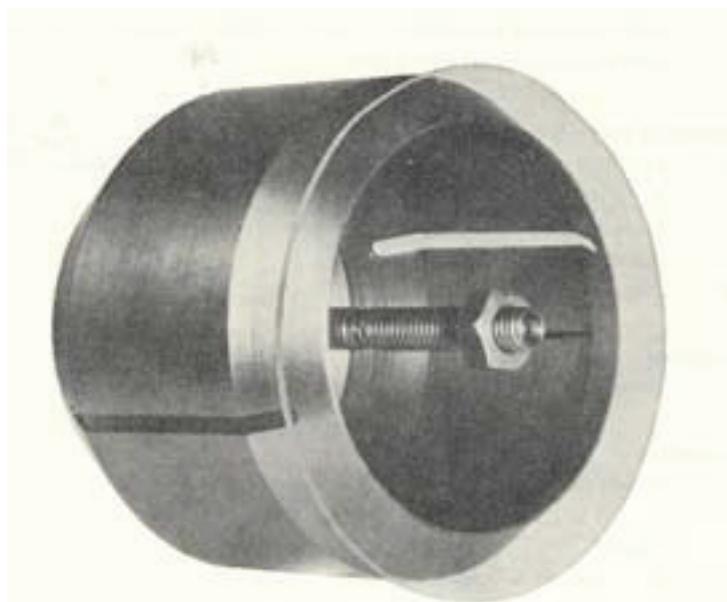
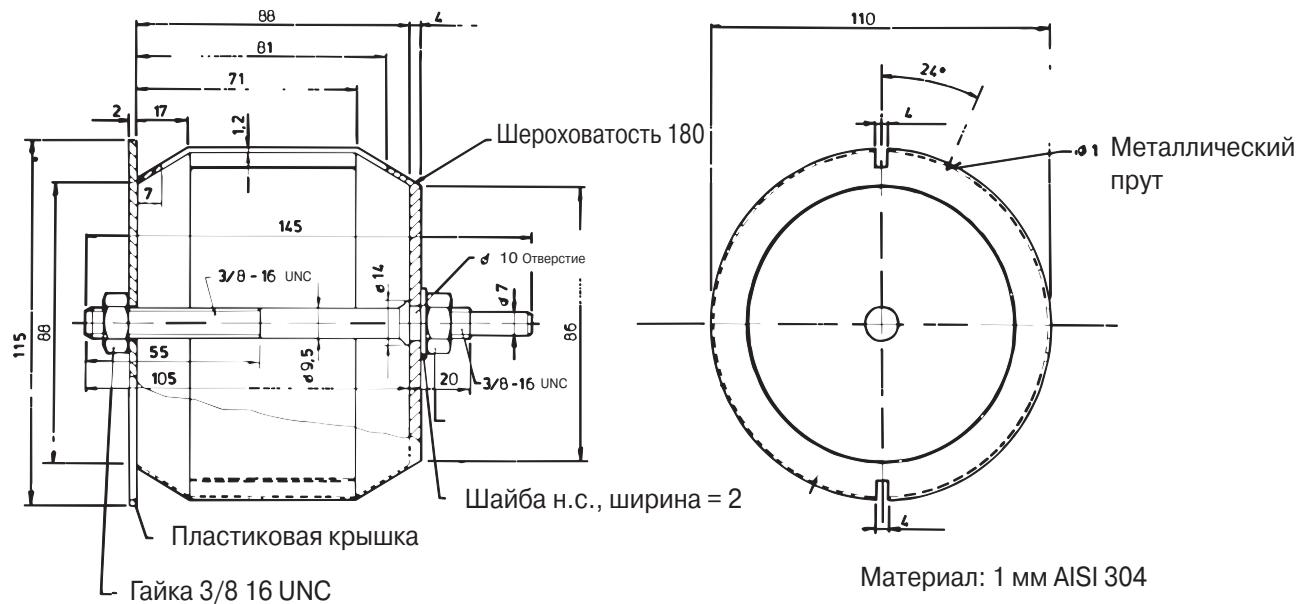


Рис. 106 Аппарат для измерения сыпучести.

Порошок на выходе сушильной камеры, как уже отмечалось, уже в небольшой степени агломерирован по причине первичной агломерации. В одноступенчатой сушилке с пневмотранспортной системой это не представляет проблемы, так как он подвергается механической обработке. Но в двухступенчатой сушилке первичная агломерация идет довольно интенсивно. Эта агломерация идет из-за высокой термопластичности порошка. Механическая обработка в аппарате Vibro-Fluidizer протекает очень мягко, так что агломераты не разрушаются. Поэтому в тех случаях, когда требуется очень высокая насыпная плотность, рекомендуется установить систему пневмотранспорта. Однако следует отметить, что первичная агломерация положительно влияет на сыпучесть порошка.

Было замечено, что свежеприготовленный порошок часто имеет низкую насыпную плотность, которая возрастает через несколько дней. Это вызвано электростатическим зарядом порошка, который заставляет частицы притягиваться друг другу, образуя "агломераты". Со временем порошок теряет заряд, и частицы начинают вести себя нормально. Эффективное заземление всех частей сушильного оборудования может до некоторой степени решить эту проблему.

## Сыпучесть

Сыпучесть порошка – не вполне понятное явление. Смесь двух сыпучих порошков не обязательно будет сыпучей. Хорошая сыпучесть обеспечивается, если порошок состоит только из крупных частиц или агломератов и не содержит мелких частиц, однако у такого порошка будет понижена насыпная плотность. Важную роль играет также поверхность частиц и особенно содержание свободного жира. Считается, что форсунки производят порошки с лучшей сыпучестью, чем роторные распылители, особенно в случае цельного сухого молока. Порошок с хорошей сыпучестью имеет более высокую насыпную плотность, особенно уложенную и объемную.

Было много попыток разработать метод измерения сыпучести. Некоторые из них используют измерение угла естественного откоса для определенного количества порошка, другие – время высыпания из воронки с отверстием определенного диаметра. Общее для этих методов – то, что они пригодны только для порошков с высокой сыпучестью. Кроме того, результат зависит от внешних условий, особенно от влажности воздуха.

С другой стороны, разработанный фирмой NIRO метод пригоден для всех типов порошков. Этот метод заключается в измерении времени прохождения порошка данного объема через определенные щели барабана, вращающегося с заданной скоростью. См. рис. 106.

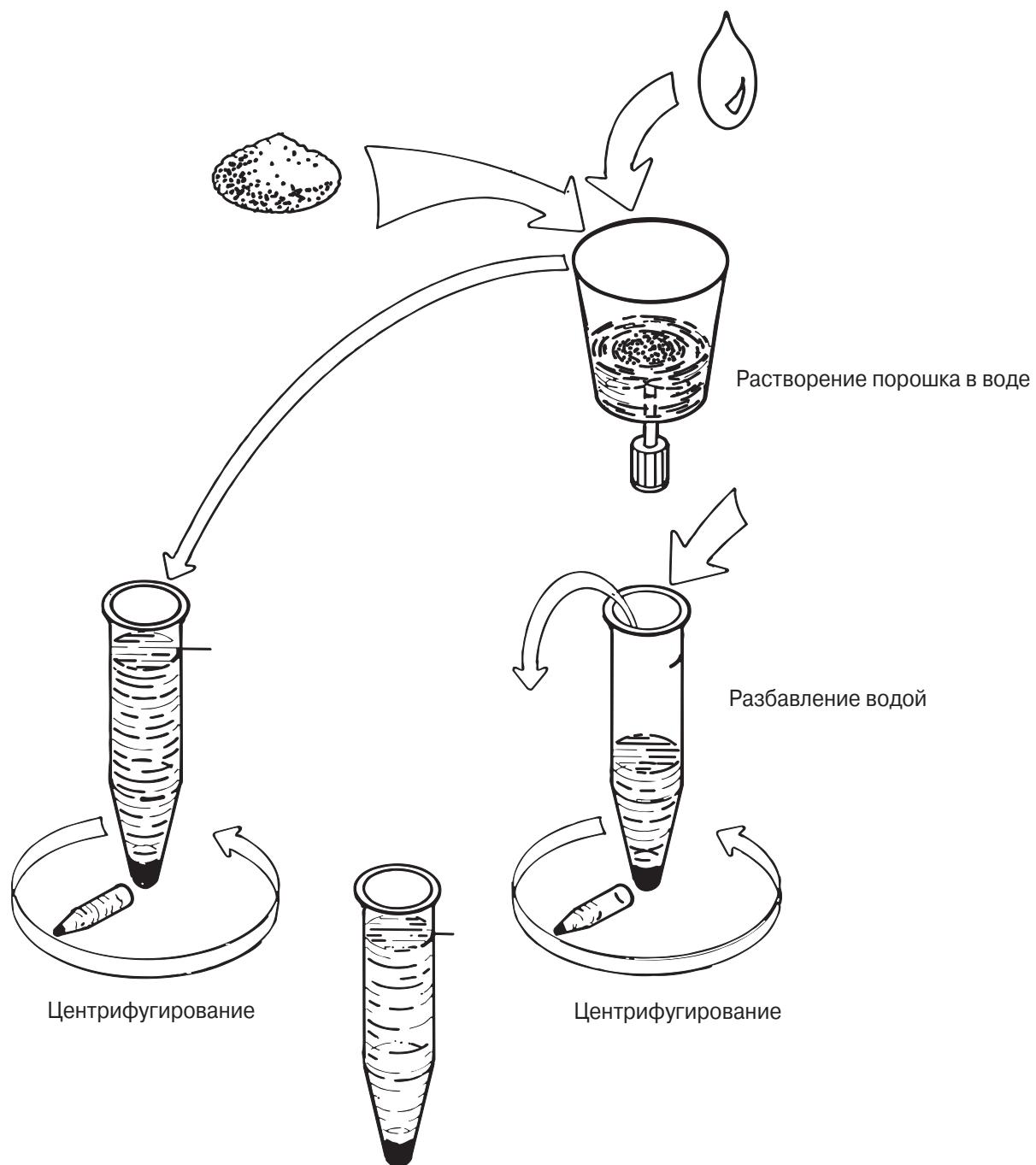


Рис. 107 Определение показателя растворимости.

## Растворимость

Очевидно, что сухое молоко должно быть растворимым в воде. Однако не все компоненты порошка растворяются при восстановлении влагосодержания. Если порошок произведен на современной сушилке, их количество очень мало и растворимость приближается к 100 %. Тем не менее, порошки с плохой растворимостью все еще производятся, и на любой сушилке, если ею неправильно управлять, может получиться порошок с низкой растворимостью.

Метод определения растворимости очень прост, четко сформулирован и легко выполняется:

10 г сухого обезжиренного молока, 13 г сухого цельного молока или 6 г сухой сыворотки (или эквивалентное количество концентрата, которое зависит от содержания сухих веществ) размешивают в течение 90 секунд в миксере на высокой скорости в 100 мл воды при температуре около 24 °С. Молоко оставляют на 15 минут, затем перемешивают шпателем. 50 мл молока наливают в коническую 50 мл центрифужную пробирку. Пробирку центрифигируют 5 минут, надосадочную жидкость отсасывают, пробирку заполняют водой (для удобства считывания), и содержимое перемешивают. Затем пробирку центрифигируют 5 минут и измеряют количество осадка. См. рис. 107.

Количество осадка выражается в мл и называется индексом растворимости. Обычно он составляет 0,2 мл для сухого молока, полученного на современных хорошо спроектированных выпарных аппаратах и сушилках из высококачественного молочного сырья.

Высокий индекс растворимости (т.е. плохая растворимость) сухого молока может объясняться разными причинами. Обычно осадок представляет собой денатурированный казеин или очень сложную комбинацию казеина и сывороточных белков с лактозой, химия которого не вполне понятна. На индекс растворимости влияют, в основном, следующие факторы.

- Низкокачественное молочное сырье с большим содержанием молочной кислоты (из-за высокой активности бактерий) увеличивает индекс растворимости, так как интенсивная тепловая обработка вызывает необратимую денатурацию белков, особенно казеинов.
- Высокая температура концентрата в процессе выпаривания вызывает выраженное заустевание, что ведет к увеличению вязкости и плохому распылению, т.е. к повышению температуры сушки.
- Вообще говоря, чем выше температура и вязкость при обработке, тем выше ожидаемый показатель растворимости. Порошки с высоким содержанием лактозы, такие как детское питание, практически никогда не имеют высокого показателя растворимости, так как лактоза защищает белки от денатурации.
- Порошки, высушенные в одноступенчатой сушилке, обычно, имеют более высокий показатель растворимости, чем высушенные в двухступенчатой сушилке.

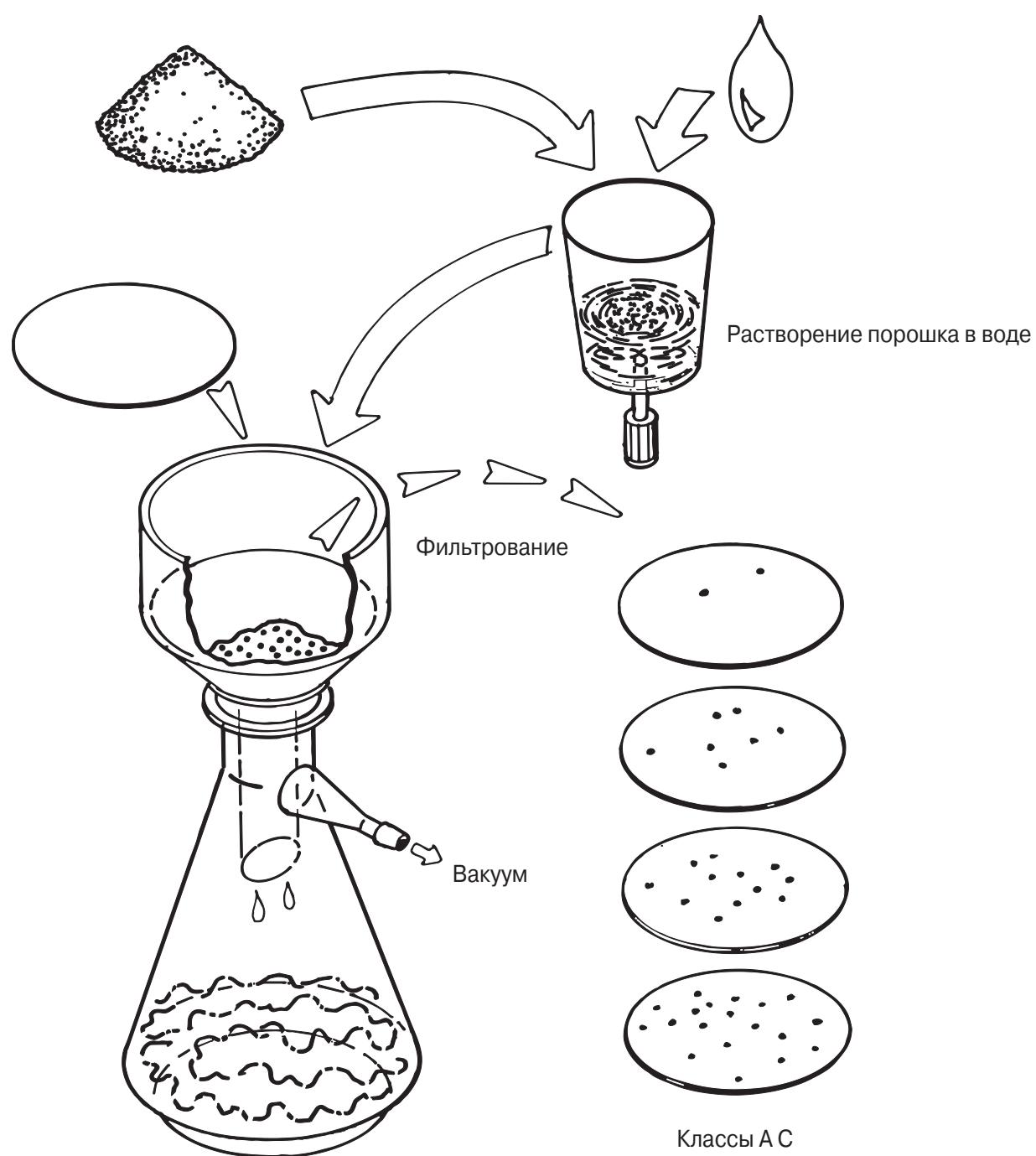


Рис. 108 Определение пригорелых частиц.

- Причиной высокого показателя растворимости может быть не только сушилка. Концентрат может быть поврежден и в выпарном аппарате. Однако такое случается редко. Тем не менее, если причину плохой растворимости не удается установить, рекомендуется исследовать концентрат. Это делается теми же методами, что описаны выше, с той разницей, что количество концентрата рассчитывается по содержанию сухого вещества и требуемому для анализа количеству сухого молока. См. стр. 195. Если сухое молоко с высоким показателем растворимости применяется для составных продуктов, таких как детское питание, соответственно возрастает и показатель растворимости продукта.

## Пригорелые частицы

Пригорелые частицы обычно считаются показателем наличия отложений в сушильной камере, которые под действием высокой температуры обжигаются, обесцвечиваются и становятся нерастворимыми.

Однако сушилка не единственный источник пригорелых частиц в продукте, даже молочное сырье может содержать грязь или осадки, которые, если их не отделить в сепараторе, оказываются в сухом молоке.

Пригорелыми частицами становятся также коричневые нерастворимые студенистые комки в концентрате, образующиеся в трубах выпарного аппарата по причине недостаточно-го коэффициента покрытия труб (средства от этого обсуждались выше, см. стр. 35) или недостаточной их чистки.

Если пригорелые частицы образуются из-за сушилки, очень часто их источником являются отложения на диске или вокруг форсунок или воздухораспределителя. Способы решения проблемы зависят от конкретных особенностей установки, но в большинстве случаев помогает настройка воздухораспределителя.

Определение пригорелых частиц производится легко и быстро:

25 г сухого обезжиренного молока, 32,5 г сухого цельного молока или 15 г сухой сыворотки (или эквивалентного по сухому веществу количества концентрата) в течение 60 секунд размешивается в таком же миксере, как при определении показателя растворимости, в 250 мл воды при 18-28 °C. Раствор молока фильтруется, и бумажный фильтр сравнивается со стандартом. Пригорелые частицы получают класс А, В, С или D в зависимости от количества и цвета частиц на фильтре. См. рис. 108.

Если появление пригорелых частиц не удается связать с выпарным аппаратом, см. стр. 195, или распылительной сушилкой, возможно, они присутствовали в сухом молоке, применявшемся для приготовления смесевых продуктов, таких как детское питание.

## Общее содержание жир

Общее содержание жира в сухом цельном молоке зависит от нормализации молочного сырья перед обработкой и никак не связано с процессом сушки.

Нормализация выполняется либо добавлением в молоко обезжиренного молока или сливок, либо удалением сливок из молока, в зависимости от того, сколько жира содержится в молочном сырье и сколько его должно быть в сухом готовом продукте. Обычно используются оборудованные мешалками танки для нормализации молока, но возможны и другие способы.

Поскольку содержание жира в молочном сырье практически всегда слишком велико для производства сухого цельного молока, для нормализации иногда применяют сухое обезжиренное молоко. Для этого требуется смеситель порошка с жидкостью, так называемая установка рекомбинации. Поскольку при добавлении сухого обезжиренного молока содержание сухих веществ увеличивается, такая технология требует особой конструкции выпарного аппарата.

Для точного определения жира в сухом цельном молоке применяется метод Розе-Готлиба, а экспресс-методом служит метод Гербера.

## Поверхностные свободные жиры

В сухом цельном молоке жир присутствует в виде покрытых оболочкой мелких шариков, равномерно распределенных в частицах порошка. Однако не весь жир защищен оболочкой, особенно на поверхности частиц, хотя такой жир может находиться и внутри частиц. Такие "свободные жиры" непосредственно влияют на срок хранения сухого молока и создают несмачиваемые поверхности при смещивании порошка с холодной водой.

Поверхностные свободные жиры невозможно полностью устраниć из сухого цельного молока, но их содержание можно снизить. Для этого требуется:

- Избегать интенсивной перекачки и перемешивания молочного сырья. Всеми средствами избегать рециркуляции в выпарном аппарате.
- Определенную роль играет пастеризация молока перед выпариванием. Пастеризация в контактных теплообменниках, особенно при низкой температуре, обеспечивает меньшую вязкость концентрата и более мелкодисперсное распыление, относительная поверхность частиц увеличивается, что ведет к увеличению свободных жиров.
- Свободные жиры очень эффективно снижаются гомогенизацией концентрата, желательно, в двухступенчатом гомогенезаторе. На первой ступени используется перепад давления 70-100 кг/см<sup>2</sup>. Шарики жира распадаются на мелкие шарики, которые под действием статического электричества могут вновь агломерировать, т.е. образуются агломераты из множества мелких шариков. На второй ступени применяется перепад давления 25-50 кг/см<sup>2</sup> для разрушения этих агломератов.

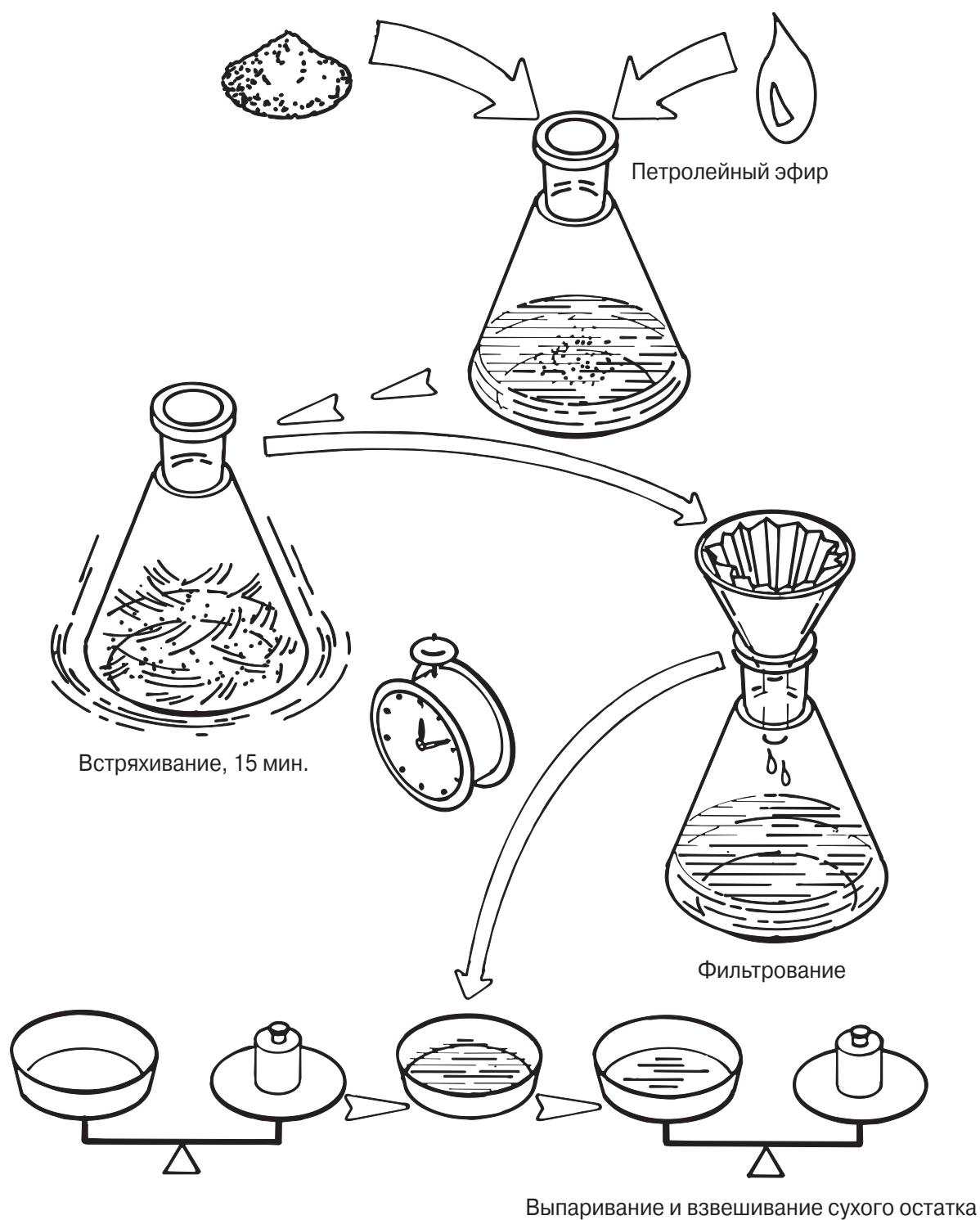


Рис. 109 Определение поверхностных свободных жиров.

- Как правило, после форсунок содержание свободного жира меньше, чем после роторного распылителя, в основном, из-за создаваемого форсунками эффекта гомогенизации.
- Следует избегать любых жестких механических воздействий на порошок, так что неудивительно, что двухступенчатая сушка дает порошок с более низким содержанием свободных жиров, чем одноступенчатая.
- На установках со встроенным псевдоожиженным слоем уровень свободных жиров возрастает в случае слишком низкой температуры слоя, т.е. слишком высокой влажности, которая ведет к кристаллизации лактозы. Смотри, однако, стр. 277, где обсуждается производство сухого цельного молока с высоким содержанием свободного жира, применяющегося в шоколадной промышленности.

Для определения свободных жиров 50 мл эфира и 10 г порошка медленно перемешивают ровно 15 минут. Смесь фильтруют, выпаривают 25 мл фильтрата, взвешивают сухой остаток и рассчитывают содержание свободных жиров в процентах от общего жира или, чаще, от массы порошка. См. рис. 109.

В другом методе определения свободных жиров используется толуол, а время экстракции составляет 24 часа. Эти методы, естественно, дают разные результаты.

Считается, что первый метод позволяет определить поверхностные свободные жиры, а второй – общее содержание свободных жиров, включая те, которые находятся в порах и капиллярах частиц.

## Смачиваемость

Смачиваемость – это мера способности порошка смачиваться водой при данной температуре. Этот метод анализа применяется только при производстве сухих продуктов повышенной растворимости. Очевидно, что смачиваемость зависит от свойств поверхности агломератов или отдельных частиц – отталкивает ли она воду или поглощает ее слишком быстро, так что образуется непроницаемая для воды пленка.

Вообще говоря, смачивание – это процесс, в ходе которого газообразная фаза на поверхности твердой фазы замещается жидкой фазой, все три фазы некоторое время сосуществуют, поэтому определенное перемешивание и растворение (главным образом, твердой и жидкой фаз) не просто возможно, а, как правило, неизбежно.

Кроме того, сухое молоко можно рассматривать как сложную поверхность, состоящую из отдельных поверхностей, соединенных более-менее стабильными мостиками, что создает сложную капиллярную сеть. Для простоты рассмотрим сначала механизм смачивания одиночной поверхности.

Фактор, от которого зависит, будет ли вообще происходить смачивание, это поверхностное натяжение на границе частицы и воды. Сухое обезжиренное молоко обычно легко смачивается (если содержание жира на поверхности меньше 0,03 %), так как состоит, в основном, из аморфной лактозы и белка, оба эти вещества легко впитывают воду. Однако частицы сухого цельного молока всегда покрыты слоем жира, отталкивающего воду. Количество этого поверхностного свободного жира варьирует от 0,5 до 3 % от массы порошка.

Эту гидрофобность частиц, вызванную жировым покрытием, можно преодолеть, добавив к свободному поверхностному жиру поверхностно-активное вещество, изменяющее межфазное натяжение. Давно известно, что для этой цели хорошо подходят фосфолипиды, такие как лецитин. Преимущество лецитина в том, что это натуральный продукт и даже естественный компонент молока и, обладая одновременно липофильными и гидрофильными свойствами, он способен абсорбировать воду. См. стр. 238.

При смачивании частиц компоненты сухого молока начинают растворяться и диспергироваться, так что вокруг частиц образуется концентрированный раствор молока. Одновременно частицы начинают опускаться на дно, но здесь следует упомянуть, что частицы тонут лишь при условии, что их плотность становится больше плотности воды.

Плотность частиц зависит от их состава и количества абсорбированного воздуха. На первых стадиях восстановления влагосодержания плотность частиц уменьшается, в основном, из-за того, что лактоза и другие минеральные вещества, которые обладают наибольшей плотностью, растворяются быстрее других компонентов молока. Одновременно с этим из-за растворения лактозы увеличивается плотность образующегося раствора, так что разница в плотности частиц и окружающего раствора уменьшается. Плотность частиц может даже стать такой же, как у жидкости, или более низкой, так что после начального погружения частицы опять начнут подниматься. Для предотвращения этого явления плотность частиц должна быть достаточно высокой, т.е. содержание абсорбированного воздуха должно быть низким. См. стр. 216.

Восстановление влагосодержания большого количества порошка протекает сложнее. Как уже упоминалось, порошок – это сложная поверхность с очень разветвленной системой капилляров различных размеров и замысловатой геометрии, которые в силу этого обладают различным капиллярным притяжением.

В таких условиях смачивание происходит не только на поверхности воды, частицы, лежащие выше этой поверхности, тоже смачиваются водой, поднимающейся в результате капиллярного притяжения. Такое замещение порового воздуха водой под действием капиллярных сил очень часто оказывается неполным, так как количество проникающей воды недостаточно, и между смоченными частицами остаются пузырьки воздуха. Таким образом, все три фазы присутствуют одновременно, что приводит к сосуществованию их продуктов разной концентрации. Такое сосуществование очень опасно, так как через короткое время пространство между частицами заполняется молоком различной, в том числе высокой, концентрации. Это приводит к образованию липкого желе с островками несмоченного порошка и остаточного воздуха. К тому же образуются комки, смоченные и набухшие снаружи и сухие внутри. Поскольку они непроницаемы для воды, полное восстановление влагосодержания оказывается исключительно трудным даже при сильном перемешивании.

Поэтому для восстановления влагосодержания молока в разумно короткое время и с минимальными усилиями необходимо избегать капиллярного проникновения воды. Капиллярный эффект зависит от структуры порошка, т.е. от размера агломератов, размеров и количества неагломерированных частиц, количества порового воздуха и удельной поверхности порошка. Проникновение воды в порошок не происходит, или задерживается настолько, что растворение происходит раньше, если порошок состоит из крупных агломератов.

Агломерация обсуждается на странице 159.

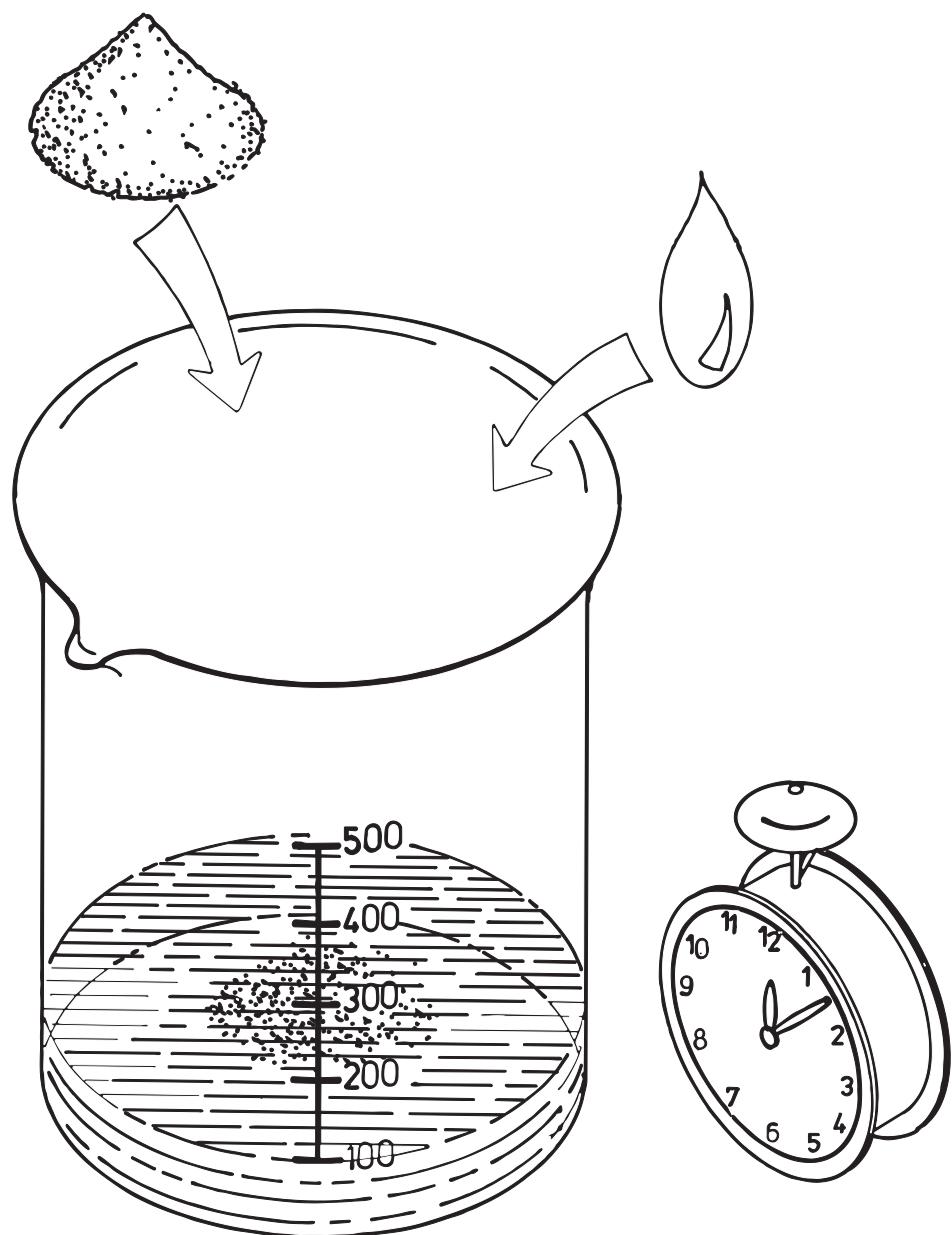


Рис. 110 Определение смачиваемости.

Метод определения смачиваемости очень прост:

10 г сухого обезжиренного молока или 13 г сухого цельного молока насыпают в 100 мл воды при определенной температуре, обычно  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Время, необходимое для смачивания всего порошка, определяют с помощью секундометра. Международная молочная федерация (IDF) предписывает вводить 10 г сухого обезжиренного или цельного молока в 250 мл воды при температуре  $25^{\circ}\text{C}$ . См. рис. 110.

Чтобы считаться быстрорастворимым продуктом, сухое обезжиренное молоко должно смачиваться менее чем за 15 секунд. Для сухого цельного молока таких требований не существует, но у многих производителей быстрорастворимое сухое цельное молоко отвечает тому же стандарту, что и сухое обезжиренное молоко. Однако для облегчения последующего диспергирования порошка в воде, особенно в случае сухого цельного молока, желательно, чтобы смачиваемость была около 30-60 секунд.

## Диспергируемость

Другое важное свойство быстрорастворимого порошка – способность диспергироваться в воде при несильном помешивании. Это означает, что порошок распадается на агломераты, которые в свою очередь распадаются на отдельные первичные частицы.

Условия хорошей диспергируемости – смачиваемость порошка и оптимальная агломерация (в порошке должны присутствовать мелкие частицы).

Методы измерения диспергируемости трудно формулируются и реализуются, а их воспроизводимость очень низкая. Существует много таких методов, и их результаты несравнимы.

В связи с этим Международная молочная федерация (IDF) разработала новый тест диспергируемости. Этот тест основан на определении способности порошка (25 г сухого обезжиренного молока или 34 г сухого цельного молока), рассыпанного по поверхности воды (250 г,  $25^{\circ}\text{C}$ ), распадаться после ручного перемешивания в течение 20 секунд на частицы, проникающие сквозь сито с ячейкой 150 мкм. Диспергируемость – это количество порошка, прошедшего сквозь сито в растворенной или диспергированной форме, найденное по сухому веществу в фильтрате и выраженное в процентах. См. рис. 111.

Согласно требованиям Международной молочной федерации (IDF) молоко считается продуктом повышенной растворимости, если его диспергируемость не меньше 85 % (цельное молоко) или 90 % (обезжиренное молоко). Однако установки, работающие по современным технологиям сушки, легко производят сухие продукты с диспергируемостью 95 %.

Этот тест, несомненно, дает более надежную оценку свойств быстрорастворимого сухого молока, чем тест на смачиваемость. С другой стороны, он более трудоемкий, так что вряд ли может использоваться в качестве рутинного теста. Кроме того, его воспроизводимость невелика, даже если анализ проводят квалифицированные сотрудники.

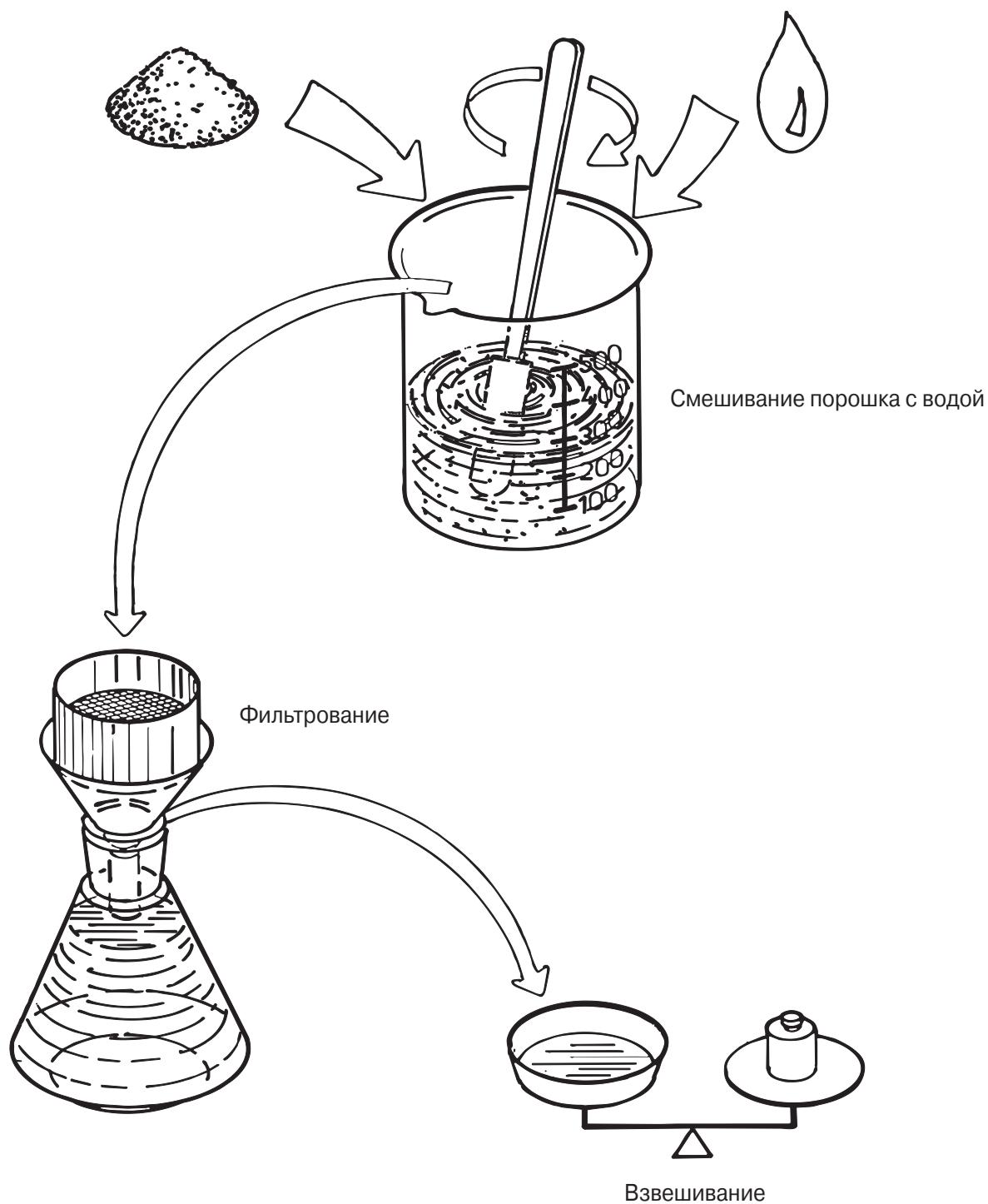


Рис. 111 Определение диспергируемости.

Более простой способ состоит в том, что 10 г сухого обезжиренного молока или 13 г сухого цельного молока насыпают в 100 мл воды при комнатной температуре и вручную перемешивают чайной ложкой до тех пор, пока порошок не диспергируется, не оставив комков на дне стакана. Требуемое для этого время измеряют секундомером.

После некоторой тренировки воспроизводимость становится довольно хорошей, а измерение проводится быстро. Дополнительное преимущество состоит в том, что именно так действует домашняя хозяйка, когда готовит стакан молока.

## Осадок

Тест аналогичен тесту IDF на диспергируемость (и применяется только для сухого цельного молока, хорошо растворимого в холодной воде), но добавляют 12,5 г порошка на 100 мл воды при температуре 25 и 85 °C. Используется сито с ячейкой 600 мкм. Показателем служит масса осадка на сите.

## Медленно растворимые частицы (МРЧ)

Та же процедура, что и для определения осадка. После фильтрования через сито с ячейкой 600 мкм молоко наливают в пробирку, которую немедленно опорожняют. Оставшуюся пленку из не растворившихся частиц и агломератов сравнивают с фотографическим эталоном, имеющим 5 уровней. МРЧ определяют в воде температурой 25 и 85 °C. Для улучшения МРЧ используют агломерацию.

## Тест в горячей воде

Аналогичен тесту на осадок при температуре 85 °C. Растворенное профильтрованное молоко наливается в две градуированных конических центрифужных пробирки, которые используются при определении показателя растворимости, и центрифугируется 5 минут. Результат выражают как суммарный объем осадка в мл в обеих пробирках. Желательно, чтобы показатель был меньше 0,2 мл.

## Кофейный тест

Аналогичен тесту в горячей воде, но вместо нее используется кофе с температурой 85 °C. Как и МРЧ, и тест в горячей воде, этот показатель зависит от степени агломерации, но в случае с кофе значение имеют еще и пастеризация молока перед выпариванием (80-85 °C в течение 15 с, индекс азота сывороточного белка ≈ 3 мг/г), содержание Ca<sup>++</sup> и общее содержание белка.

Из молока с высоким содержанием белка (от коров джерсийской породы или стародойного) трудно изготовить сухое молоко с хорошим показателем кофейного теста, который должен быть ниже 0,4 мл. Для этой цели применяют нормализацию высокобелкового молока молоком с лактозой или пермеатом. Кроме того, можно использовать подогрев молока до 80 °C и /или добавку фосфатов либо цитратов для осаждения ионов Ca<sup>++</sup>.

## Степень гидратации

Равномерно диспергированные в воде частицы начинают растворяться. Обычно растворение начинается уже при первом контакте с водой, и смачивание, диспергирование и растворение или гидратация протекают одновременно. Способность порошка к полному растворению выражается показателем растворимости (см. стр. 208). Однако этот метод требует энергичного механического перемешивания и затем настаивания в течение 15 минут, тогда как суть быстрорасторимых продуктов состоит в том, чтобы потребитель мог быстро приготовить молоко, слегка перемешав раствор ложкой. Вышеописанный тест диспергируемости повторяет процедуру восстановления влагосодержания, используемую потребителем. Однако при таком тестировании порошок может раствориться лишь частично.

Разрыв между этими двумя методами заполняет модифицированный тест на растворимость, которым определяется степень гидратации, особенно применительно к быстрорасторимому сухому цельному молоку. Согласно этому методу 0,5 г порошка насыпают в обычную пробирку для определения показателя растворимости с 50 мл воды. Пробирку переворачивают 8 раз, а затем центрифицируют 5 минут. По количеству осадка определяют степень гидратации:

$$\text{степень гидратации} = (\text{мл осадка} \times 12) - \text{показатель растворимости} \quad (22)$$

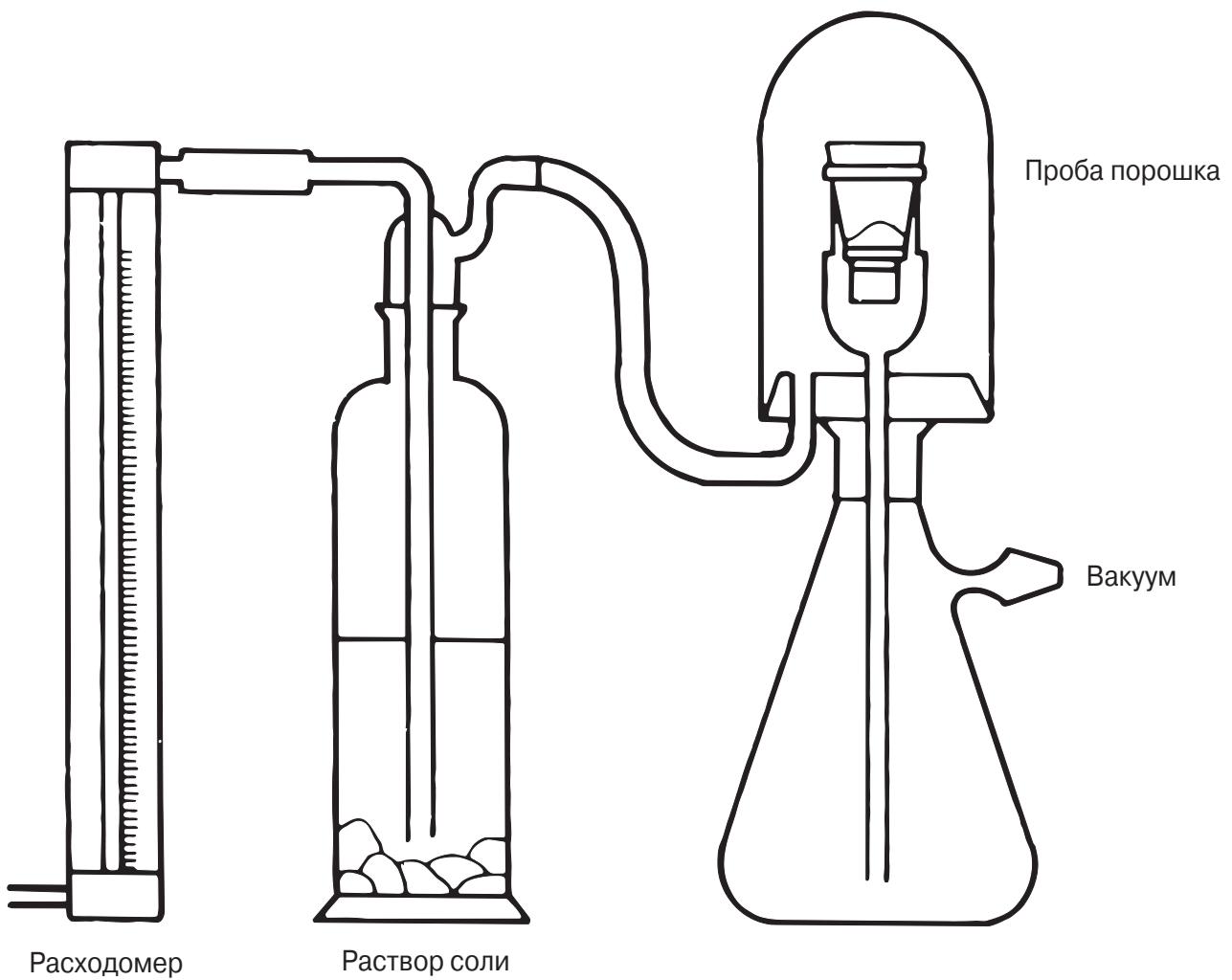


Рис. 112 Определение гигроскопичности.

# Лабораторный контроль сухой сыворотки

При производстве сухой сыворотки, особенно некомкующейся, используют нижеуказанные анализы наряду с некоторыми из описанных для сухого молока.

## Общая влажность и свободная влажность

При производстве некомкующейся сухой сыворотки кристаллизуется лактоза, при этом молекула лактозы связывает молекулу воды. Для определения степени кристаллизации вычисляют количество связанной в кристаллах (кристаллизационной) воды по разности между общей и свободной влагой.

Общая влажность определяется титрованием по Карлу Фишеру. Принцип метода состоит в реакции между йодом и двуокисью серы в присутствии воды. Свободная влажность определяется сушкой в термостате при 86 °C в течение 6 часов.

$$\% \text{ Crystallization water, \%} = \frac{\% \text{ free water}}{\% \text{ total moisture}} \quad (23)$$

Степень кристаллизации вычисляется по формуле:

$$\% \text{ Crystallization} = \frac{\% \text{ Crystal water} \times 19 \times 100}{\% \text{ Lactose}} \quad (24)$$

Для рутинных экспресс-тестов можно принимать содержание лактозы в сладкой сыворотке за 74 %.

## Гигроскопичность и комкуемость

Гигроскопичность сухой сыворотки, т.е. ее способность впитывать воду, определяется степенью кристаллизации лактозы. Но воду абсорбируют также соли и даже белки, хотя и не в такой степени как лактоза. Гигроскопичность определенного количества порошка находят, пропуская через него воздух определенной влажности (отн. влажность 80 % при температуре 20 °C). После достижения равновесия абсорбированную влагу рассчитывают по массе пробы перед абсорбцией и после нее.

$$\% \text{ Hygroscopicity} = \frac{(\% \text{ weight increase} + \% \text{ free Water}) \times 100}{100 + \text{weight increase}} \quad (25)$$

Для негигроскопичного продукта этот показатель должен быть меньше 10 %.

Еще важнее комкуемость сухой сыворотки, т.е. показатель тенденции к образованию твердых комков при хранении.

Между гигроскопичностью и комкуемостью нет прямой связи, так как интенсивная кристаллизация сама по себе не предотвращает комкование. Важно, чтобы кристаллы были мелкими, и чтобы они были равномерно распределены в частицах порошка. Кристаллизация оставшейся аморфной лактозы, наступающая из-за абсорбции влаги некристаллизованной или плохо кристаллизованной сухой сывороткой, происходит, в основном, на поверхности имеющихся кристаллов. Скорость этого процесса зависит от расстояния между кристаллами. По окончании кристаллизации давление водяных паров в порошке становится выше, чем в окружающем воздухе, так что вслед за абсорбцией влаги происходит ее десорбция. Образовавшийся при увлажнении липкий порошок цементируется в результате кристаллизации в твердые комки.

Определение комкуемости происходит следующим образом.

Проба порошка после теста на гигроскопичность сушится при температуре 102 °C в течение 1 часа, затем остужается в эксикаторе. Затем порошок в течение 5 минут просеивается через сито с ячейкой 500 мкм на приборе для встряхивания. Взвешиваются

остатки, не прошедшие сквозь сито.

$$\text{Degree of caking in \%} = \frac{\text{g powder left on the sieve} \times 100}{\text{g powder used}} \quad (26)$$

У некомкующейся сухой сыворотки этот показатель должен быть ниже 10 %.

# Дегидратация пищевых продуктов

---

## Различные пищевые ингредиенты

Пищевые продукты часто представляют собой водные растворы, суспензии или пасты и имеют ограниченный срок хранения из-за активности бактерий, снижающих пищевую ценность продукта. Их длительное хранение возможно только при низкой температуре или в присутствии консервантов, например, сахара или соли, снижающих активность бактерий.

Удаление воды также снижает активность бактерий в готовом продукте, и он может храниться почти неограниченное время при условии, что в нем достаточно мало влаги и что он содержится в сухом прохладном месте.

Пищевые продукты животного или растительного происхождения или их комбинации характеризуются содержанием следующих веществ:

- белков
- углеводов
- жиров
- крахмала
- других компонентов

### Белки

Вообще говоря, чем больше в продукте белка, тем легче сушка. С увеличением содержания белка увеличивается вязкость концентрата, и для поддержания хорошего распыления необходимо снижать содержание сухих веществ. Это снижает экономичность сушки, так как чисто белковый продукт (яичный белок, Na- или K-казеинат) сушится из сырья с 20-24 % СВ, и готовый продукт состоит из отдельных частиц.

Белки трудно агломерируются (из-за отсутствия связующего) в традиционных сушилках. Поэтому для производства агломерированных сухих продуктов применяют многоступенчатую сушилку.

Гидролизованные белки, как правило, труднее сушить, так как короткоцепочечные молекулы становятся термопластичными и гигроскопичными, и продукт налипает на стенки сушильной камеры.

## Углеводы

В большинстве пищевых продуктов присутствуют углеводы, различные по происхождению и форме. Вообще говоря, чем больше углеводов, тем труднее сушка, так как углеводы, если сырье не кристаллизовано, отличаются термопластичностью и гигроскопичностью. Углеводы снижают вязкость концентрата.

Одним из углеводов является лактоза, которая присутствует только в молоке и в побочных продуктах обработки молока, например, в подсырной сыворотке. Преимущество лактозы с точки зрения удобства сушки заключается в том, что ее можно кристаллизовать из пересыщенного раствора (высокое содержание сухого вещества, низкая температура). В результате предварительной кристаллизации температура прилипания увеличивается, и сушка проходит легче.

Сахароза применяется в качестве подсластителя пищевых продуктов, а также дополнительного источника энергии, например, для детского питания и других сухих напитков. Если содержание сахарозы в готовом продукте должно быть выше, чем возможно при ее введении в жидкий концентрат перед сушкой, сахарозу можно вводить в распылительную сушилку в сухом виде в процессе сушки концентрата. В результате образуется гомогенный агломерированный готовый продукт.

Фруктоза, присутствующая во всех фруктах, очень термопластична и гигроскопична. Поэтому для фруктов и подобных продуктов распылительная сушка не применима, если не использовать какой-либо носитель, например, сухое обезжиренное молоко или мальтодекстрин.

Мальтодекстрин – это еще один углевод, который часто используется как наполнитель, основа или подсластитель. При декстрозном эквиваленте 10-40 его можно применять во многих продуктах, поскольку он легко сушится.

Углеводы – превосходное связующее, и позволяют легко агломерировать продукт, если установка распылительной сушки предназначена для этого.

## Жиры

Если жиры отсутствуют в исходном пищевом продукте, их можно добавить для получения требуемого состава. Чем больше жиров в продукте, тем ниже его вязкость и тем труднее распылительная сушка (из-за образования отложений). Если в готовом продукте жиры присутствуют в свободной форме (не защищены белками), это еще больше затрудняет сушку. Поэтому перед сушкой рекомендуется гомогенизировать концентрат. Гомогенизация несколько увеличивает вязкость концентрата.

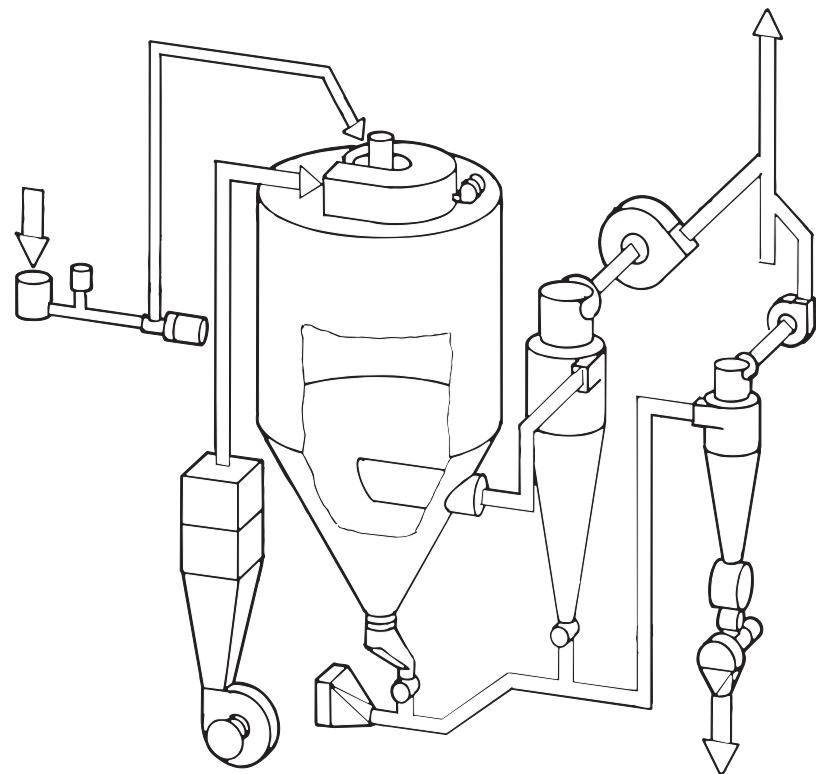


Рис. 113 Распылительная сушилка для одноступенчатой сушки (SDP).

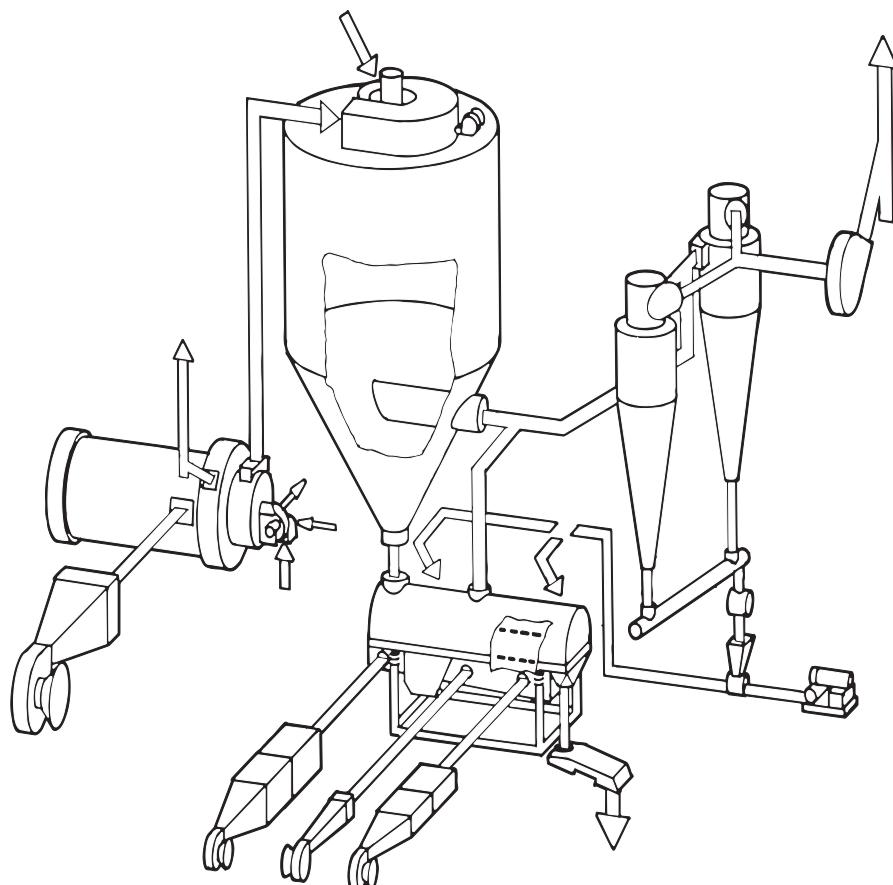


Рис. 114 Распылительная сушилка с аппаратом Vibro-Fluidizer в качестве сушилки второй ступени (SDI).

## Крахмал

Если крахмал предварительно охлажден, он увеличивает вязкость. Это требует снижения содержания сухих веществ в концентрате.

## Другие компоненты

Имеется также множество других ингредиентов, которые обычно вводятся в продукт в малых количествах, таких как

- витамины
- вкусовые добавки
- эмульгаторы
- стабилизаторы
- красители

Как правило, они не создают особых проблем для распылительной сушки.

- Соли и другие химикалии

Чем выше содержание солей и химикалий, тем труднее сушка из-за увеличения гигроскопичности.

## Сухое молоко обычной растворимости

Неагломерированное сухое молоко называют сухим молоком обычной растворимости. Наиболее распространенные продукты – это сухое обезжиренное или цельное молоко.

Процесс сушки может быть либо одноступенчатым, см. рис. 113, обсуждение на стр. Ошибка! Закладка не определена., или двухступенчатым, см. рис. 114, обсуждение на стр. Ошибка! Закладка не определена..

Перед выпариванием молоко очищается от слизи в центробежном сепараторе, а если требуется произвести сухое обезжиренное молоко, одновременно отделяется жир.

В выпарном аппарате молоко пастеризуется при 70-100 °C, в зависимости от требуемых свойств сухого продукта (см. стр. Ошибка! Закладка не определена.). Молоко часто сгущают до 48-50 % СВ., в зависимости от качества молока и применяемой системы сушки.

Распылительная сушилка работает при температуре 180-200 °C в случае сухого цельного молока и 180-230 °C в случае сухого обезжиренного молока.

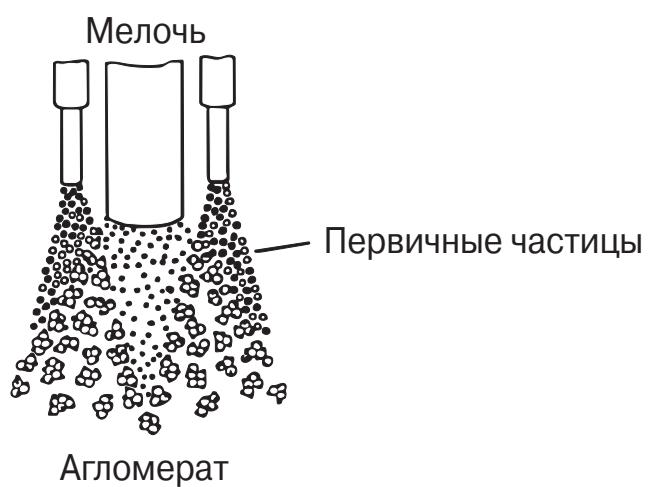
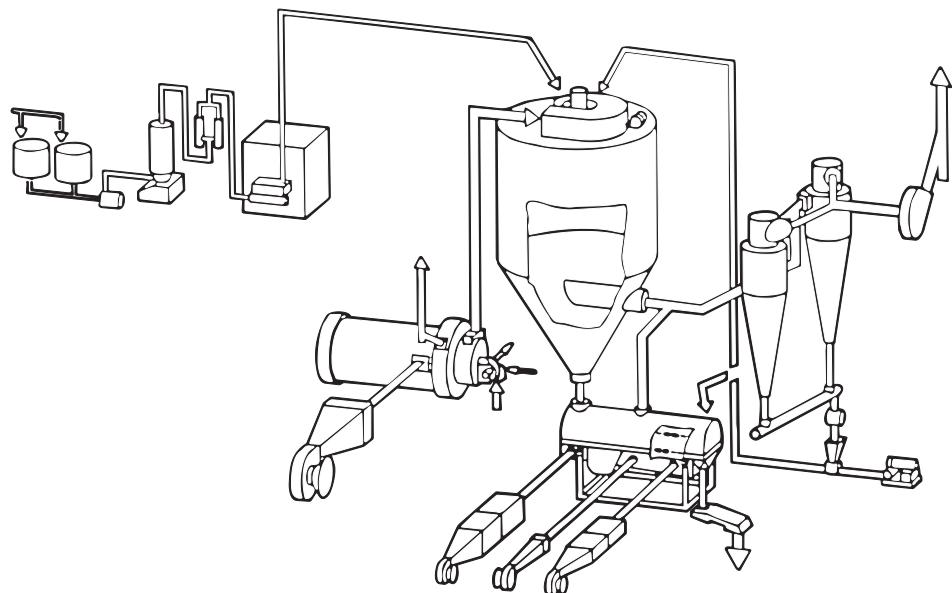


Рис. 115 Распылительная сушилка с аппаратом Vibro-Fluidizer в качестве агломератора-инстантизатора (SDI).

При одноступенчатой сушке распылительная сушилка работает так, что порошок приобретает влажность готового продукта на выходе из сушильной камеры. При двухступенчатой сушке первичная сушка заканчивается при влажности на 2-10 % выше, чем у готового продукта. Избыток влаги испаряется в статическом псевдоожженном слое или в виброкипящем слое (Vibro-Fluidizer), а охлаждение происходит либо в пневмотранспортной системе, либо в аппарате Vibro-Fluidizer.

Для распыления концентрата применяются роторные распылители или форсунки. Если используются форсунки, то концентрат непосредственно перед распылением требуется нагреть до 60-70 °C для снижения вязкости. В наиболее современных сушилках концентрат нагревается и при распылении дисками, так как при этом, помимо пастеризации, на 3-5 % увеличивается производительность по испаренной воде.

Типичные условия сушки представлены ниже:

Параметры	ОДНА СТУПЕНЬ				ДВЕ СТУПЕНИ				
	Форсунки		Диск		Форсунки		Диск		
	Обез- жирен- ное	Цель- ное	Обез- жирен- ное	Цель- ное	Обез- жирен- ное	Цель- ное	Обез- жирен- ное	Цель- ное	
Температура сушки	°C	180	180	200	180	210	200	210	200
Сухие вещества	%	45	42	48	48	47	47	48	48

Для такого сухого молока характерно следующее:

- молоко состоит из отдельных частиц
- имеет высокую насыпную плотность
- пылит, если это сухое обезжиренное молоко
- обычная (не повышенная) растворимость

## Быстрорастворимое сухое молоко

За последние десятилетия постоянно рос спрос на сухие продукты, легко растворимые в холодной воде.

Обычные неагломерированные сухие продукты при смешивании с водой образуют комки и не растворяются без энергичного механического перемешивания, что делает их мало-привлекательными для потребителя.

Давно известно, что агломерированный порошок, т.е. порошок, в котором отдельные частицы образуют более крупные гранулы или агломераты, см. рис. 115, при смешивании с водой ведет себя совершенно иначе, чем обычный порошок.

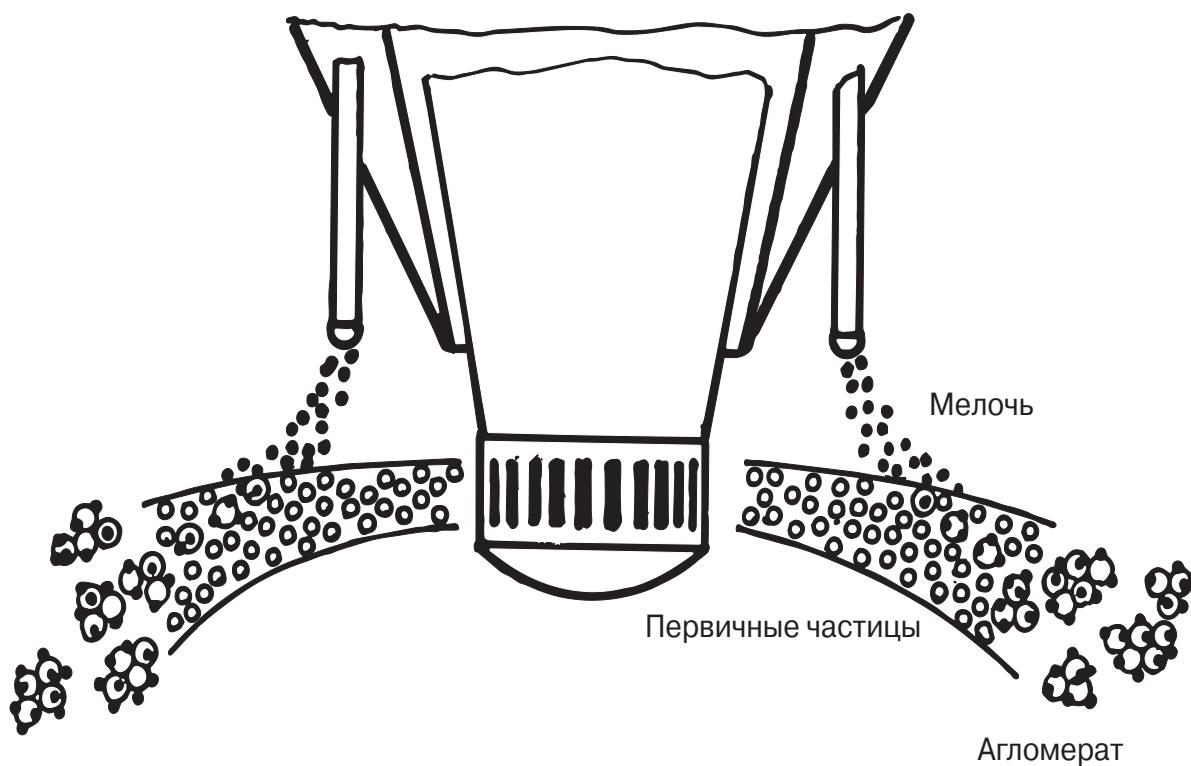


Рис. 116 Агломерация посредством возврата мелочи (принудительная вторичная агломерация).

Агломерация подробно обсуждается на странице Ошибка! Закладка не определена..

Установка работает таким образом, что на выходе первой ступени сушки порошок имеет влажность на 2-10 % выше, чем требуемая влажность готового продукта. Фракция, отделяемая в циклоне, возвращается в распылитель, где мелкие сухие частицы сталкиваются с первичными частицами, образуя агломераты. См. рис. 116.

Поэтому из камеры выходит теплый влажный сыпучий продукт, состоящий из стабильных агломератов. После мягкой повторной сушки во встроенном псевдоожиженном слое или в виброкипящем слое аппарата Vibro-Fluidizer структура агломерата не нарушается. Охлаждение обязательно происходит в псевдоожиженном слое.

Для такого сухого молока характерно следующее:

- агломерированный продукт
- не пылит
- насыпная плотность ниже, чем у порошка из установки с пневмотранспортной системой
- хорошая сыпучесть

Более низкая температура сушильного воздуха на выходе и соответственно более низкая температура продукта обеспечивает:

- лучшую растворимость благодаря меньшему тепловому повреждению
- меньшее содержание абсорбированного воздуха, поскольку на критической стадии сушки, когда содержание воды составляет 30-10 %, исключается взрыв частиц.

Если говорить только о сухом обезжиренном молоке, то в результате агломерации образуется

- быстрорастворимый продукт

Кроме производственного оборудования необходимо иметь средства контроля качества готового продукта, особенно в том, что характеризует его, как продукт повышенной растворимости.

Неудивительно, что первый метод, который стали применять для характеристики быстрорастворимых продуктов, был основан на определении смачиваемости, поскольку это то свойство, которым быстрорастворимый продукт больше всего отличается от обычного. Для этого измерялось время, необходимое для увлажнения определенного количества порошка, т.е. время от первого контакта с водой до момента, когда порошок полностью пройдет через поверхность воды.

Позднее стало понятно, что смачивание – только первый шаг довольно сложного процесса восстановления влагосодержания, и этот процесс состоит из ряда явлений, которые можно описать следующим образом:

**Явление восстановления:**

Смачивание  
Диспергирование  
Растворение

**Свойства сухого молока**

Смачиваемость  
Диспергируемость  
Растворимость

Разделение явления восстановления на вышеуказанные шаги помогает понять этот процесс, например, найти причины недостаточно быстрого растворения. С другой стороны, нужно понимать, что не существует четкой границы между разными шагами восстановления, так что невозможно определить отдельные характеристики вне зависимости от остальных. Для надлежащей оценки продукта нужно учитывать все эти характеристики.

## **Быстрорастворимое сухое обезжиренное молоко**

В производстве быстрорастворимого сухого обезжиренного молока важнейшую роль играет агломерация.

Смачивание и диспергирование в воде отдельной частицы сухого обезжиренного молока не представляет проблем, так как такая частица быстро растворяется. Но если в воду насыпают большое количество неагломерированного сухого обезжиренного молока, первая порция порошка, вступившая в контакт с водой, растворяется, образуя пленку непроницаемого для воды концентрата, что останавливает дальнейшее смачивание. Такая смесь трудно диспергируется, в ней образуются влажные комки, внутри которых остается сухой порошок.

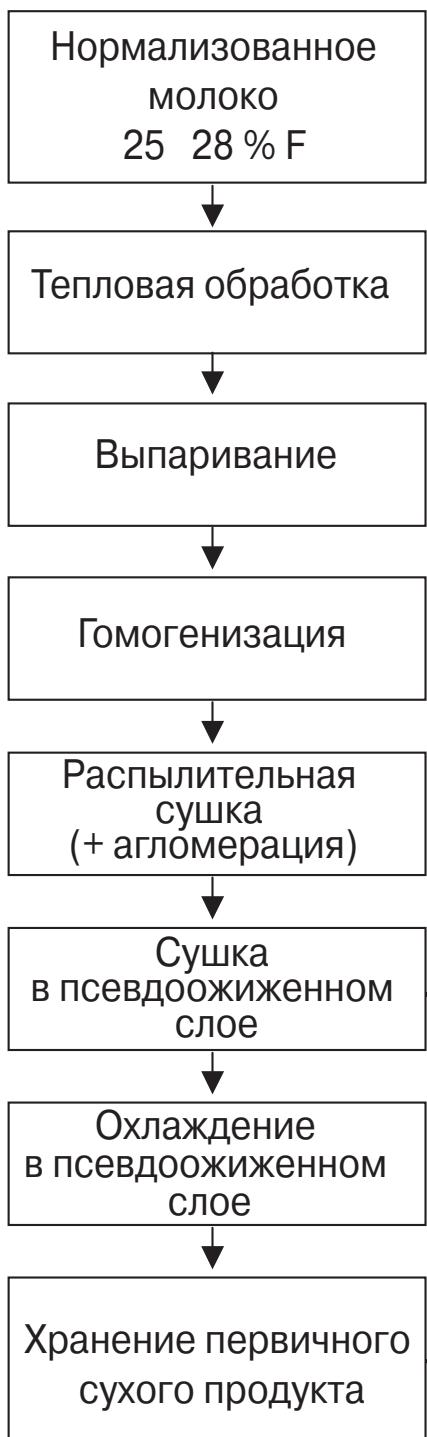
Для предотвращения слишком быстрого смачивания частиц их агломерируют, снижая этим удельную поверхность. Удельную поверхность можно также уменьшить, производя порошок из более крупных первичных частиц, но это создает опасность повышения индекса растворимости.

Кроме того, свойства, необходимые для быстрорастворимого продукта, особенно смачиваемость, улучшаются, если агломераты достаточно компактны, чтобы впитывание воды и растворение происходило медленно. Это позволяет агломератам диспергироваться в воде, после чего происходит полное растворение. Само собой разумеется, что молоко должно иметь и хороший индекс растворимости.

Существуют следующие способы улучшения агломерации:

- снижение температуры пастеризации перед выпариванием
- повышение содержания сухих веществ в концентрате
- увеличение размеров первичных частиц
- увеличение возврата мелочи
- ввод мелочи ближе к диску или форсунке
- увеличение влажности порошка на выходе сушильной камеры

**1 технологическая линия  
(производство первичного  
сухого продукта)**



**1 технологическая линия  
(лецитинизация и упаковка)**

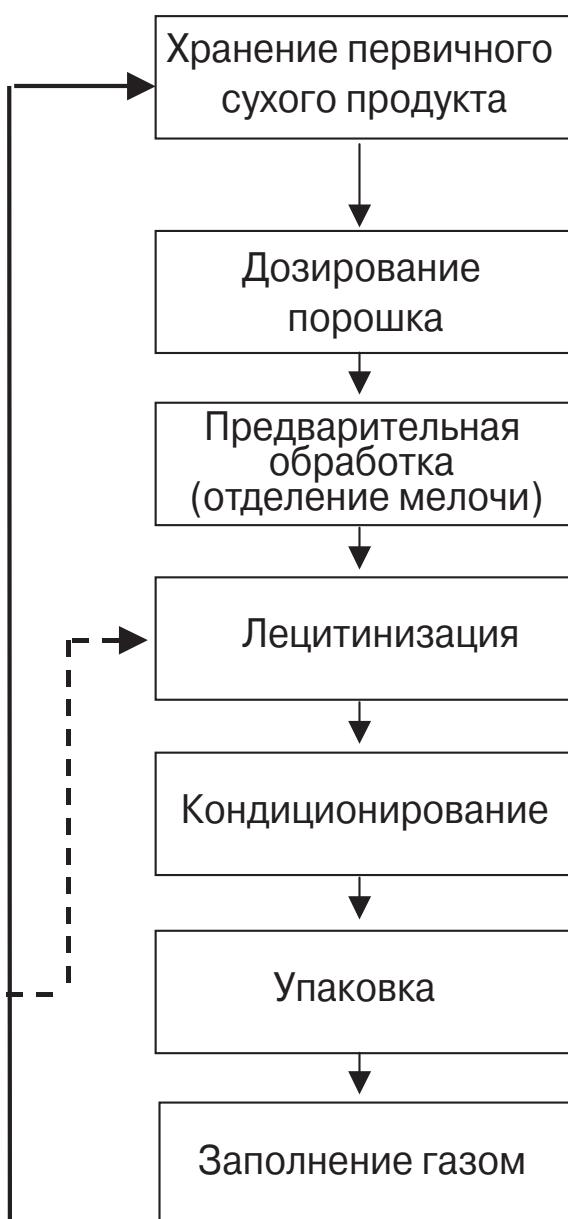


Рис. 117 Схема процесса. Производство быстрорастворимого сухого цельного молока.

Типичные рабочие условия в распылительной сушилке, производящей первоклассное быстрорастворимое сухое обезжиренное молоко (они, конечно, зависят от типа сушилки):

- Температура сушки  $200^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$
- Содержание сухих веществ в концентрате 48-50 %

## **Быстрорастворимое сухое цельное молоко**

Для растворения сухого цельного молока температура воды должна быть выше  $40^{\circ}\text{C}$ , поскольку частицы такого молока всегда покрыты тонким слоем жира, который делает частицы гидрофобными при низкой температуре воды. Однако в последние десятилетия постоянно рос спрос на сухое цельное молоко, хорошо растворяющееся в холодной воде, а для этого молоко должно быть не только агломерированным, но и содержать поверхностно-активное вещество.

Для этой цели можно использовать получаемый из сои лецитин, растворенный (для перевода в жидкую форму) в чистом безводном молочном жире. Лецитин обладает превосходными функциональными свойствами, т.е. обеспечивает быстрое растворение. Безводный молочный жир применяется по той причине, что это натуральный компонент молока, тогда как использование растительного масла (хотя во многих случаях именно так и поступают) может расцениваться как фальсификация.

Количество лецитина и общего свободного жира (исходный свободный жир + добавленный безводный молочный жир + лецитин) в готовом продукте может составлять 0,1-0,3 % и 1-2 % соответственно. Однако такие вариации приводят к большим различиям в свойствах продукта.

Нужно помнить, что высокое содержание общего свободного жира при высоком содержании лецитина улучшает смачиваемость, но, с другой стороны, ухудшает сыпучесть и, особенно, диспергируемость. При содержании лецитина более 0,5 % ощущается характерный соевый вкус. Структура порошка и степень агломерации также существенны, поскольку плохо агломерированный порошок требует большего количества увлажнителя, чем хорошо агломерированный продукт.

Схема производства быстрорастворимого сухого цельного молока показана на рисунке 117. Как видно из схемы, весь процесс разделен между двумя технологическими линиями – линии производства сухого молока на установке, показанной на рис. 84, и линии лецитинизации и упаковки, см. рис. 118.

Разделение процесса на две технологические линии – это, как будет объяснено ниже, самый рациональный способ такого производства.

При таком двухступенчатом процессе первичный сухой продукт хранится в промежуточном накопителе. Этот продукт нужно защитить от повреждения в результате механических воздействий. Поэтому для промежуточного хранения желательно использовать контейнеры вместимостью 1-2  $\text{m}^3$ .

Затем первичный сухой продукт перегружают из таких контейнеров в питательный бункер, откуда шнеком-дозатором подают в первый Vibro-Fluidizer. Здесь порошок нагревается, одновременно из него выделяются мелкие частицы.

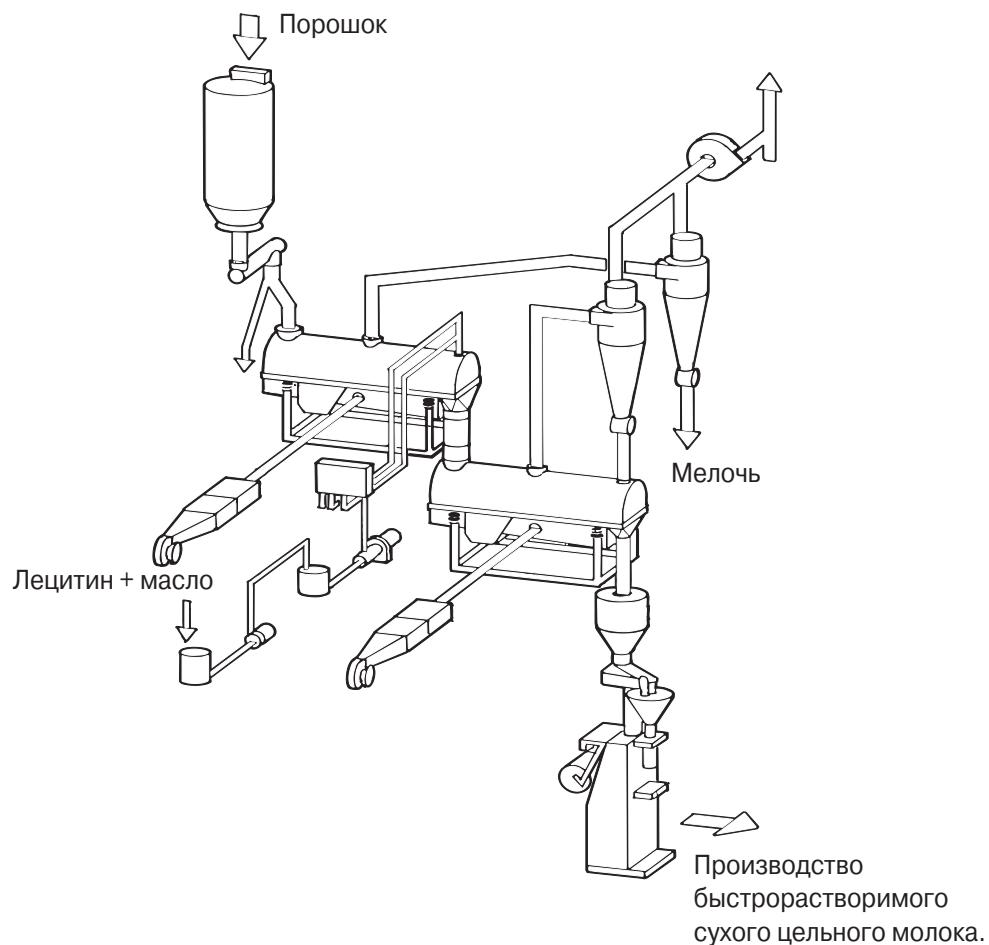


Рис. 118 Двухступенчатая установка лецитинизации.

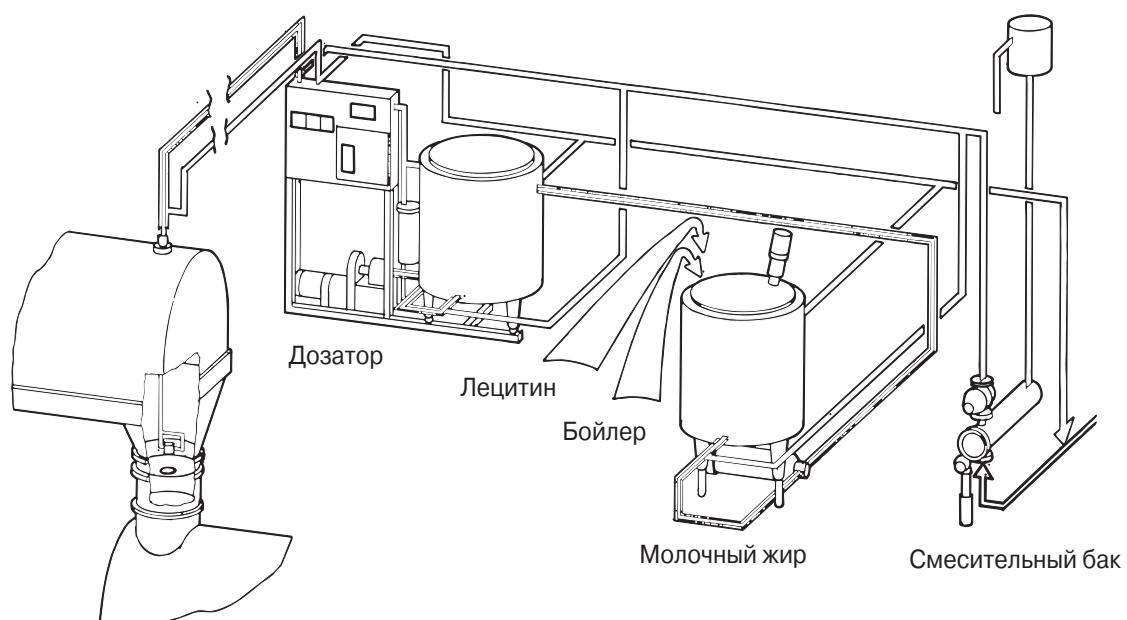


Рис. 119 Оборудование дозирования лецитина.

Оборудование дозирования лецитина состоит из двух танков, насоса-дозатора, распылителя порошка с двумя форсунками и пульта управления. Первый танк служит для приготовления увлажнителя, а второй – в качестве питательного бака, откуда увлажнитель с регулируемой скоростью подается в двойную форсунку и распыляется, смешиваясь с порошком. See Fig. 119.

Расход, температура и давление увлажнителя и сжатого воздуха регистрируются. Система управления автоматически прекращает подачу порошка, если по какой-либо причине прекращается подача лецитина. Соответственно, из установки не выгружается порошок без лецитинового покрытия. Второй Vibro-Fluidizer, в который также подается теплый воздух, обеспечивает мягкое, но достаточное для равномерного распределения лецитина, перемешивание порошка.

Выгружаемый из аппарата лецитинизации порошок упаковывается в потребительскую тару. Упаковочную машину с бункером для кратковременного промежуточного хранения рекомендуется поместить непосредственно под агрегатом лецитинизации, чтобы избежать излишней транспортировки порошка.

Как показано на схеме процесса (пунктирная линия на рис. 117), производство сухого молока и лецитинизацию можно осуществлять совместно. В этом случае распылитель порошка с форсункой для распыления лецитина устанавливается между встроенным псевдоожиженным слоем и аппаратом Vibro-Fluidizer, см. рис. 120. На этой схеме показано оборудование для приемки, предварительной обработки, нормализации и выпаривания молока. Этот процесс дает продукт приблизительно такого же качества, как вышеописанный разделенный процесс.

Однако раздельный процесс во многих отношениях предпочтительнее. Фасовка сухого молока в потребительскую тару не может быть полностью непрерывным процессом, так как всегда существует задержка между производством порошка и его фасовкой. Во время этой задержки порошок должен храниться от одного до нескольких дней насыпью, предпочтительно в небольших контейнерах во избежание повреждения.

Нелецитинированный порошок хранится лучше. Поэтому оборудование для лецитинизации желательно включить в линию упаковки.

Промежуточное хранение порошка позволяет проанализировать продукт и рассчитать состав и количество увлажнителя для оптимизации свойств готового продукта.

Еще одно преимущество раздельного процесса состоит в том, что мелочь, образующаяся при хранении и транспортировке, выдувается в первом аппарате Vibro-Fluidizer агрегата лецитинирования. Эта фракция представляет собой сухое цельное молоко обычной растворимости (не агломерированное) и может продаваться в таком качестве. Ее доля обычно составляет менее 5 %.

Однако в настоящее время большая часть быстрорастворимого сухого цельного молока производится на установках MSD, оборудованных агрегатами для лецитинизации, помещенными между встроенным (статическим) псевдоожиженным слоем и аппаратом Vibro-Fluidizer в пределах одной технологической линии, см. рис. 119. Готовый продукт подается в бункеры малоскоростными вакуумными системами транспорта, которые не повреждают агломераты, а затем фасуется либо в потребительскую тару, либо в 25 кг мешки. Для продления срока хранения продукта транспортные линии могут оснащаться оборудованием для подачи N<sub>2</sub> или CO<sub>2</sub>.

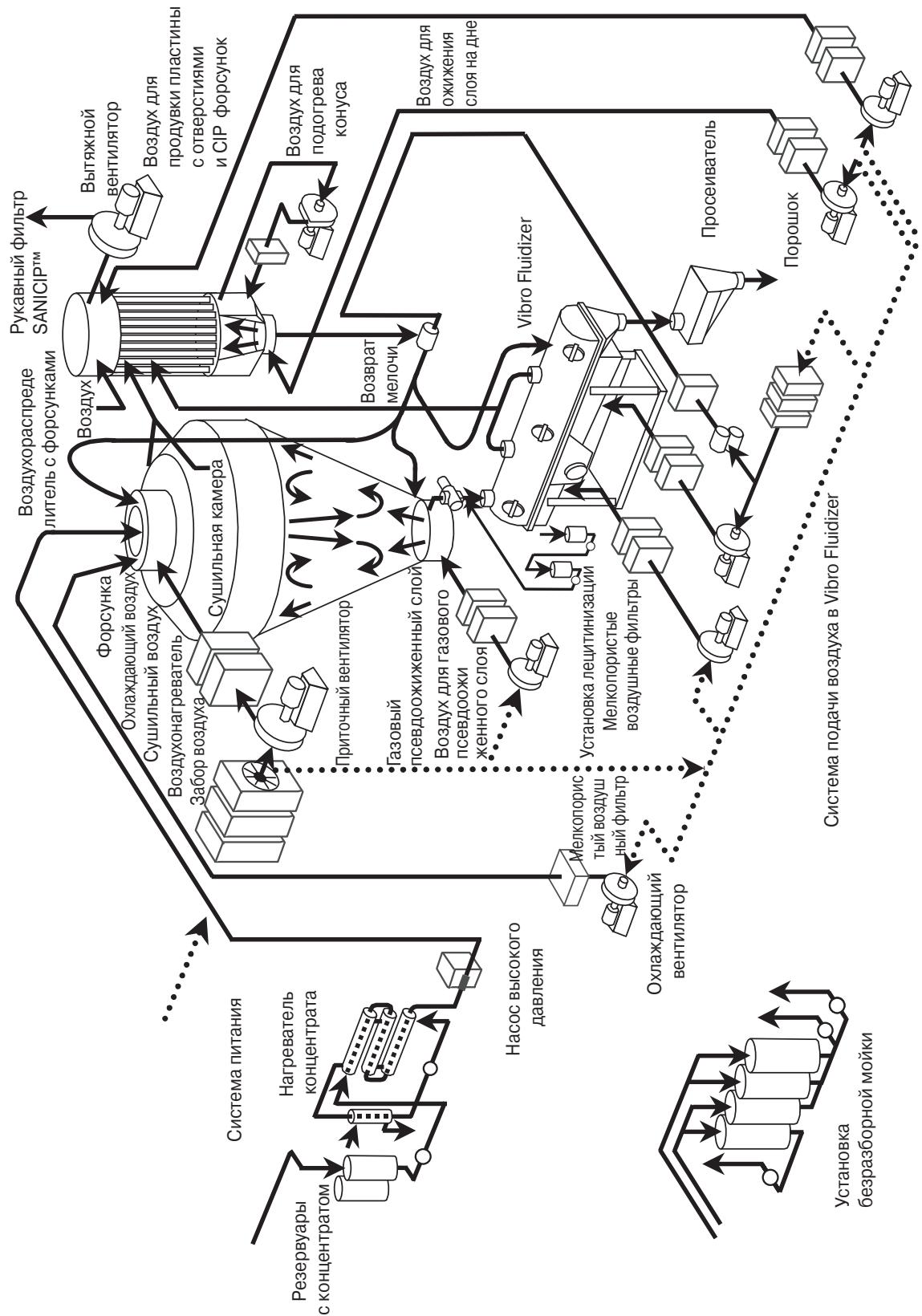


Рис. 120 Комплектная установка (MSD) для производства быстрорастворимого сухого цельного молока.

## Сыворотка

Постоянный рост внимания общества к проблемам загрязнения, а также интенсивная индустриализация молочной промышленности, сопровождающаяся вытеснением мелких перерабатывающих предприятий, делает традиционные способы обращения с сывороткой, т.е. либо возврат на фермы для кормления телят или поросят или в качестве удобрения, либо простой сброс в канализацию, весьма сомнительными. Поэтому в последние годы возникла необходимость найти новое применение этому продукту, который раньше считался отходом и с которым обращались соответственно. Однако присутствие в нем компонентов высокой пищевой ценности и современные технологии открыли новые возможности применения сыворотки.

При этом важно, чтобы с сывороткой обращались как с первосортным продуктом, т.е. охлаждали и перерабатывали в течение нескольких часов, чтобы получаемый продукт также был первосортным. Некоторые технологические процессы невозможно реализовать при низком качестве сыворотки.

Свежая сыворотка, образующаяся при традиционном производстве сыра, имеет приблизительно следующий состав:

Компоненты	% сухих веществ, прибл.	
Вода	94.25%	
Белок	0.80%	13
Лактоза	4.30%	75
Зола	0.55%	10
Жиры	0.10%	2

Однако хорошо известно, что состав сыворотки сильно меняется в зависимости от типа сыра, заквасочной культуры и свертывающего фермента. Кроме того, состав молока зависит от сезона и от породы коров. Все это, вместе с изменениями имеющегося количества сыворотки, еще больше затрудняет ее переработку.

На рис. 121 представлены типичные процессы, применяемые для обработки сыворотки. Там же показан процесс распылительной сушки обезжиренного молока и его последующего восстановления для применения в производстве сыра, см. стр. 62, а также распылительной сушки в производстве сыра, см. стр. 66.

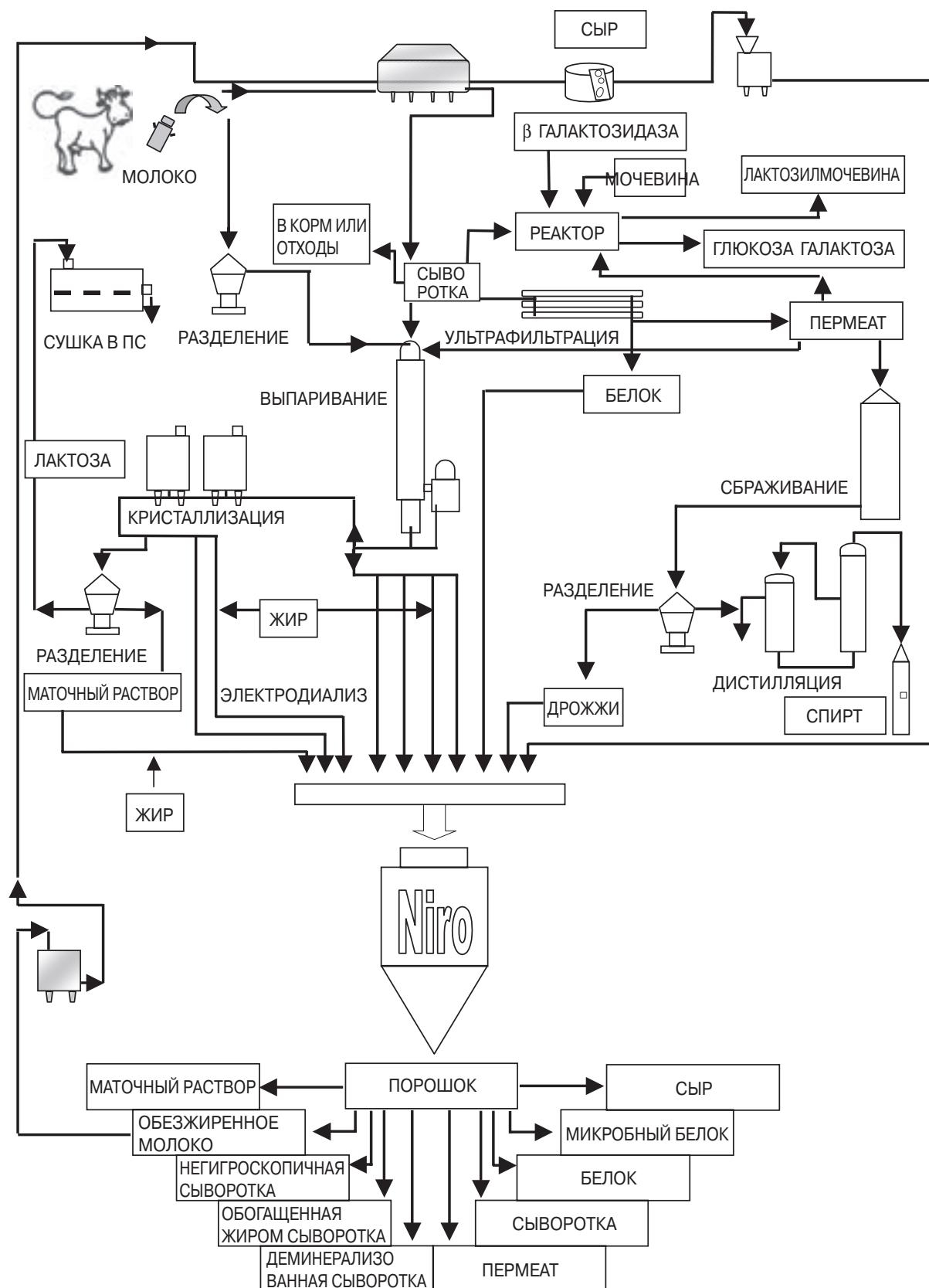


Рис. 121 Различные процессы обработки сыворотки.

## Захоронение

Со времен индустриализации сыроварения сыворотка в больших количествах сбрасывается в реки, озера и другие водоемы. Однако поскольку сыворотка содержит органические вещества, для их разложения требуется кислород, и захоронение сыворотки оказывает значительное влияние на окружающую среду. Если сыворотка сбрасывается в таких количествах, что на ее разложение расходуется весь присутствующий в воде кислород, все живое в водоеме погибает, и там начинается гнилостный процесс. Очевидно, что допустимый расход сбрасываемой сыворотки зависит от имеющегося кислорода, который определяется расходом воды и содержанием в ней кислорода. Поэтому трудно сформулировать точные требования к допустимому сбросу сыворотки. В некоторых странах, например, в Дании, вообще запрещено сбрасывать сыворотку без предварительной очистки. Для оценки содержания органических примесей в сточных водах используется потребление кислорода для биологического разложения в течение 5 суток, БПК<sub>5</sub>. Среднее значение БПК<sub>5</sub> для бытовых сточных вод составляет 300 мг/л. При среднем сбросе сточных вод 200 л на человека в сутки это дает 60 г кислорода. Если БПК<sub>5</sub> сыворотки равно 60 г/л, то 1 л сыворотки соответствует суточному загрязнению от одного человека.

Вместо того чтобы очищать сыворотку в специальных установках, некоторые молочные заводы избавляются от больших количеств сыворотки, распыляя ее на полях, что выгодно и заводу, и фермерам. Расход сыворотки на гектар зависит от типа пастбища и от осадков. Такое распыление обычно осуществляют раз в 14 дней, для чего требуются обширные территории вблизи сыроподельного завода (удаленные не менее чем на 200 м от ближайшего жилья). Количество распыляемой сыворотки составляет около 7 м<sup>3</sup>/га/сутки.

## Утилизация жидкой сыворотки в качестве корма

Сыворотка всегда считалась приемлемым кормом, особенно для свиней. Однако нестабильность поставки и состава сыворотки делает ее прямое потребление проблематичным.

Испытания на поросятах, проведенные в Дании более 100 лет назад, показали, что:

- 1 кг обезжиренного молока можно заменить 2 кг сыворотки
- 1 кг ячменя можно заменить 12 кг сыворотки

Свиньи весом 50 кг и выше могут выпивать около 15 кг сыворотки в день.

Однако требования к количеству и качеству бекона и мяса взрослых, были выведены новые породы свиней, способные усваивать из корма больше белка, а это значит, что если бы единственным источником белка для свиней являлась бы сыворотка, то потребляемая с нею вода создавала бы проблемы для пищеварения. Для преодоления этих трудностей стали использовать смесь сыворотки и обезжиренного молока (50/50), либо непосредственно, либо после выпаривания до 20 % СВ.

Введение сыворотки в корм свиноматок оказалось хорошей идеей, отчасти потому, что они нуждаются в большом количестве жидкости (15-25 кг/сутки), отчасти из-за высокой потребности в витамине В, которого в сыворотке много, особенно В<sub>2</sub> (рибофлавина) и пантотеновой кислоты.

Для телят жидкую сыворотку также оказалась ценным кормом, однако в возрасте 2-4 месяцев им рекомендуется давать смесь сыворотки с обезжиренным молоком, и только после 4 месяцев они могут пить чистую сыворотку в количестве 10-15 кг/сутки. Телят до 15 месяцев выгодно кормить жидкой сывороткой, она позволяет сэкономить много концентратов или обезжиренного молока. Было даже доказано, что откормленные телята лучше растут на сыворотке, чем на том же количестве кормовых единиц в форме обезжиренного молока.

Из вышесказанного видно, что жидкую сыворотку легко утилизировать для кормления поросят и телят. Однако из-за высокой потребности в сыворотке и из-за того, как она обрабатывается потребителем (очень часто сыворотка ферментирована или хранится несколько дней и поэтому содержит побочные продукты, нарушающие пищеварение), жидкую сыворотку не слишком привлекательна для фермеров, особенно для больших животноводческих хозяйств.

Поэтому на заводах часто пользуются распылительной сушкой для превращения сыворотки в сухой продукт. Сухая сыворотка долго хранится, имеет постоянное содержание сухого вещества и позволяет избежать сезонных колебаний поставок.

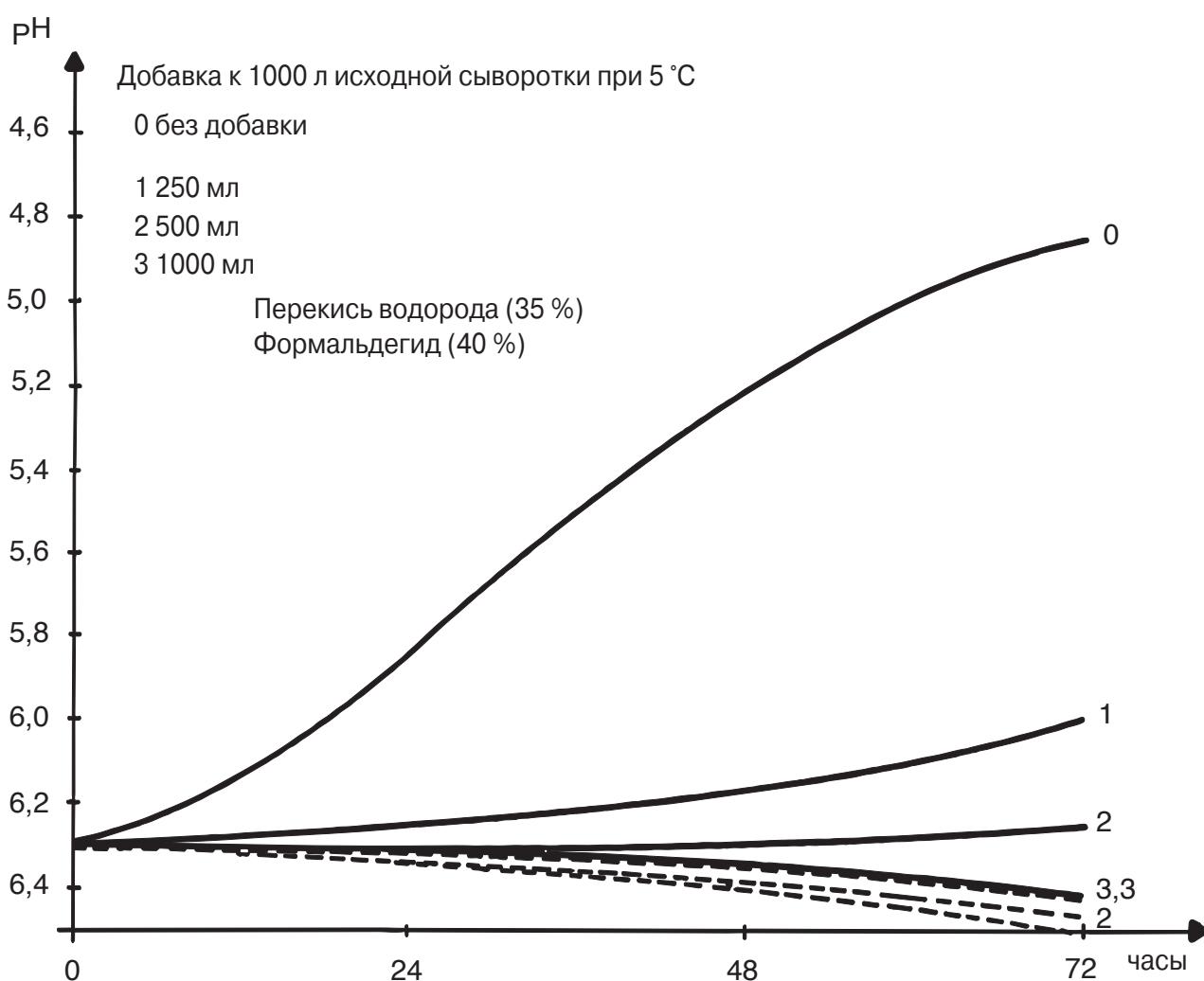


Рис. 122 Консервирование сыворотки формальдегидом и перекисью.

## Сушка сыворотки при традиционном сыроварении

Перед сушкой сыворотка концентрируется, при этом удаляется до 90 % воды. Это делается в многокорпусном выпарном аппарате с падающей пленкой, оборудованном термомокомпрессором для экономии пара. Помимо основных теплообменников выпарной аппарат оснащен подогревателями, где сыворотка нагревается вторичным паром перед пастеризацией острым паром – поверхностной либо контактной.

Концентрат сыворотки перекачивается либо в резервуары для кристаллизации, либо непосредственно в распылительную сушилку насосом с регулируемой производительностью. Распылительная сушилка может быть оборудована либо пневмотранспортной системой, либо псевдоожиженными слоями для повторной сушки и охлаждения.

Предварительная обработка перед выпариванием заключается в следующем: свежая сыворотка должна быть охлаждена до 5-10 °C немедленно после слива из сырной ванны, чтобы предотвратить бактериальное разложение, которое осложняет сушку. Для консервации охлажденной сыворотки можно применять  $H_2O_2$  или формальдегид. Формальдегид предпочтительнее, см. рис. 122. Кроме того,  $H_2O_2$  вызывает значительную питтинговую (точечную) коррозию рабочих колес насосов выпарного аппарата.

Рекомендуется осветлить сыворотку для удаления казеиновых мицелл, которые пригорают и налипают на трубы выпарного аппарата, что приводит к появлению обесцвеченных частиц в готовом сухом продукте. Остаток жира в сыворотке также следует удалить центробежной сепарацией, так как жир ведет к образованию отложений в сушильной камере.

Сыворотка, как правило, имеет следующие типичные показатели:

- Тест на осадок:	не более 0,1 мг/25 мл
- pH:	не менее 6,3
- Титруемая кислотность:	не более 0,12 %
- Молочная кислота:	не более 20 мг/100 мл
- Содержание жиров:	не более 0,05 %
- Содержание лактозы:	от 70 до 74 %
- Содержание белка:	не менее 12 %
- Неконденсирующиеся газы:	не более 0,02 % вес.
- Содержание кальция:	не более 300 ppm
- Содержание магния:	не более 100 ppm
- Содержание хлоридов:	не более 1200 ppm

Если температура хранения сыворотки между сыроварней и выпариванием превышает 10 °C, время хранения не должно превышать 1 часа. Если температура хранения меньше 10 °C, его длительность не должна превышать 10 часов.

## Выпаривание

В выпарном аппарате сыворотка подогревается до 60-70 °C (в зависимости от рабочего режима), затем пастеризуется. Подбор температуры и времени выдержки позволяет изменять степень денатурации белков и тем самым обеспечивать требуемые свойства готового продукта.

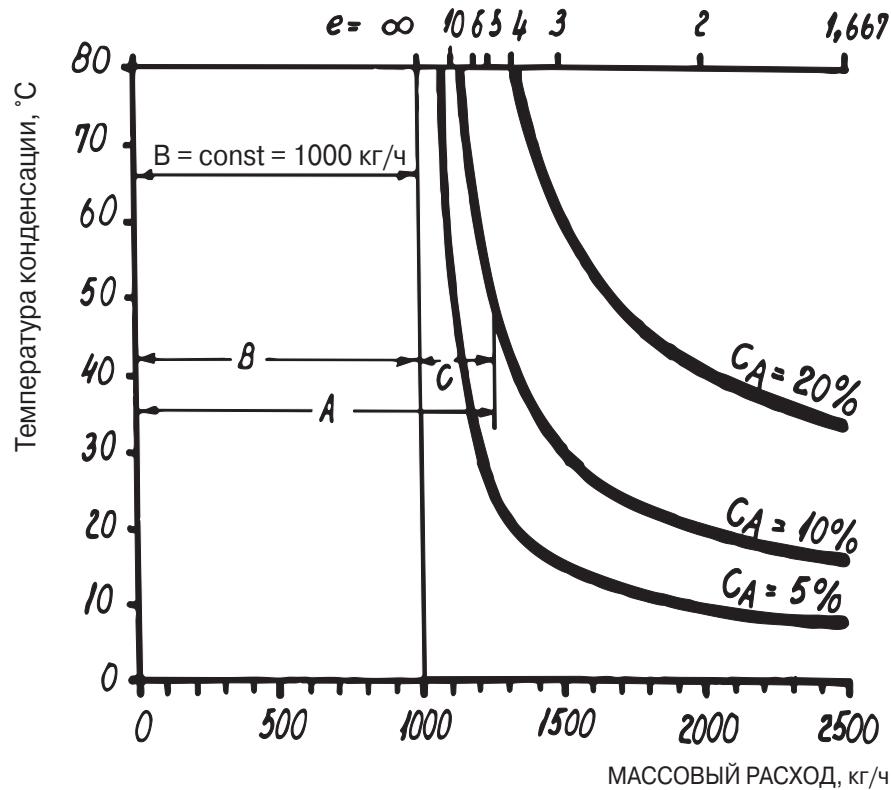


Рис. 123 Коэффициент концентрирования С как функция массового расхода и производительности по выпаренной воде.

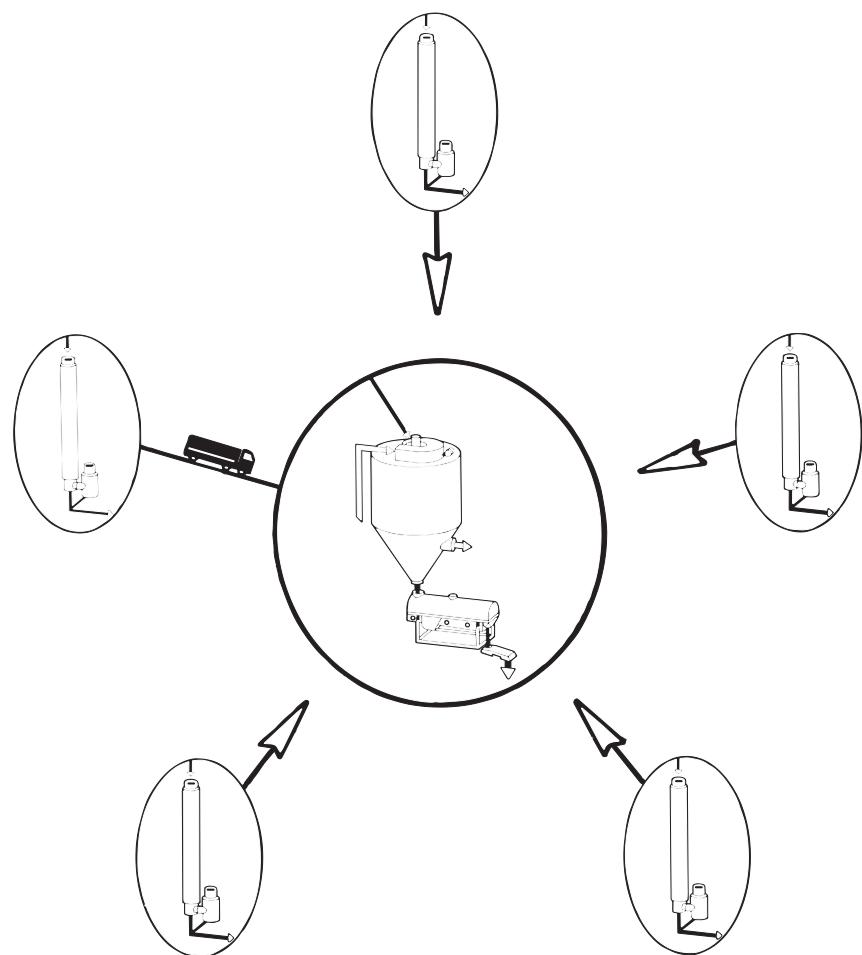


Рис. 124 Предварительное концентрирование сыворотки для транспортировки на сушильную установку.

Вообще говоря, вязкость концентрированной сыворотки увеличивается, а слеживаемость уменьшается с увеличением параметра «температуры-времени» пастеризации. Сыворотка упаривается до концентрации сухих веществ, подходящей для последующего процесса распылительной сушилки, т.е. до 40 – 60 % с.в. Поскольку исходная сыворотка содержит только 6 % с.в., это означает, что  $e = 10$  (см. формулу (2) на стр. Ошибка! Закладка не определена.). Поэтому выпарной аппарат должен быть оборудован системами контроля и регулирования расхода и плотности, так как даже небольшие отклонения приведут к огромным изменениям содержания сухих веществ в концентрате. См. диаграмму на рис. 123.

Особое внимание следует уделить содержанию  $\text{Ca}^{++}$  в сыворотке. Са-фосфат – это соль, выпадающая в осадок с увеличением концентрации и температуры. Такой процесс может оказаться серьезной проблемой в первом корпусе, где будут формироваться отложения на трубах, если не провести декальциниацию, см. стр. 39. Или же можно каждые 6-8 часов промывать оборудование кислотой.

Поскольку исходная сыворотка содержит меньше сухих веществ, чем обезжиренное молоко, то концентрирование в выпарном аппарате, рассчитанном на обезжиренное молоко, даст меньшее количество упаренного продукта, поскольку производительность останется практически такой же. Это может ухудшить покрытие труб на последнем этапе выпаривания, что потребует рециркуляции или разделения нагревательной камеры.

Для повышения выхода из выпарного аппарата можно также повысить концентрацию сыворотки до 10-15 % СВ. на установке гиперфильтрации.

Если производство сухой сыворотки нерентабельно из-за недостатка сырья (меньше 400000 л/сут – зависит от страны и конкретного предприятия), можно ограничиться предварительным выпариванием. Небольшие молочные хозяйства могут упаривать сыворотку до 30 % с.в., охлаждать и отвозить для концентрирования на завод. Тем самым, снижаются транспортные расходы. Такую предварительно упаренную сыворотку можно смешать с собственным заводским сырьем и затем выполнить окончательное выпаривание и распылительную сушку, см. рис. 124. Экономическая эффективность всего процесса: от исходной сыворотки до сухого порошка, – зависит от страны и конкретного предприятия. Хорошо известно, что удаление воды в выпарном аппарате намного экономичнее, чем в распылительной сушилке (приблизительное соотношение 1:20), так что неудивительно, что конструкторские разработки были направлены на увеличение концентрации упаренного раствора. С увеличением этой концентрации требуется поднимать температуру на выходе распылительной сушилки (приблизительно 1 °C/1 % с.в.), что означает приближение температуры порошка к той, при которой он начинает налипать на стенки сушилки и забивать циклоны.

Температура прилипания зависит от состава сухой сыворотки, главным образом, от следующих компонентов:

- от содержания молочной кислоты и солей
- от содержания аморфной лактозы
- от содержания влаги

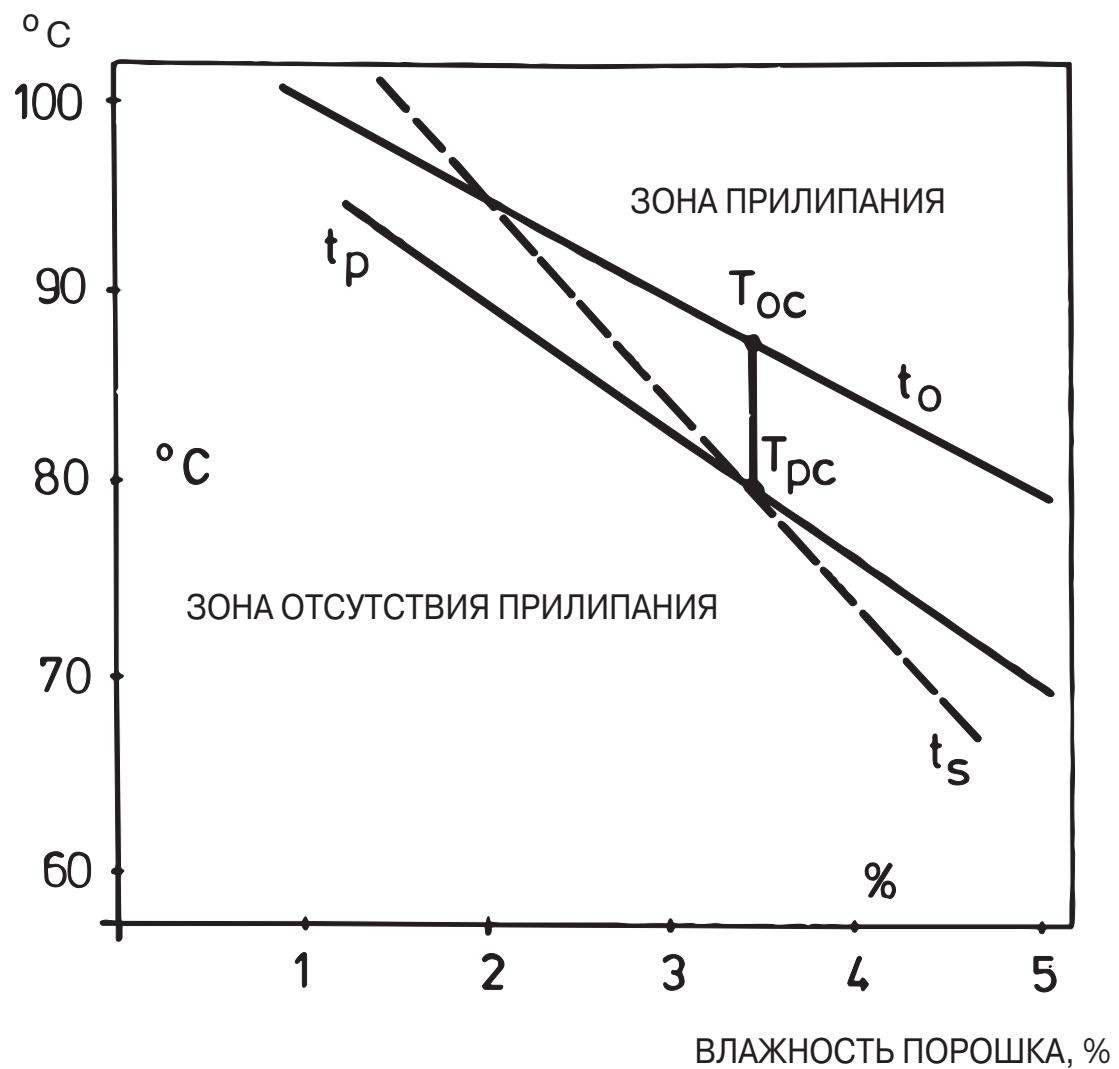


Рис. 125 Соотношение между содержанием влаги, температурой воздуха, температурой частиц и температурой прилипания.

### ***Содержание молочной кислоты***

Влияние содержания молочной кислоты исследовали экспериментально. Температура прилипания пробы сладкой сыворотки составляла 98 °C. При постепенном добавлении молочной кислоты до концентрации 16 % температура прилипания линейно увеличивалась до температуры 57 °C (пробы содержали 1,5-3,5 % влаги, что также влияло на температуру прилипания, но не в такой степени). Частичная или полная нейтрализации снижала температуру прилипания, но не до того значения, которое было у сладкой сыворотки, что связано с увеличением содержания солей.

### ***Содержание аморфной лактозы***

Превращение аморфной лактозы в  $\alpha$ -лактозы моногидрат в результате кристаллизации (см. стр. 27) приводит к увеличению температуры прилипания. Было показано, что сухая сыворотка с 80 % кристаллизацией лактозы имела температуру прилипания 78 °C, а тот же продукт с 45 % кристаллизации лактозы имел температуру прилипания 60 °C. То есть, глубокая кристаллизация, после которой в продукте остается лишь малая доля аморфной лактозы, позволяет увеличить содержание сухих веществ в концентрате приблизительно на 18 %.

### ***Содержание влаги***

Содержание влаги в сухой сыворотке – а также в частично высушеннем продукте между распылителем и выходом порошка – значительно влияет на температуру прилипания. График на рис. 125 показывает связь между температурой на выходе ( $t_o$ ) и температурой прилипания ( $t_s$ ). Если все остальные параметры сохраняются постоянными, влажность порошка, очевидно, зависит от температуры на выходе. Температура частиц продукта в распылительной сушилке ниже, чем температура воздуха на выходе, и эта разность температур увеличивается с увеличением содержания влаги. Линия ( $t_s$ ) показывает, что температура прилипания частиц сухой сыворотки зависит от содержания влаги. Эта линия пересекается с линией температуры продукта в точке ( $T_{pc}$ ), которая отображает максимальное (критическое) содержание влаги – и одновременно минимальную (критическую) температуру на выходе ( $T_{oc}$ ), при которых данный концентрат сыворотки можно сушить без проблем с прилипанием.

Из графика видно, что при температуре воздуха на выходе 90 °C температура продукта приблизительно равна 82,5 °C, а содержание влаги – 3 %, что соответствует температуре прилипания 84,5 °C. При таких условиях сушилка работает с запасом надежности 2 °C до точки прилипания, что соответствует приблизительно 0,2 % влаги.

Однако изменение рабочих условий могут привести к подъему температуры выше точки прилипания. Например, это возможно при следующих условиях:

- температура воздуха на выходе опускается на 2 °C
- концентрация сырья увеличивается на 1 %
- абсолютная влажность сушильного воздуха на входе увеличивается приблизительно на 5 г/м<sup>3</sup>
- кислотность обработанной сыворотки увеличивается приблизительно на 0,02 % молочной кислоты

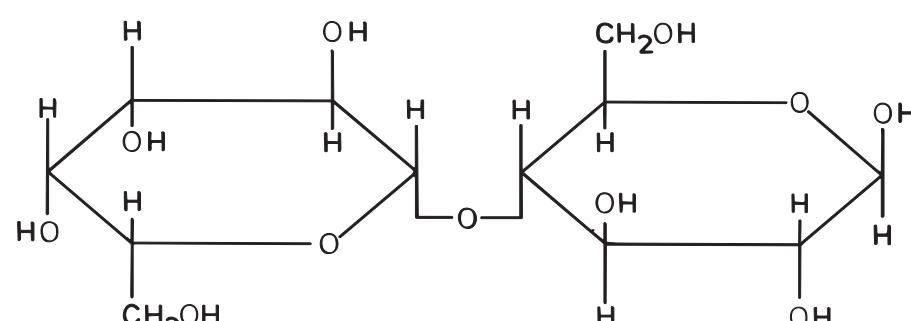
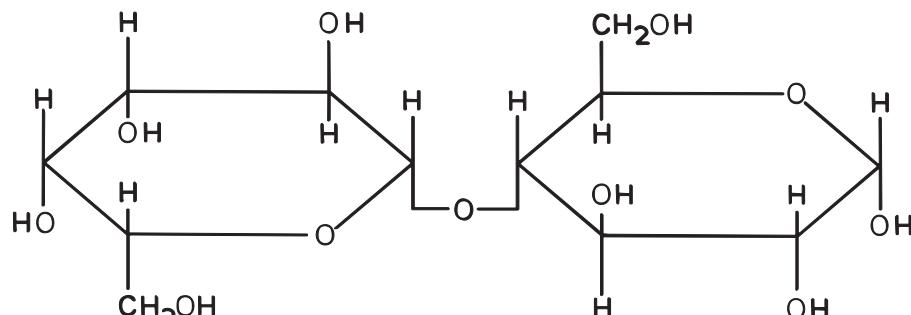


Рис. 126 Молекула лактозы в  $\alpha$  и  $\beta$  конфигурациях.

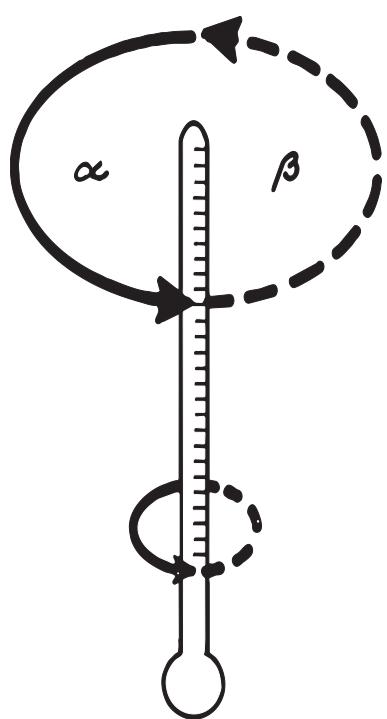


Рис. 127 Мутаротация.

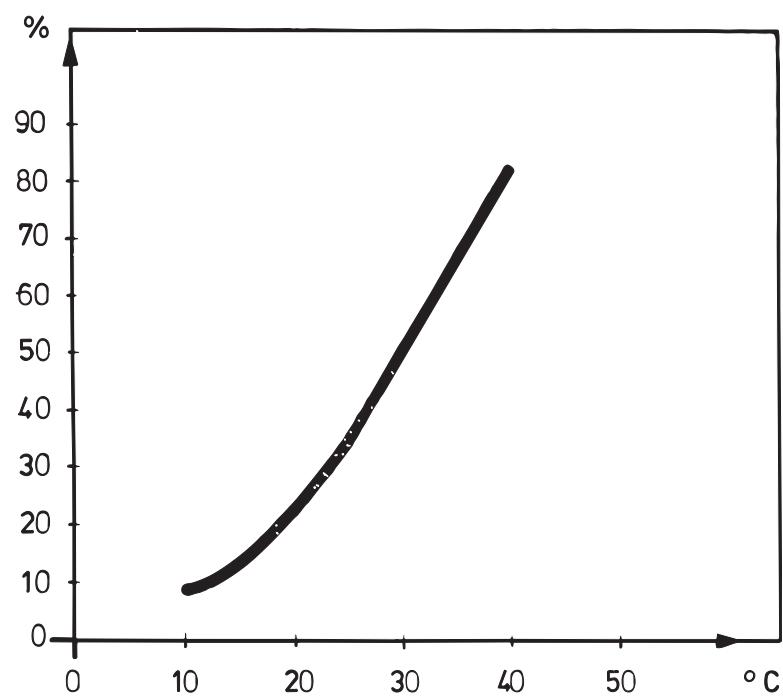


Рис. 128 Трансформация  $\beta$ -лактозы в  $\alpha$ -форму в течение 1 часа (в % от полной трансформации до достижения равновесия).

Вышеприведенные примеры действительны для данного типа сладкой сыворотки при температуре сушильного воздуха на входе 180 °C и при подаче упаренной сыворотки с концентрацией 44 % из выпарного аппарата непосредственно в сушилку, без предварительной кристаллизации. Это вполне обычные условия для сладкой сыворотки, не подвергающейся предварительной кристаллизации.

## Кристаллизация концентрата сыворотки

Предварительная кристаллизация концентрата поднимает точку прилипания, так как сушке подвергается сырье, содержащее намного меньше аморфной лактозы. Это позволяет значительно увеличить концентрацию сырья и температуру на входе.

Для понимания теоретической основы процесса кристаллизации нужно обратиться к физико-химическим свойствам лактозы, которая составляет примерно 3/4 сухих веществ сыворотки.

Лактоза – это дисахарид, сильно отличающийся по свойствам от других дисахаридов. Отличительная черта лактозы – определяемые температурой модификации, сопровождающиеся изменением физико-химических свойств.

В водном растворе молекула лактозы присутствует в двух формах –  $\alpha$  и  $\beta$ , представленных на рис. 126.

Эти  $\alpha$  и  $\beta$  формы находятся в состоянии обратимого равновесия, т.е. происходит постоянная трансформация  $\alpha$  формы в  $\beta$  и наоборот, называемая мутаротацией, см. рис. 127. Соотношение  $\alpha$  и  $\beta$  форм определяется температурой, см. рис. 128.

В сухой сыворотке, произведенной по вышеописанной технологии на установке с пневмотранспортной системой, лактоза присутствует в аморфном, стеклообразном состоянии. Эта форма лактозы чрезвычайно гигроскопична, она поглощает водяные пары, образуя  $\alpha$ -лактозы моногидрат.

Это вещество,  $\alpha$ -лактозы моногидрат, не обладающее гигроскопичностью, образуется также в концентрате жидкой сыворотки в результате кристаллизации лактозы из пересыщенного раствора. Поскольку  $\alpha$ -форма менее растворима, чем  $\beta$ -форма при данной температуре,  $\alpha$ -форма первой достигает точки пересыщения и образует кристаллы  $\alpha$ -лактозы моногидрата. На рисунке 129 представлены данные о растворимости  $\alpha$  и  $\beta$  лактозы для различных температур.

Удаление в результате кристаллизации  $\alpha$ -лактозы из раствора изменяет соотношение между  $\alpha$ - и  $\beta$ -формами, так что концентрация  $\beta$ -лактозы оказывается выше равновесной.

Вследствие мутаротации концентрация  $\alpha$ -лактозы опять поднимается выше точки пересыщения, и кристаллизация продолжается. Этот процесс протекает до тех пор, пока раствор остается пересыщенным, и не прекращается до достижения точки насыщения.

Раствор лактозы можно сделать пересыщенным следующими способами:

- Увеличить концентрацию лактозы в воде. Это делается выпариванием.
- Охладить раствор, что приведет к уменьшению растворимости лактозы.

Поэтому для интенсивной кристаллизации сыворотку концентрируют до максимально возможного содержания сухого вещества, а затем охлаждают концентрат.

Скорость мутаротации прямо зависит от температуры. Как видно из рисунка 128, она проходит относительно быстро при высокой температуре, и очень медленно при температуре, близкой к точке замерзания. То есть, требования к условиям мутаротации и кристаллизации противоречат друг другу.

Это значит, что слишком быстрое охлаждение концентрата до слишком низкой температуры снижает долю кристаллической лактозы, хотя сама кристаллизация протекает быстро. Причина заключается в медленной мутаротации, из-за которой только небольшая часть  $\beta$ -лактозы превращается в  $\alpha$ -лактозу.

Таким образом, для оптимальной кристаллизации требуется некоторая компромиссная температура.

Реально достижимая концентрация сухого вещества зависит от типа сыворотки, степени денатурации сывороточных белков, pH сыворотки и характеристик выпарного аппарата.

Хотя процесс кристаллизации изучен не до конца, хорошо известно, что кристаллизация идет на поверхности уже существующих кристаллов. Для ускорения кристаллизации в пересыщенный раствор вводят кристаллы лактозы или хорошо кристаллизованную сухую сыворотку. Поскольку площадь затравки – важный фактор, в концентрат требуется добавить достаточное количество мелких кристаллов. Если используются кристаллы лактозы ( $\alpha$ -лактоза моногидрат), их нужно добавить в концентрат приблизительно в количестве 0,1 % массовых.

Охлаждение концентрата до 30 °C производится в подключенном к выпарному аппарату мгновенного охлаждения (см. стр. Ошибка! Закладка не определена.), затем концентрат медленно (со скоростью 1-3 °C/час) охлаждается приблизительно до 15 °C в специальных кристаллизаторах, см. рис. 130. Благодаря этому мутаротация протекает с разумной скоростью, что позволяет кристаллизовать примерно 80 % лактозы. В течение всего времени кристаллизации важно интенсивно и непрерывно перемешивать содержимое кристаллизаторов. Это требуется для доставки пересыщенного раствора к поверхности кристаллов с одновременным вытеснением насыщенного раствора. Перемешивание также предотвращает чрезмерное повышение вязкости тиксотропной взвеси и осаждение кристаллов лактозы.

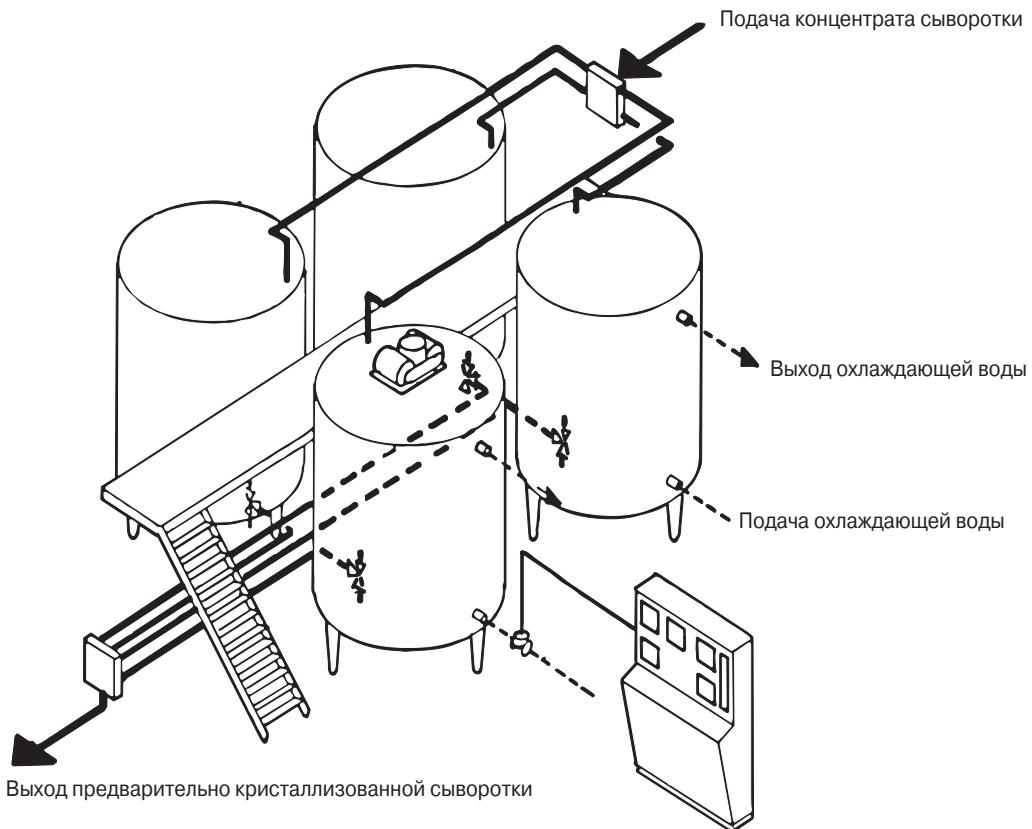


Рис. 130 Кристаллизаторы сыворотки.

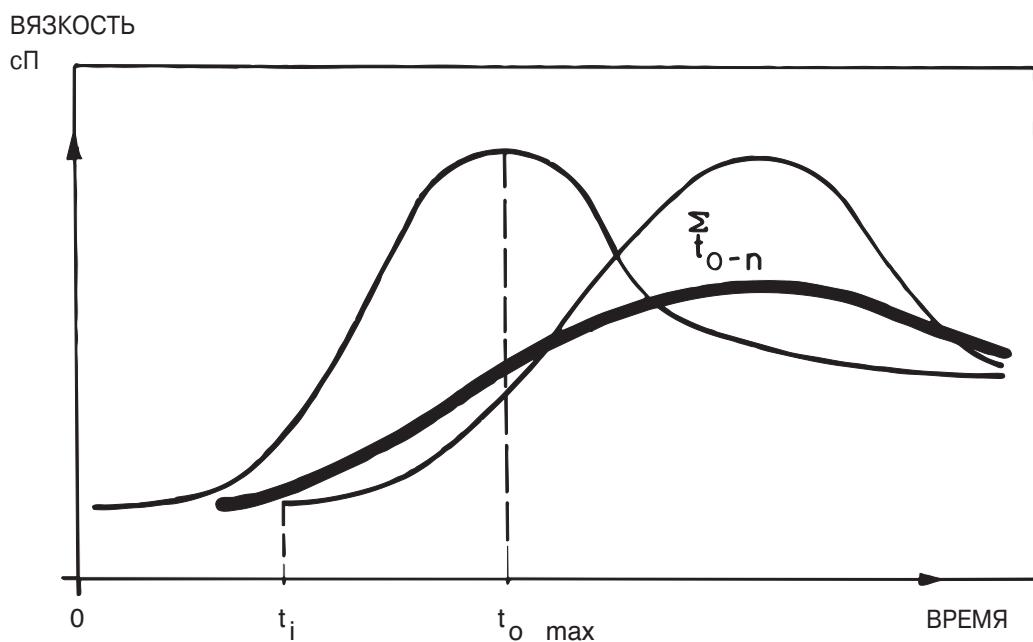


Рис. 131 Изменение вязкости в процессе кристаллизации концентрата сыворотки.

На вязкость кристаллизованного концентрата сыворотки влияет, в основном:

- тепловая обработка перед выпариванием
- содержание сухих веществ в концентрате
- размер кристаллов лактозы

### ***Тепловая обработка перед выпариванием***

Степень денатурации сывороточных белков сильно влияет на вязкость концентрата, а также на скорость кристаллизации, свойства, проявляющиеся при сушке, и свойства готового порошка. Свойства белков различны для разных типов сыворотки, соответственно, эти типы требуют разной тепловой обработки.

Общим правилом является обработка в температурном диапазоне близи 80 °С. Более высокая температура обычно приводит к высокой вязкости и проблемам с перекачкой кристаллизованного концентрата. Температура ниже 80 °С снижает вязкость, но это может создать проблемы с отложениями в сушильной камере, так как увеличение термопластичности требует более высокой температуры частиц и воздуха на выходе камеры, что снижает качество продукта.

Считается, что тепловую обработку нужно проводить при такой температуре, чтобы вязкость была около 2000 сП.

### ***Содержание сухих веществ в концентрате***

Само собой разумеется, что чем выше содержание сухих веществ, тем больше вязкость концентрата, но нужно помнить, что в процессе кристаллизации вязкость претерпевает глубокие изменения, отчасти из-за снижения температуры, отчасти из-за самой кристаллизации.

### ***Размер кристаллов лактозы***

Типичное изменение вязкости в процессе кристаллизации представлено на рисунке 131. Через короткое время (1/2-1 час), в момент  $t_0$  max, вязкость концентрата достигает максимума в несколько тысяч сПз. Причина состоит в том, что размер кристаллов очень мал (и они имеют большую удельную поверхность), а маточный раствор все еще содержит много сухих веществ, т.е. трение между кристаллами и маточным раствором велико. Со временем кристаллы лактозы растут, а содержание сухих веществ, в маточном растворе становится меньше, и вязкость снижается.

Вязкость в момент  $t_0$  max. может оказаться настолько высокой, что перемешивание станет невозможным. Однако в момент  $t_i$  в кристаллизатор закачивается некристаллизованный концентрат с низкой вязкостью, так что содержимое кристаллизатора “разбавляется” до требуемой вязкости.

Поэтому кривая  $\Sigma t_{o-n}$  имеет необычную форму, и при нормальных условиях вязкость не представляет проблемы при условии, что тепловая обработка контролируется. Желательный размер кристаллов в концентрате – 20-30 мкм, самые крупные кристаллы не должны превышать 50 мкм. Это обеспечит присутствие в каждой распыленной частице хотя бы одного кристалла лактозы, что необходимо для дальнейшей кристаллизации в процессе сушки. Такая кристаллизация вызвана тем, что из-за испарения маточный раствор опять становится пересыщенным.

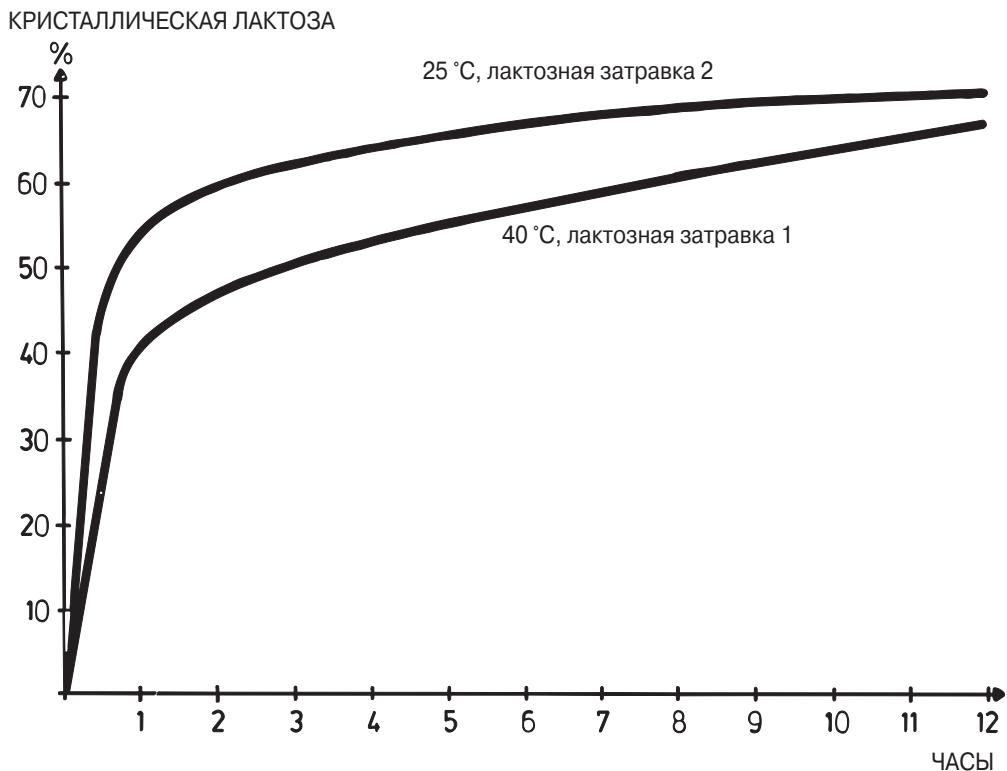


Рис. 132 Кристаллизация лактозы как функция времени.

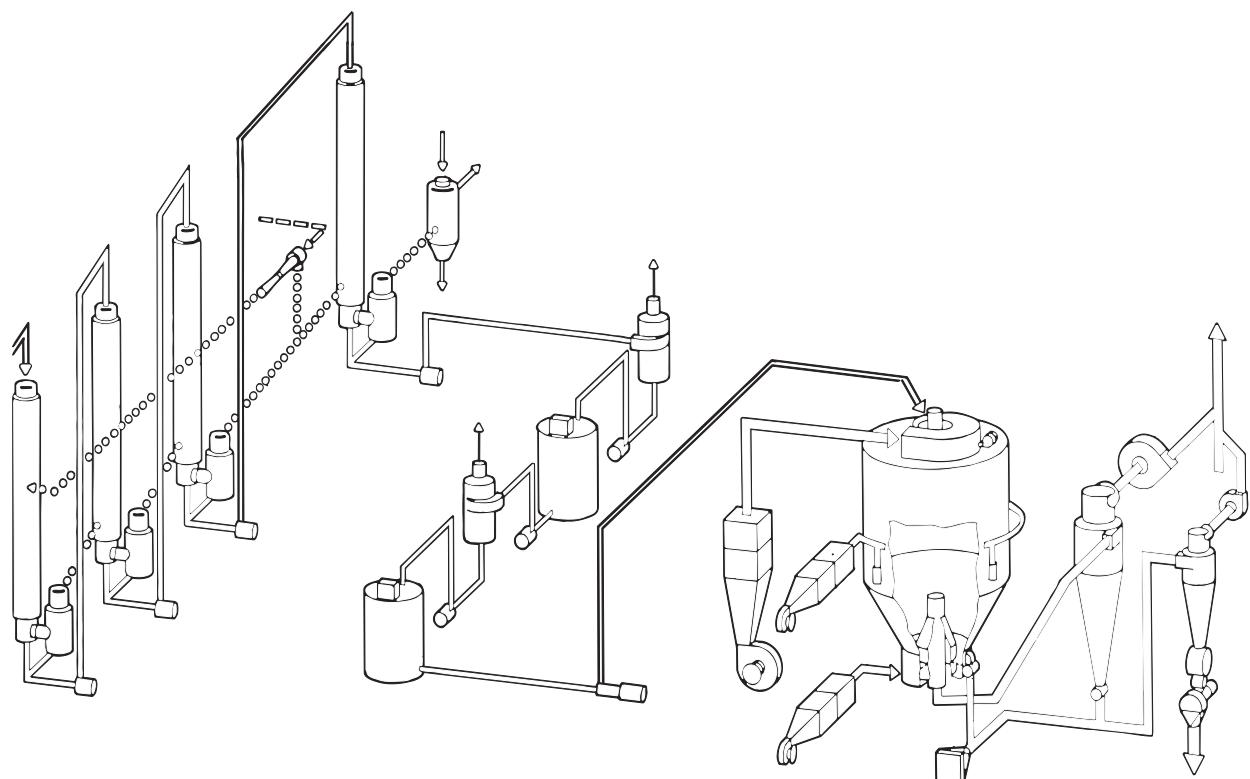


Рис. 133 Установка в составе выпарного аппарата, двух мгновенных охладителей с кристаллизаторами и компактной сушилки для непрерывного производства частично кристаллизованной сухой сыворотки.

При нормальных условиях можно достичь 80-90 % кристаллизации лактозы. Процент кристаллизации определяется очень легко посредством обычного ручного рефрактометра, на шкале которого отображается показатель преломления или непосредственно % сахара в растворе.

Показатель преломления или % сахара в растворе измеряют каждые 15-30 минут на выходе выпарного аппарата и рассчитывают среднее значение,  $S_1$ . Показания рефрактометра для средней пробы кристаллизованного концентрата сыворотки дают величину  $S_2$ . Степень кристаллизации можно с хорошим приближением рассчитать по формуле:

$$\% \text{ Crystallization} = \frac{(S_1 - S_2) \times 9500 \times 100}{L \times TS \times (95 - S_2)} \quad (27)$$

где:

- $S_1$  = % сахара (показатель преломления) для концентрата на выходе выпарного аппарата;
- $S_2$  = % сахара (показатель преломления) для кристаллизованного концентрата;
- $L$  = % лактозы (можно принять равным 74 %)
- $TS$  = общее содержание сухих веществ, %

## Частичная кристаллизация концентрата сыворотки

Как видно из графика на рис. 132, большая часть лактозы кристаллизуется через 3-4 часа. Это стало основой для разработки непрерывного процесса частичной кристаллизации. Получающийся сухой продукт обладает хорошими физическими свойствами.

Сыворотка струится до 50-52 % с.в., после чего мгновенно охлаждается до 30 °C. Этот концентрат перекачивается в обычный, не имеющий рубашки резервуар, оборудованный мешалкой. Вместимость резервуара соответствует 2-3 часам производства продукта. В концентрат вносится затравка для инициирования кристаллизации.

Когда резервуар заполнен, продукт выгружается из него с той же скоростью, с которой подается свежий раствор. Частично кристаллизованный концентрат перекачивается в мгновенный охладитель № 2, где остывает до 15 °C, а затем подается в следующий резервуар, вместимость которого соответствует 2-3 часам производства, где происходит окончательная кристаллизация. В связи с тепловыделением при кристаллизации температура возрастает на 2-3 °C. По заполнении резервуара начинается процесс распылительной сушки. См. рис. 133.

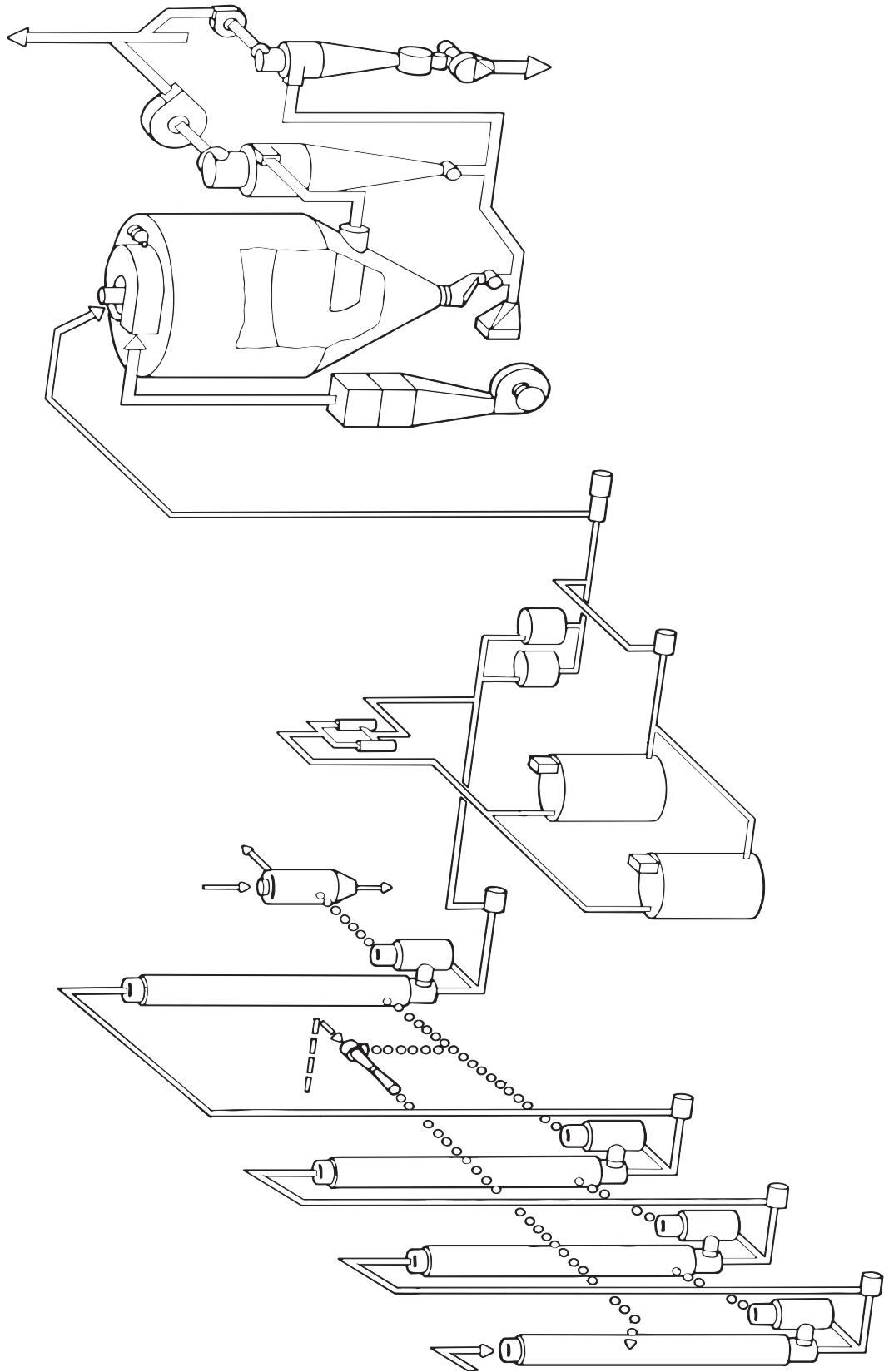


Рис. 134 Выпарной аппарат, кристаллизаторы и распылительная сушилка с пневмотранспортной системой.

## Распылительная сушка концентрата сыворотки

Распылительная сушка может осуществляться по трем разным технологиям, в зависимости от требований к конечному продукту:

- распылительная сушка в установке с пневмотранспортом
- распылительная сушка в установке с псевдоожженным слоем
- распылительная сушка в установке со встроенным транспортером

### *Распылительная сушка в установке с пневмотранспортом*

Концентрат сыворотки подается в распылитель – роторный или форсуночный. Как уже описывалось, сушка производится горячим воздухом, который подается в сушильную камеру через воздухораспределитель. Воздух с испарившейся из концентрата водой проходит через циклоны, где отделяются унесенные частицы порошка.

Основная часть порошка выгружается через коническое дно камеры. Этот порошок попадает в систему пневмотранспорта и охлаждения, которая собирает также фракцию порошка из циклонов.

Затем весь порошок отделяется в циклоне, просеивается и пакуется в мешки.

Этот тип установки показан на рисунке 134 и включает выпарной аппарат с падающей пленкой и распылительную сушилку с пневмотранспортной системой. Порошок из такой установки имеет следующие особенности:

- порошок составляют отдельные частицы
- тенденция к пылению
- высокая насыпная плотность
- высокая гигроскопичность и тенденция к слеживанию

Этот тип порошка предназначен, в основном, для приготовления кормов. Гигроскопичность обусловлена тем, что лактоза в аморфном состоянии – это впитывающее воду липкое вещество. В связи с этим температура и влажность на выходе сушилки должны быть низкими. Это, в свою очередь, предполагает низкое содержание сухих веществ,. Такой процесс обычно протекает при следующих условиях:

- пастеризация при 80 °C
- выпаривание до 42 % с.в.
- сушка при температуре 180 °C

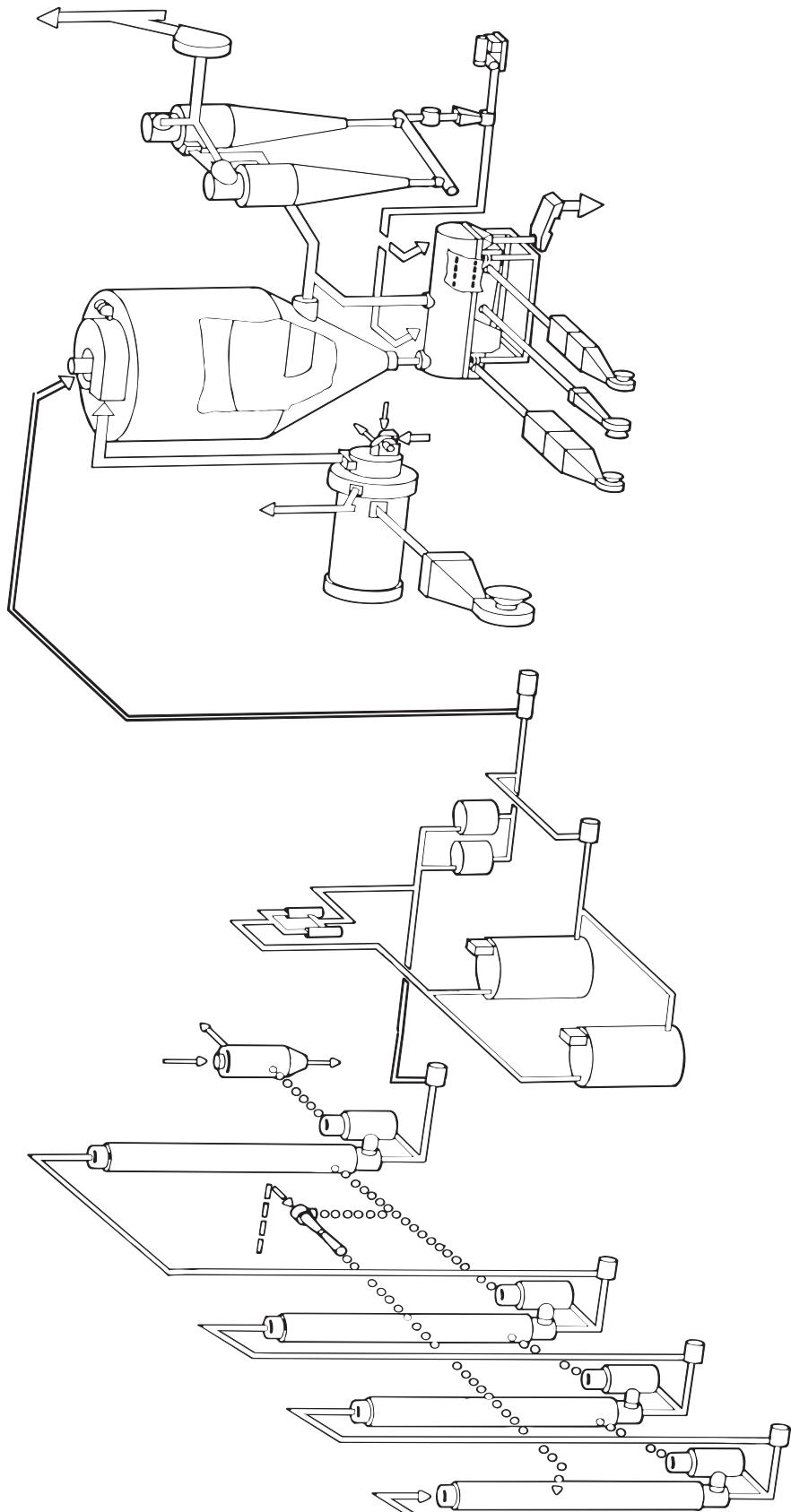


Рис. 135 Выпарной аппарат, кристаллизаторы и распылительная сушилка с аппаратом Vibro-Fluidizer.

Распылительная сушка предварительно кристаллизованного концентрата сыворотки – гораздо более экономичный процесс, так как позволяет увеличить температуру сушки и содержание сухих веществ, в концентрате. Это снижает общую стоимость сушки. Поскольку лактоза в основном кристаллизована и потому впитывает очень мало воды, качество порошка гораздо выше из-за меньшего комкования.

Типичные условия такого процесса:

- пастеризация при 80 °C
- выпаривание до 50-55 % СВ.
- кристаллизация
- сушка при температуре 180-200 °C

#### ***Распылительная сушка в установке с псевдоожиженным слоем***

Применение встроенного псевдоожиженного слоя и (или) аппарата Vibro-Fluidizer для повторной сушки и охлаждения делает сушку значительно более экономичной. Принцип работы установки состоит в том, что распылительная сушка является только первой ступенью сушки, на которой производится порошок с содержанием влаги 5-6 %.

Избыток влаги удаляется в аппарате Vibro-Fluidizer потоком горячего воздуха, и порошок высушивается до влажности готового продукта. В следующей секции аппарата Vibro-Fluidizer порошок охлаждается до требуемой температуры. Воздух из секций повторной сушки и охлаждения проходит через циклон, где отделяется унесенный порошок. Этот порошок вместе с фракцией из главного циклона возвращается в распылитель и способствует агломерации. Агломерация делает продукт сыпучим и снижает его относительную поверхность, что еще больше ограничивает абсорбцию воды, так что сухой продукт практически не образует комков.

На рисунке 135 представлена технологическая схема производства некомкующейся сухой сыворотки. Установка включает выпарной аппарат, кристаллизаторы и распылительную сушилку со встроенным газовым псевдоожиженным слоем и с аппаратами Vibro-Fluidizer. Типичные условия данного процесса сушки:

- пастеризация при 80 °C
- выпаривание до 50-60% СВ.
- кристаллизация
- сушка при температуре 185 °C

#### ***Распылительная сушка в установке со встроенным транспортером***

Процесс сушки на транспортере особенно эффективен для производства продуктов с очень низкой слеживаемостью и гигроскопичностью (см. также раздел “Сушка пермеата”, стр. 39) или при сушке молочнокислой сыворотки, очень термопластичной из-за высокого содержания молочной кислоты, которая остается жидкой даже при невысокой температуре. Сухая молочнокислая сыворотка проявляет при распылительной сушке чрезвычайную липкость. Поэтому во избежание отложений в камере необходима низкая температура сушки (и низкая температура частиц). Типичные условия данного процесса сушки:

- пастеризация при 80 °C
- выпаривание до 50% СВ.
- кристаллизация
- сушка при температуре 150 °C
- содержание влаги на выходе из камеры 12-15 %

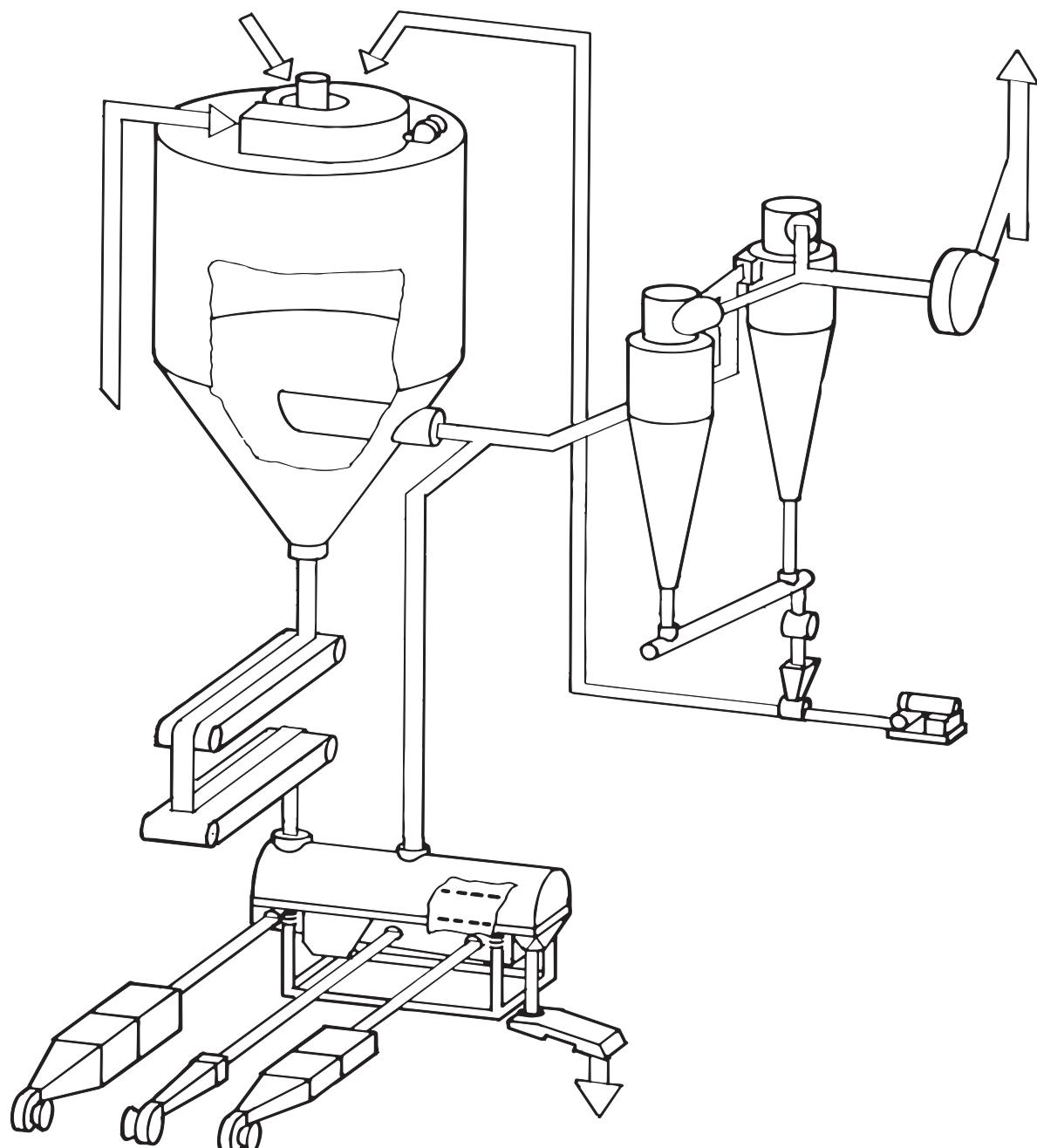


Рис. 136 Распылительная сушилка с транспортером для вторичной кристаллизации.

Во избежание конденсации в циклонах в связи с низкой (приблизительно 55 °C) температурой на выходе, в циклоны можно подавать горячий воздух для снижения относительной влажности.

Рукавные фильтры – стандартные или моющиеся на месте – не рекомендуются из-за высокой влажности порошка и отработанного воздуха. Поэтому такие установки оснащаются скрубберами.

Высокое содержание влаги в порошке означает, что кристаллизация идет в нем еще сильнее, чем в случае установки с псевдоожженным слоем, см. стр. 32. Эта кристаллизация протекает лучше, если влажный порошок сохраняет высокое содержание влаги в течение 5-10 минут. Это достигается помещением ленточного конвейера или врачающегося диска между выходом камеры и аппаратом Vibro-Fluidizer, где производится окончательная сушка, см. стр 136. Образующийся порошок состоит из крупных агломератов с низкой насыпной плотностью и исключительно хорошими свойствами в отношении слеживаемости и растворения в воде. Насыпную плотность продукта можно повысить обработкой на молотковой дробилке.

### ***Распылительная сушка концентрата сыворотки высокой концентрации***

В попытке повысить экономичность сушки содержание сухих веществ в концентрате было в порядке эксперимента увеличено до 70-75 % СВ. Чтобы избежать кристаллизации в последнем корпусе, где раствор лактозы становится пересыщенным, выпарной аппарат был оборудован специально сконструированным концентратором, работающим с рециркуляцией и при повышенной температурой кипения. Кроме того, более высокая температура необходима для снижения вязкости концентрата и предотвращения закупорки труб.

Когда концентрат достигал требуемого содержания сухого вещества, его мгновенно охлаждали, что вызывало одновременную кристаллизацию. Обычные кристаллизаторы для этого не требуются, только буферный танк с мешалкой. Однако длительная рециркуляция в выпарном аппарате при высокой температуре имеет свою цену. Сывороточные белки денатурируют, и питательная ценность продукта снижается. Кроме того, происходит реакция Мейларда, вызывая выраженное обесцвечивание и неприятный вкус готового продукта. Поэтому, несмотря на экономичность процесса, его конечный результат – готовый продукт, не отвечает международным стандартам.

## **Производство сухой кислой сыворотки**

Не вся сыворотка вырабатывается традиционными методами сыроварения, дающими сладкую сыворотку с pH не менее 6,3. Домашние сыры, кисломолочный сыр, Fromage Frais, Queso Fresco, Mozzarella и аналогичные продукты производят створаживанием молока, при котором образуется сыворотка с pH 4,6.

Молочная кислота очень термопластична и гигроскопична, поэтому очень трудно сушится. Сушка может потребовать нейтрализации (до pH 5,2 –5,5), и для этой цели пригодны следующие средства:

- $Mg(OH)_2$  дает Mg-лактат, который представляет собой “сухую” соль и предпочтительнее с точки зрения конечных потребителей, так как его потребление животными, как правило, телятами, не делает мясо темным;
- $Ca(OH)_2$  также можно применять, но поскольку в кислой сыворотке исходно высокое содержание  $Ca^{++}$ , у животных могут возникнуть проблемы с пищеварением;
- иногда используют  $NaOH$ , но это нежелательно, так как  $Na$ -лактат гигроскопичен и термопластичен. Кроме того, у животных, потребляющих его с кормом, меняется цвет мяса.

Кислая сыворотка, образующаяся при сквашивании минеральными кислотами, такими как  $HCl$  или  $H_2SO_4$ , не требует нейтрализации, однако необходимы специальные меры для предотвращения коррозии нержавеющей стали, из которой изготовлены выпарной аппарат и распылительная сушилка, особенно в связи с ионами  $Cl^-$ .

Вообще говоря, кислая сыворотка труднее для сушки, чем сладкая, и при сушке рекомендуется добавить 0,1-0,3 % средства для повышения сыпучести, такого как Tixosil.

## Сыворотка с добавкой жира

В некоторых случаях в концентрат сыворотки перед сушкой добавляют жир. Нормальный диапазон – от 26 до 50 % по сухому веществу. Такой продукт используется непосредственно или после сухого смешивания для производства различных заменителей молока для телят. В этих целях обычно применяют дешевые сорта жира, такие как лярд или твердый животный жир. При наличии полиненасыщенных жирных кислот в продукт нужно ввести антиоксидант во избежание возгорания в сушилке.

Отложений на стенках можно в значительной степени избежать, тангенциально подавая в цилиндрическую часть сушильной камеры теплый воздух с температурой 60 °C. Его требуется 5-10 % от расхода сушильного воздуха.

Наибольшее распространение нашла сыворотка с добавкой 40 % жира. Для ее производства лучше всего подходит сушилка Compact, обсуждавшаяся на стр. 74 и далее, с соблюдением следующей технологии:

1. Сырьем должна быть сладкая сыворотка хорошего качества с нормальным содержанием сывороточных белков (т.е. казеиновую сыворотку применять не рекомендуется), так как низкий уровень сывороточных белков ведет к высокому содержанию свободных жиров и нестабильности жировой эмульсии.

Показатель pH исходной сыворотки должен быть не ниже 6,3-6,4. Сыворотку можно нейтрализовать  $Mg(OH)_2$  для улучшения стабильности жировой эмульсии и солей, особенно цитратов, фосфатов и лактатов. Сывороточные белки не должны быть гидролизованы, предельный показатель хорошего сырья - 150  $NH_4^+ / 100$  г сухого вещества.

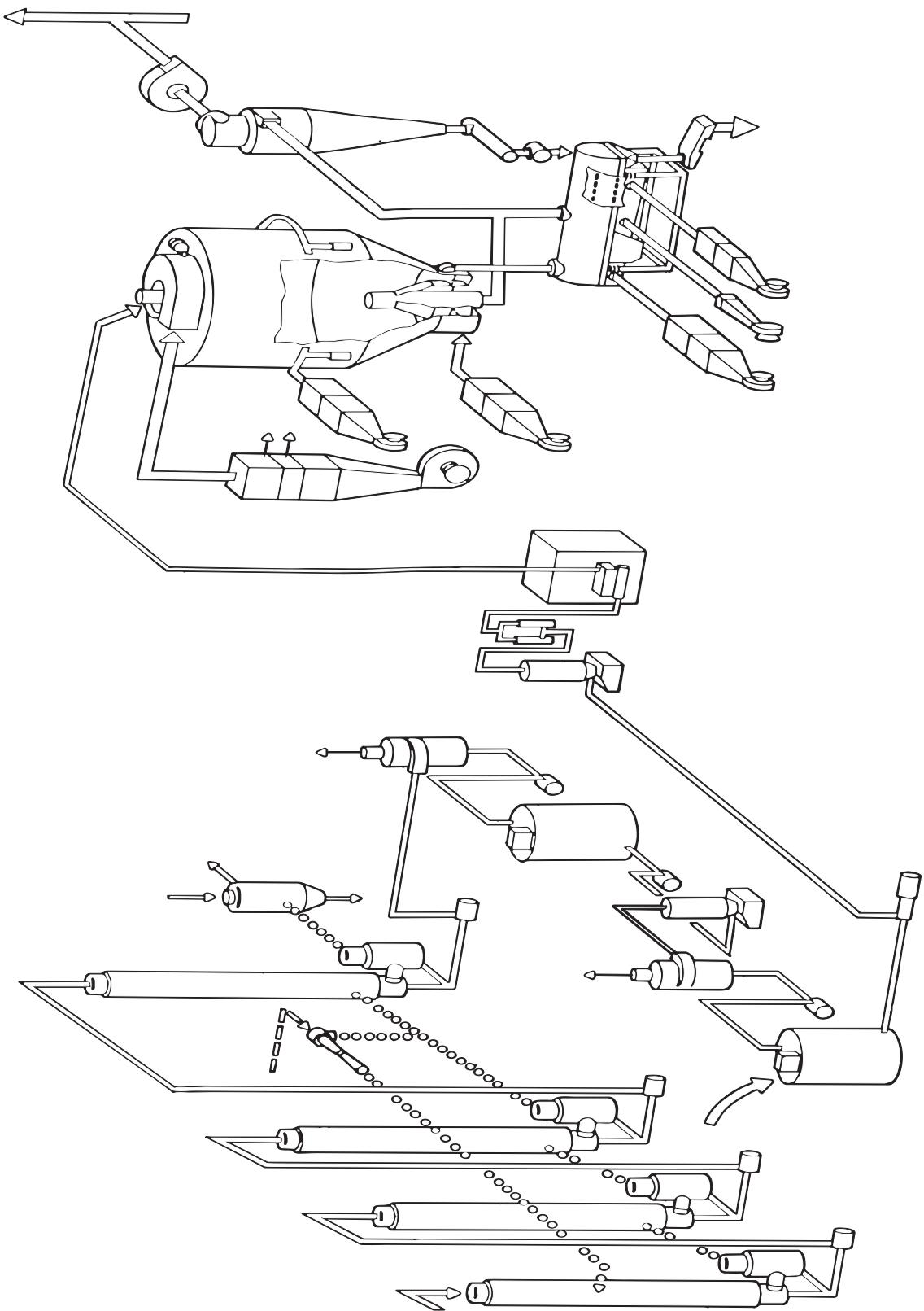


Рис. 137 Производство обогащенного жиром сухого обезжиренного молока.

Чем ниже pH в исходной сыворотке, тем больше требуется нейтрализующего вещества и тем труднее сушка. В результате получается продукт низкого качества.

2. Сразу после формования сырной массы сыворотку необходимо пастеризовать при 72 °C в течение 15 с и охладить до 4-5 °C для хранения.
3. Пастеризовать при 80 °C без выдержки и выпарить до 50 % СВ, затем мгновенно охладить до 30 °C.
4. Охладить до 25 °C за 5 часов (1 °C/час) в кристаллизаторах.
5. Добавить гексаметафосфат или полифосфат натрия для связывания ионов Ca<sup>++</sup>.
6. Смешать жир с 1-3 % эмульгатора при 60-70 °C.
7. Смешать жир вместе с эмульгатором с концентратом сыворотки.
8. Поточный нагрев до 65 °C в подогревателе концентрата. Выдержка концентрата при этой температуре должна быть минимальной, чтобы избежать плавления кристаллов лактозы.
9. Двухступенчатая гомогенизация при 80-50 бар изб.
10. Распылительная сушка, предпочтительно с применением моющихся на месте фильтров, чтобы избежать проблем с засорение циклонов.
11. При распылительной сушке добавляется средство для повышения сыпучести.
12. Охлаждение в аппарате Vibro-Fluidizer и фасовка в мешки.

См. рис. 137.

Для сыворотки с 50 % жира рекомендуется использовать многоступенчатую сушилку MSD с моющимися рукавными фильтрами (см. стр. Ошибка! Закладка не определена.), поскольку применяемое в этом аппарате распыление концентрата на псевдоожженый слой минимизирует отложение порошка в установке. С дальнейшим повышением жирности продукта его сушка в распылительных сушилках традиционной конструкции становится слишком сложной из-за обильных отложений порошка. Поэтому для такой цели применяют сушилки FILTERMAT® (FMD), см. рис. 138. В этой установке концентрат распыляется вниз на медленно движущийся транспортер, на котором накапливается слой порошка. Этот порошок непрерывно перемещается из зоны сушки в зону повторной сушки и охлаждения. Рабочий воздух (сушильный из первой и второй ступеней и охлаждающий) проходит сквозь слой порошка и транспортер (из пористого синтетического материала, разрешенного для применения в пищевой промышленности) и поступает в циклон. Унос порошка из сушильной камеры очень невелик. Поэтому циклон оборудуется ведром для ручной выгрузки мелочи.

Сухая сыворотка с добавкой жира или без него широко используется. Однако большая часть сыворотки применяется для кормления животных – либо как самостоятельный вид корма (до 50 % рациона), либо как компонент кормовой смеси.

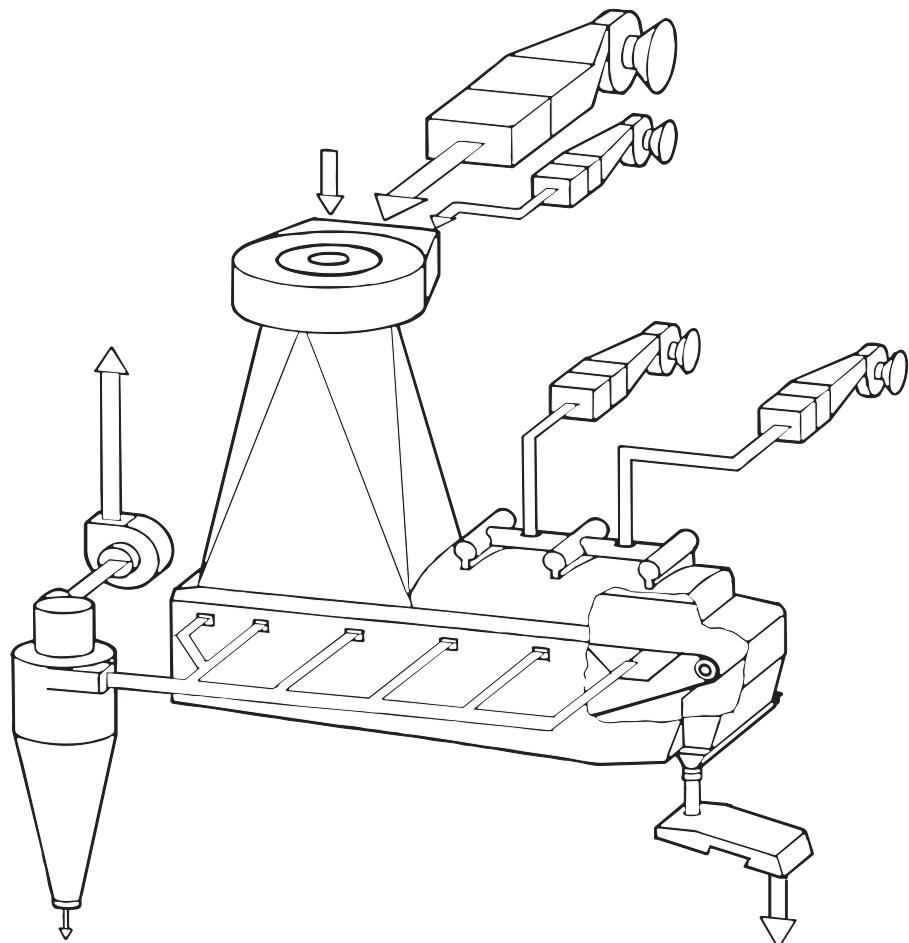


Рис. 138 Сушилка со встроенным транспортером FILTERMAT® (FMD).



## Маточный раствор

Продукт производства лактозы, остающийся после отделения кристаллов лактозы (обычно декантацией, см. стр. 43), называют маточным раствором. Он содержит 1/3 белка, 1/3 раствора и кристаллов лактозы и 1/3 солей, его трудно сушить, поскольку соли и лактоза очень гигроскопичны и ведут к отложениям в сушильной камере.

Однако для преодоления этой трудности можно использовать описанную выше технику – тангенциальную подачу в сушильную камеру теплого воздуха с температурой 60 °C. Сушки с встроенным псевдоожженным слоем также эффективны при обработке данного продукта. Перед сушкой в маточный раствор можно добавлять жиры разного типа. Охлаждение порошка производится холодным воздухом в аппарате Vibro-Fluidizer. Сухой маточный раствор применяется как компонент кормов, особенно для животных, не усваивающих лактозу, например, для птицы.

При этом необходимо помнить о высоком содержании в нем солей, что может вызвать нарушения пищеварения у некоторых животных. Другая проблема – недостаток аминокислоты метионина, содержание которой в сывороточных белках очень ограничено. Поэтому в данный продукт требуется добавлять синтетический метионин (или рыбную муку, или соевые белки).

## Сывороточные белки

Как отмечалось в предыдущей главе, сыворотка содержит 0,8 % белков, что составляет 13 % по сухому веществу. Эти белки называют сывороточными белками. Поскольку их питательная ценность считается очень высокой, а содержание сывороточных белков в женском молоке выше, чем в коровьем, предпринимались многочисленные попытки отделить эти белки от сыворотки, особенно для производства детского питания.

Наиболее удачный и распространенный способ такого отделения – это ультрафильтрация. Предполагается, что этот процесс хорошо известен читателям, поэтому мы не будем здесь его обсуждать.

Состав концентрата, полученного ультрафильтрацией (ретентата), и содержание в нем сухого вещества можно изменять в соответствии с требованиями к готовому продукту.

Промышленность производит сывороточные белки с тремя уровнями содержания белка: 35 %, 60 % и 80 %.

Из 100 кг нормальной сладкой сыворотки, содержащей 6 % СВ, модуль ультрафильтрации производит 25 кг 35 % концентрата сывороточного белка, содержащего приблизительно 10 % СВ, который упаривают перед распылительной сушкой до 45 % СВ. Можно также произвести 8 кг 60 % концентрата сывороточного белка, содержащего приблизительно 15 % СВ, который упаривают перед распылительной сушкой до 42 % СВ. Высокое содержание белка приводит к высокой вязкости, поэтому при производстве 80 % концентрата сывороточного белка на ступени заключительной фильтрации необходимо добавление воды (диафильтрация). Модуль производит 3 кг 80 % концентрата сывороточного белка с содержанием сухих веществ 28-30 %. В связи с высоким содержанием белка такой концентрат непосредственно подается в сушилку.

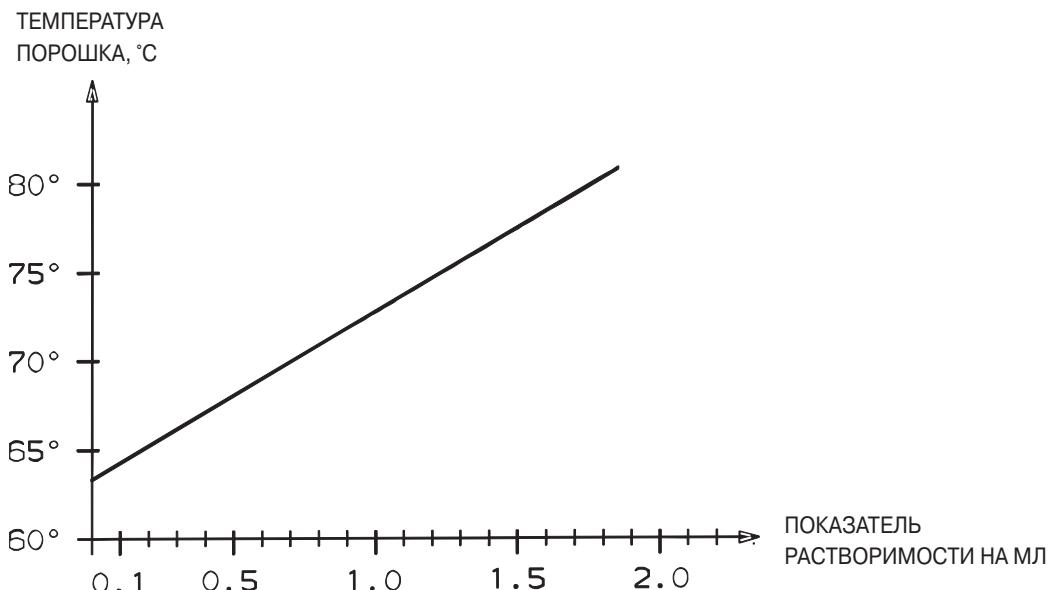


Рис. 139 Растворимость готового концентраты сывороточного белка как функция температуры воздуха на выходе из распылительной сушилки.

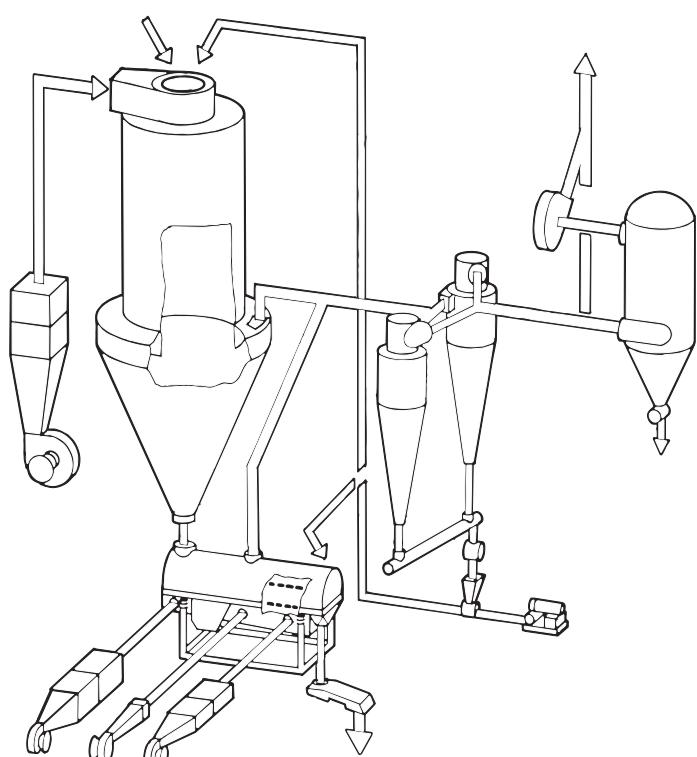


Рис. 140 Башенная сушилка для производства сывороточного белка (TFD).

Концентраты сывороточного белка можно использовать вместе с обычными молочными концентратами для приготовления детского питания, близкого по составу к материнскому молоку.

Сывороточные белки можно также применять для производства сливочного сыра и других мягких сыров или в качестве связующего материала колбасного фарша, заменяющего мясо.

Концентраты сывороточных белков легко сушатся, но для хорошей растворимости продукта важно поддерживать низкую температуру воздуха на выходе, чтобы избежать денатурации, см. рис. 139. Поэтому рекомендуется проводить сушку в две ступени.

Поскольку из-за высокой концентрации белка содержание сухих веществ в концентрате невелико, в таких распылительных сушилках после циклонов обязательно устанавливаются рукавные фильтры. Однако в связи с тем, что фракция из фильтров не всегда соответствует по качеству основному продукту, для такого производства часто применяют башенную сушилку, поскольку специальное устройство выхода воздуха минимизирует долю фракции циклона и, соответственно, фракции фильтра. См. стр. Ошибка! Закладка не определена. и рис. 140.

В настоящее время существует тенденция производить агломерированные сывороточные белки. Из-за отсутствия лактозы как связующего концентраты, особенно 80 %, трудно агломерировать. Однако применяя многоступенчатую сушилку MSD, см. стр. Ошибка! Закладка не определена., рис. 85, можно добиться достаточной агломерации. Поскольку белки очень гидрофильны, они мгновенно впитывают воду при первом же контакте, что затрудняет диспергирование. Агломерация с лецитинизацией достаточно замедляет абсорбцию воды, чтобы порошок мог диспергироваться и растворяться.

Сухой белок применяется так же, как концентраты, но обладает важнейшим преимуществом – практически не ограниченным сроком хранения.

## Пермеат

Другой продукт ультрафильтрации – это пермеат, который содержит около 4,5 % лактозы. Пермеат можно либо использовать для ферментативного производства глюкозы-гальктозы или молочной мочевины, либо концентрировать, кристаллизовать и высушить.

Концентрирование можно осуществлять либо посредством гиперфильтрации и последующего выпаривания, либо одного выпаривания до 60 % с.в. Особое внимание необходимо уделить комплексу  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , поскольку хорошо известно, что он осаждается при высоких температурах, особенно в случае высоких концентраций и соответствующих значениях pH.

Если  $\text{Ca}^{++}$  не инактивировать, он будет осаждаться на теплообменных поверхностях выпарного аппарата, особенно первого корпуса. Поэтому выпарной аппарат требуется промывать кислотой каждые 6-8 часов.

В промышленности Ca-фосфат осаждают из сыворотки или пермеата, поднимая pH до 7,2 добавкой щелочи ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$  или  $\text{NaOH}$ , см. также стр 36), после чего продукт нагревают приблизительно до 80 °C. Осадок Ca-фосфата удаляют центрифугированием или мембранный фильтрацией. Затем его сушат и продают как “молочный кальций”.

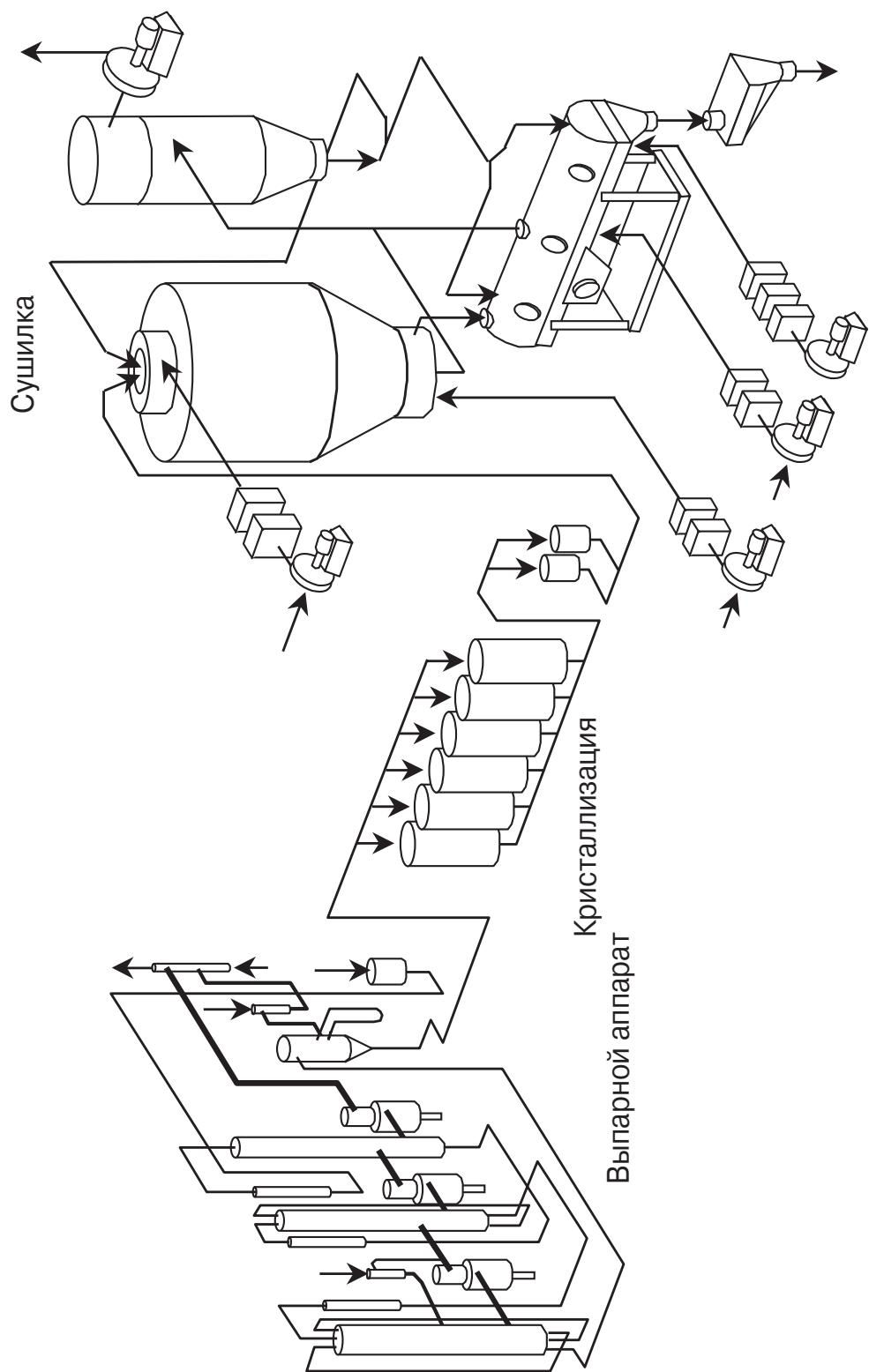


Рис. 140а Компактная сушилка для пермеата – сухой процесс

После декальцинирования продукт можно выпаривать и сушить, но рекомендуется предварительно нейтрализовать его добавлением лимонной или уксусной кислоты, иначе возникнут проблемы с отложениями в сушильной камере.

Из-за гигроскопичности порошка этот концентрат невозможно сушить без обработки – необходима предварительная кристаллизация. Она осуществляется так же, как кристаллизация концентрата сыворотки, сушка тоже производится аналогично сушке сыворотки. Однако следует упомянуть о трех различных технологиях распылительной сушки:

1. сухой процесс
2. влажный процесс
3. процесс TIXOTHERM™

### ***Сухой процесс***

При так называемом “сухом процессе” предварительно кристаллизованный концентрат пермеата сушится в сушилке Compact (см. рис. 140а). Роторное распыление предпочтительнее, так как диск способен распылять продукты, содержащие кристаллы. Кроме того, роторное распыление идеально для концентратов с высокой вязкостью.

Однако содержание влаги в псевдоожиженном слое слишком мало ( $\approx 5\%$  свободной влаги) для дальнейшей кристаллизации лактозы. Здесь просто отсутствует свободная вода, необходимая для образования кристаллов лактозы. Увеличение содержания влаги в псевдоожиженном слое порошка, требующееся для продолжения кристаллизации (которая стала возможной из-за пересыщения лактозы в результате сушки), помешает оживлению слоя, и любая попытка повысить влажность приведет к испарению воды, так что повторная кристаллизация не произойдет.

Однако получающийся порошок имеет нормальную гигроскопичность и склонность к склеиванию, так что такая экономия на сушке приемлема. Как всегда, особого внимания требует выгрузка порошка. После циклонов можно установить скруббера с водой в качестве абсорбента или обычные рукавные фильтры. Поскольку влажность отработанного воздуха сравнительно мала, его можно пропускать и через моющиеся рукавные фильтры (см. стр. Ошибка! Закладка не определена.). В результате весь собранный порошок будет первосортным продуктом, и выброс порошка с воздухом будет исключен.

### ***Влажный процесс***

Сухой пермеат используют во всем мире, в том числе и в странах с влажным климатом, и если лактоза не полностью кристаллизована, порошок впитывает влагу из воздуха. Как отмечалось в описании “сухого процесса”, лактоза не может быть кристаллизована на 100 % из-за отсутствия свободной воды. Поэтому после вскрытия мешка оставшаяся аморфная лактоза будет абсорбировать влагу из воздуха, если он достаточно влажный. Порошок склеивается, и комки делают продукт малопривлекательным для конечного потребителя.

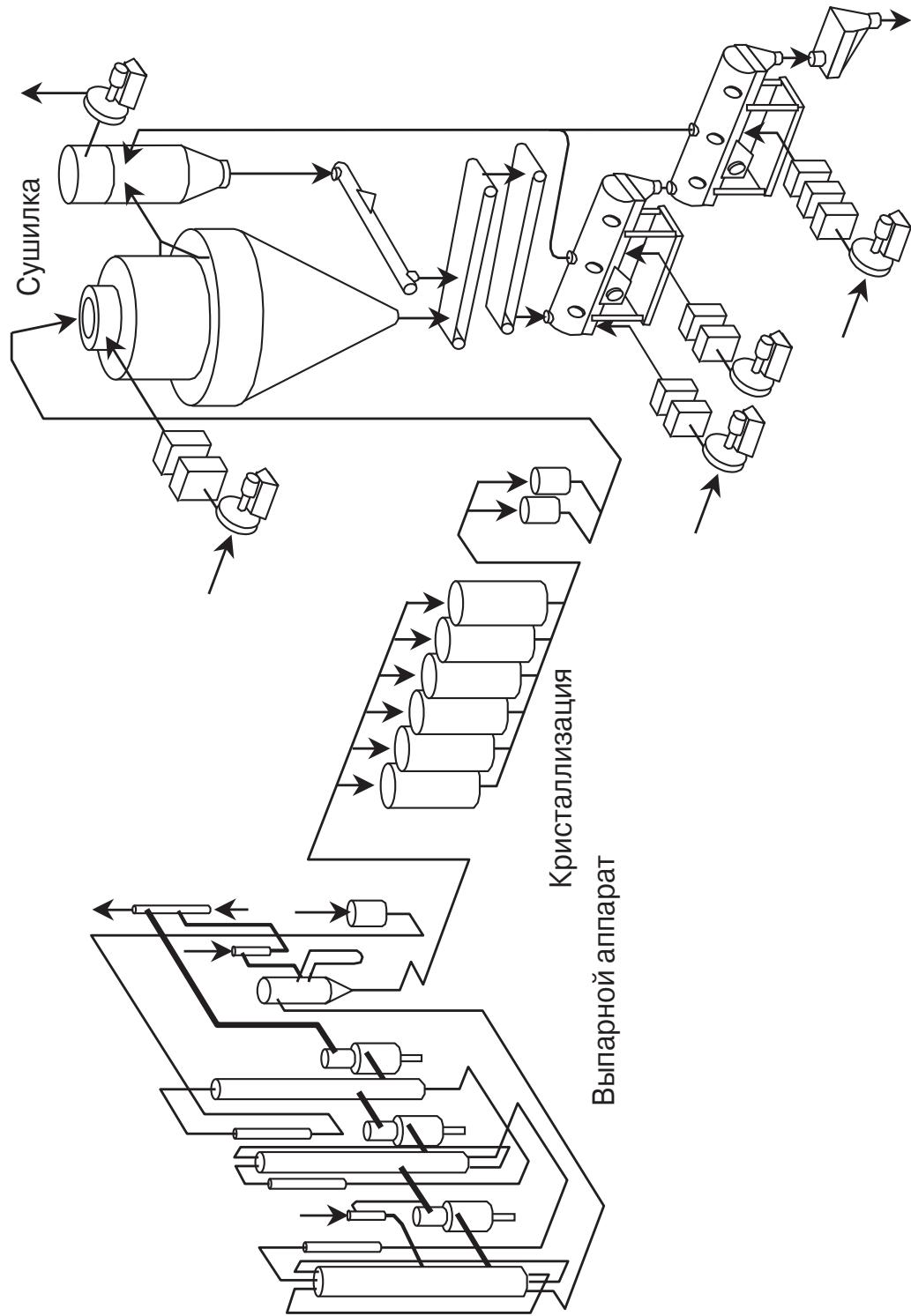


Рис. 140б Башенная сушилка для пермеата - влажный процесс.

Поэтому для сушки пермеата часто применяют процесс сушки на транспортере – “влажный процесс”, см. стр. 33. Пермеат сгущается в многоступенчатом выпарном аппарате, желательно с предварительным осаждением и отделением фосфата кальция, чтобы выпаривание могла продолжаться 20 часов без промежуточной чистки (см. стр. 24). Как правило, раствор сгущают до 60-65 % СВ., мгновенно охлаждают до 30 °C, затем в течение 16-24 часов охлаждают и кристаллизуют в кристаллизаторах и подают в распылительную сушилку.

Сушку обычно проводят в башенной распылительной сушилке с температурой на входе 150-160 °C (в зависимости от внешних условий) и температурой на выходе ≈55 °C, близкой к точке росы (т.е. при высокой влажности воздуха на выходе). Низкая температура воздуха на выходе приводит к тому, что из сушильной камеры выгружается продукт с содержанием влаги 8-10 %. Этот влажный и относительно холодный порошок попадает на медленно движущийся транспортер, на котором остается 8-10 минут.

При сушке концентрация лактозы возрастает, и раствор опять становится пересыщенным, однако лактоза не кристаллизуется. Для этого просто не хватает времени в процессе сушки, но, когда влажный и относительно холодный воздух попадает на транспортер, пересыщенный раствор лактозы начинает кристаллизоваться, поскольку для этого достаточно и свободной воды, и времени.

По окончании кристаллизации порошок сгружается с транспортера в Vibro-Fluidizer для окончательной сушки и охлаждения.

Поскольку отработанный воздух из сушильной камеры с температурой ≈55 °C содержит много паров H<sub>2</sub>O на кг сухого воздуха, его нельзя пропускать через моющиеся рукавные фильтры. Порошок просто налипнет на рукава и сделает их непроницаемыми, перепад давления на рукавах будет быстро возрастать, и фильтр придется часто чистить.

Поэтому отработанный воздух пропускают через циклоны и скруббера. Однако выгрузка порошка из циклона все равно требует особого внимания, так как липкая влажная мелочь не позволяет применять обычные секторные затворы. Поэтому в основании циклонов устанавливают трубки Вентури для нагнетательного пневмотранспорта порошка. С другой стороны, отработанный воздух из аппарата Vibro-Fluidizer достаточно сухой, чтобы пропускать его через моющийся рукавный фильтр. Можно задать вопрос, почему бы не смешать его с отработанным воздухом из сушильной камеры, чтобы “разбавить” влажный воздух, но воздух из аппарата Vibro-Fluidizer холоднее, чем из сушильной камеры, и охлаждение влажного воздуха приведет к конденсации.

Хотя выше отмечалось, что содержащие кристаллы сырье лучше распылять диском, но для “влажного процесса” используют башенную сушилку с форсуночным распылением, см. рис. 140б, так как влажный порошок пермеата налипает на любые предметы, и в традиционной сушильной камере, где канал вытяжного воздуха выступает внутрь камеры, этот порошок образует обильные отложения на стенках. Поэтому для данного процесса выбирают башенную сушилку с ламинарным нисходящим потоком воздуха, несмотря на износ форсунок.

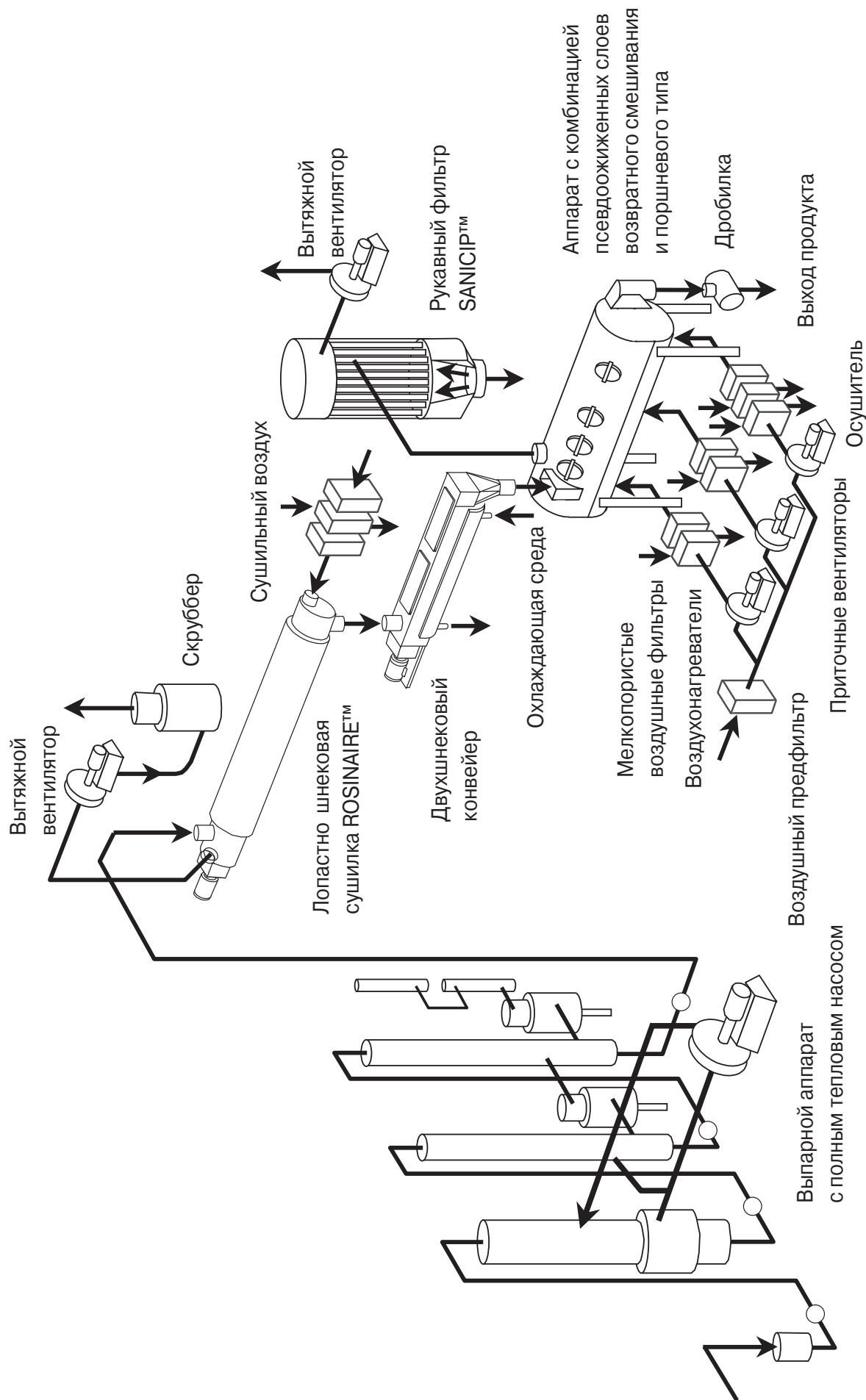


Рис. 140с Процесс TIXOTHERM™.

### **Процесс TIXOTHERM™**

Поскольку стоимость сухого пермеата невелика, предпринимались многочисленные попытки разработать процесс с ограниченными требованиями в отношении капиталовложений, расхода энергии и занимаемого пространства.

Разработанный компанией Niro процесс TIXOTHERM™ (патент заявлен) обладает этими преимуществами. TIXOTHERM™ испытан только на пилотных установках, однако промышленные установки уже проектируются. См. рис. 140в.

Технология очень проста и требует следующего оборудования:

**Выпарной аппарат:** (повышает содержание сухих веществ от 6 до 60 % без мгновенного охлаждения и предварительной кристаллизации)

многокорпусной аппарат с механической компрессией или аппарат с термокомпрессией. Для 20-часовой непрерывной работы продукт требуется декальцинировать.

Лопастная сушилка/выпарной аппарат (повышение содержания сухих веществ до 85 %)

Для этого процесса выбрана лопастная сушилка ROSINAIRE™. Корпус сушилки представляет собой горизонтальную трубу с двойной рубашкой, нагреваемую паром. Центральный вал с лопатками медленно перемещает упариваемый концентрат по трубе. Для удаления вторичного пара навстречу концентратору подается воздушный поток, который затем очищается в скруббере. Этот поток и испарение воды предотвращает подъем температуры продукта, так что его обесцвечивание не происходит. Раствор лактозы становится пересыщенным и начинает кристаллизоваться.

Из-за увеличения содержания сухих веществ и кристаллизации вязкость возрастает, но благодаря тиксотропным свойствам продукта он сохраняет текучесть в результате интенсивного механического воздействия.

Выгружаемый продукт имеет ≈85 % СВ и пастообразную консистенцию.

### **Шнековый конвейер/охладитель**

на следующем этапе продукт выдерживается и кристаллизуется в двухшнековом конвейере. Конвейер имеет двойную рубашку, и продукт охлаждается циркулирующей холодной водой. Это делается по следующим причинам:

- раствор лактозы вновь становится пересыщенным, и время выдержки достаточно велико для практически 100 % кристаллизации;
- предотвращается потемнение продукта;
- вязкость увеличивается, что способствует дезинтеграции продукта в псевдоожженном слое.

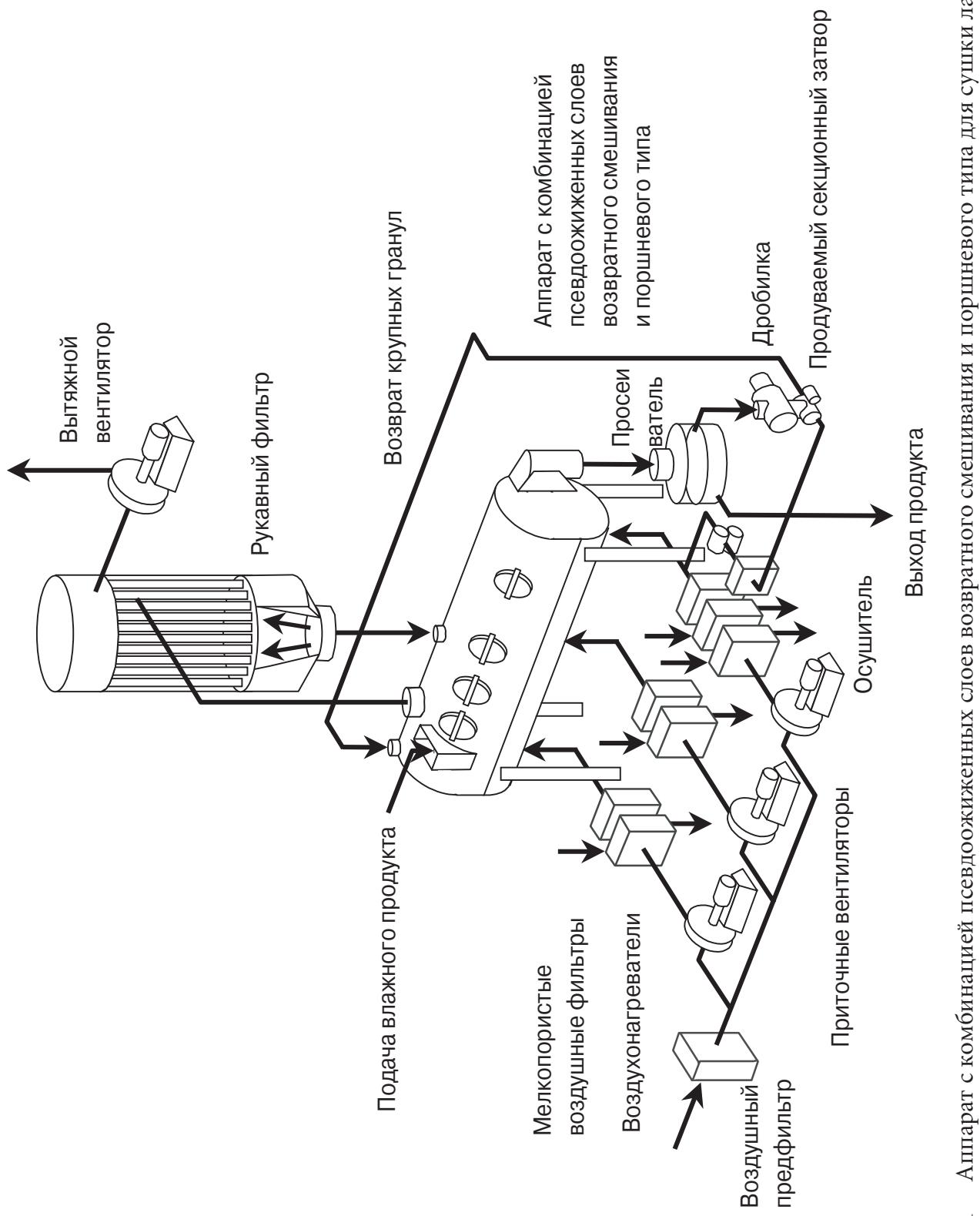


Рис. 141 Аппарат с комбинацией псевдоожженных слоев возвратного смешивания и поршневого типа для сушки лактозы

### Сушилка с псевдоожиженным слоем:

Выгружаемый из шнекового охладителя продукт имеет консистенцию, пригодную для сушки в псевдоожиженном слое. Поэтому он подается в аппарат с псевдоожиженными слоями двух типов, возвратного смешивания и поршневого, аналогичного тому, который применяется при сушке лактозы, см. ниже.

Продукт сушки рекомендуется дробить.

Вышеописанный процесс экономит 30 % энергии и 50 % производственных помещений.

Емкости для предварительной кристаллизации не требуются, последняя ступень концентрирования осуществляется при атмосферном давлении, а распылительная сушка не применяется.

## **Лактоза**

Концентрат сыворотки или пермеата из кристаллизаторов можно также пропустить через декантер, где отделяется большая часть кристаллов лактозы. Эти кристаллы промывают для удаления остатков маточного раствора, и затем сушат в псевдоожиженном слое особой конструкции, см. рис. 141. Псевдоожиженный слой разделен на три секции. Первая секция – это статический псевдоожиженный слой возвратного смешивания, в который вращающимся диском подаются кристаллы с 8 % влаги. Во избежание образования комков эта секция оснащена вращающимися граблями. Из секции возвратного смешивания порошок попадает в секцию с псевдоожиженным слоем поршневого типа, где происходит окончательная сушка. Сушильный воздух имеет температуру около 100 °C.

Средний размер кристаллов (200-250 мкм) влияет на скорость начала псевдоожижения, следовательно, и на эффективность работы слоя, так как более мелкие кристаллы требуют меньшей скорости воздуха, иначе слишком большая доля продукта будет уноситься в рукавный фильтр. Поэтому перед сушкой продукт кристаллизуют в течение 48 часов, чтобы увеличить размеры кристаллов лактозы.

Из второй секции порошок поступает в секцию охлаждения, которая также представляет собой слой поршневого типа. Охлаждающий воздух должен быть предварительно осушен. Весь отработанный воздух проходит через рукавный фильтр, собранная здесь мелочь возвращается в секцию возвратного смешения. Произведенную таким способом лактозу называют сырой лактозой. Более рафинированная – фармацевтическая – лактоза производится перекристаллизацией – повторным растворением промытых кристаллов из декантера и кристаллизацией раствора при охлаждении, после чего кристаллы опять деконтируются и промываются перед сушкой в псевдоожиженном слое.

Сухую лактозу часто классифицируют по размерам кристаллов. Поэтому после сушки продукт дробят и просеивают.

## Деминерализованная сыворотка

При производстве сыра в молоко часто добавляют NaCl и CaCl<sub>2</sub>. Часть этих солей остается в сыворотке, что в некоторых случаях нежелательно, например, если сыворотка применяется для производства детского питания, в котором должно быть низкое содержание солей.

Для этого разработаны разные процессы:

- мембранные фильтрации
- ионный обмен
- электродиализ

### **Мембранные фильтрации**

При нанофильтрации вместе с водой удаляется ≈50 % солей (в зависимости от выбранной проницаемости мембраны).

Нанофильтрация – это вариант обратного осмоса через мембрану относительно открытой структуры, которая пропускает самые мелкие однозарядные ионы, такие как Na<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup>.

Этот процесс осуществляют при меньшем давлении (20-30 бар), чем нормальный обратный осмос, чтобы через мембрану проходило как можно больше солей и как можно меньше лактозы. Ниже приведена типичная проницаемость мембран:

		<u>Тип 1</u>	<u>Тип 2</u>
Проникновение лактозы в пермеат:	%	1	4
Проникновение NaCl в пермеат:	%	50	73

Возможность одновременного удаления однозарядных ионов и воды без потери основных органических компонентов, таких как лактоза и белки, делает нанофильтрацию важным средством совместного концентрирования и деминерализации.

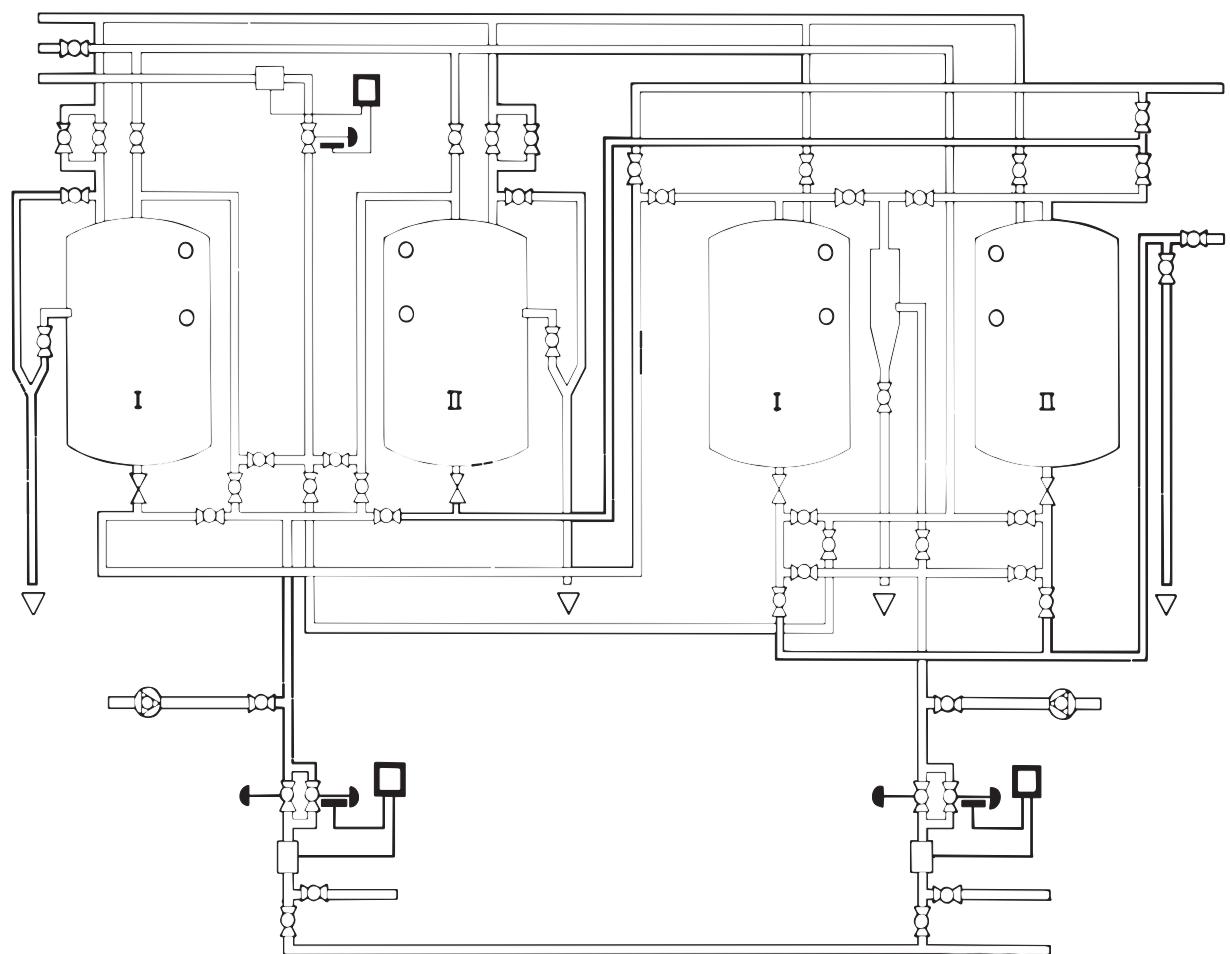


Рис. 142 Технологическая схема. Ионный обмен.

### **Ионный обмен**

Для того чтобы представить себе этот процесс, обратимся к схеме 142, где показана установка с двумя разными типами смолы. Ионообменные смолы, это шарики диаметром 0,4-0,8 мм, обычно из полистирола и дивинилбензола, с поверхностью которых структурно связаны функциональные группы, обратимо адсорбирующие ионы определенного типа. Ионы делятся на катионы ( $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$  и т.д.) и анионы ( $OH^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{--}$  и т.д.). Продходя через первый ионообменник, катионит, сыворотка освобождается от всех катионов, которые заменяются ионом  $H^+$ , тогда как содержание анионов не меняется. Затем декатированная сыворотка проходит через анионит, где все анионы заменяются на  $OH^-$ . Сыворотку пропускают через ионообменники, пока они не насыщаются катионами и анионами. Этот момент определяют с помощью кондуктометра. Затем из ионообменников сливают сыворотку, промывают их водой и регенерируют растворами кислот и щелочей. Эти растворы должны быть достаточно концентрированными, чтобы удалить адсорбированные катионы и анионы и заменить их ионами  $H^+$  и  $OH^-$ , т.е. вернуть смолы в начальное состояние. Обработка кислотой и щелочью одновременно обеспечивает очистку ионообменников. После регенерации смолы промывают чистой водой, предпочтительно конденсатом из выпарного аппарата, и они готовы для обработки следующей части продукта. Типичный цикл состоит из двух часов работы и четырех часов регенерации. После обработки в ионообменной установке сыворотка деминерализуется на 90-98 %. Время обработки/выдержки составляет 20 минут, а поскольку рабочая температура не превышает 10 °C, бактерии не размножаются.

### **Электродиализ**

Установка электродиализа использует ионселективные мембранны, изготовленные приблизительно из таких же материалов, как ионообменные смолы, которые составляют отдельные ячейки. Каждая ячейка содержит одну катионную и одну анионную мембрану. Мембранны образуют пакет, как в пластинчатом теплообменнике. Расстояние между мембранными – приблизительно 1 мм. Между ячейками течет разбавленный раствор соли.

Весь пакет мембран расположен между электродами, создающими постоянное электрическое поле. Под действием этого поля катионы перемещаются по направлению электрического тока, т.е. к отрицательному полюсу, проходят через катионную мембрану и попадают в промывочный солевой раствор, который циркулирует через установку. Анионы перемещаются против электрического тока, т.е. к положительному полюсу, и проходят через анионную мембрану в промывочный солевой раствор. Как и промывочный солевой раствор, сыворотка циркулирует через установку, и ее состояние контролируется кондуктометром. Обрабатываемая сыворотка должна иметь достаточную проводимость, для чего ее требуется сконцентрировать до 20-28 % СВ, и температуру 30-45 °C. Продолжительность рециркуляции зависит от требуемого уровня деминерализации и может составлять 6 часов, если необходимо добиться 90 % деминерализации. Естественно, это приводит к размножению бактерий. Для предотвращения роста бактерий можно снизить температуру, но это увеличит размеры установки, а значит, и капитальные затраты, или добавить формальдегид. С уменьшением содержания солей в сыворотке уменьшается ее проводимость, что требуется компенсировать повышением напряжения. Чтобы содержание соли в промывочном растворе оставалось оптимальным, его требуется разбавлять. Избыток солевого раствора сливаются. Для очистки мембран через установку пропускают кислоту и щелочь, эта операция продолжается от 2 до 6 часов, разные производители рекомендуют разную длительность.

Деминерализованную сыворотку сушат как обычную сладкую сыворотку, см. стр. 259. Однако в связи с меньшим содержанием солей такую сыворотку сушить проще.



Верхняя часть башенной распылительной сушилки (TFD) – узел форсунок в воздухораспределителе.

# Особые продукты

## Детское питание

Всегда считалось несомненным фактом, что лучшее питание для младенцев до шести месяцев – это материнское молоко, поскольку оно имеет уникальный состав и содержит различные витамины и незаменимые аминокислоты. Однако многих младенцев кормят обычным коровьим молоком, в которое добавляют воду и сахар.

В попытках получить продукт, сходный с материнским молоком, но отличающийся стойкостью при хранении, меньшим объемом и удобством применения, международные компании разработали много видов сухого детского питания различного состава. В последние годы эти продукты, в том числе и составы для аллергочувствительных детей, пользовались все большим спросом.

Ниже приведены составы материнского и коровьего молока:

	Материнское молоко, г/мл	Коровье молоко, г/мл
Казеин	6.0	27.8
Лактальбумин	9.0	4.7
Общий белок	15.0	32.5
Жиры	41.0	37.5
Углеводы	69.0	48.5
Минеральные соли	2.0	8.0
Общее содержание СВ:	127.0	126.5

Из вышеприведенной таблицы видно, что цельное коровье молоко недостаточно разбавить водой и обогатить сахаром. В современном сухом детском питании каждый компонент цельного коровьего молока стандартизуется, чтобы продукт был как можно ближе по составу к материнскому молоку. В некоторых рецептурах молоко совсем не используется.

Представленное на рынке сухое детское питание – это широкая группа продуктов различного состава, которую можно разделить на следующие подгруппы:

- обычное сухое цельное молоко
- сухое цельное молоко с добавкой углеводов
- ферментированное молоко
- «человеческое» молоко
- продукты с крахмалом

### ***Обычное сухое цельное молоко***

Простейший тип детского питания – это сухое цельное молоко, содержащее 25-28 % жира по сухому веществу, или сухое полужирное молоко, содержащее приблизительно 14 % жира. Обычно в него добавляют витамины, например, А, В<sub>1</sub> и D<sub>2</sub>, чтобы компенсировать сезонные колебания витаминного состава натурального молока и обеспечить оптимальный для младенцев уровень витаминов.

Вообще говоря, такие продукты не требуют никакой специальной обработки и производятся по непрерывной технологии выпаривания и сушки. Витамины либо добавляются в жидкое молоко, либо непрерывно подаются насосом-дозатором в концентрат. Для обеспечения равномерного распределения витаминов, особенно жирорастворимых, требуется гомогенизация концентрата.

### ***Сухое цельное молоко с добавкой углеводов***

Эта группа продуктов детского питания также основана на жирном или полужирном молоке с добавкой сахарозы и мальтодекстрина. Сахароза добавляется в молоко перед выпариванием. Это позволяет пастеризовать сахарозу одновременно с молоком, так что готовый продукт имеет приемлемый уровень КОЕ. В настоящее время во многих странах имеется готовый к применению мальтодекстрин. Такой мальтодекстрин смешивают с частично концентрированным молоком. Очень часто в него добавляются витамины. Готовая смесь обязательно гомогенизируется перед сушкой. Если подготовка сырья является периодическим процессом, то концентрат некоторое время хранится перед сушкой.

### ***Ферментированное молоко***

Следующая группа продуктов – это молоко, обычно полужирное, ферментированное специально подобранными штаммами микроорганизмов. Для этого в предварительно концентрированное молоко – обычно до уровня не выше 22-25 % СВ. – вносят закваску (как правило, смесь *streptococcus lactic* и *lactobacillus*) и ферментируют при чуть повышенной температуре в течение 6-10 часов. После достижения требуемой кислотности ферментированный концентрат гомогенизируют, охлаждают и сушат в распылительной сушилке.

### ***Человеческое молоко***

Самая большая группа продуктов детского питания – так называемое человеческое или гуманизированное молоко. Оно сильно отличается от коровьего – в нем выше уровень лактозы, меньше белков, которые имеют иной состав (это, в основном, альбумин, тогда как в коровьем – казеин), жиры также имеют иной состав (в них значительно выше содержание ненасыщенных жирных кислот), а минералов в человеческом молоке меньше.

Применяются различные уровни гуманизации молока. Простейший состоит в увеличении уровня лактозы и добавке некоторых растительных жиров для увеличения содержания ненасыщенных жирных кислот. Используются и другие добавки, такие как витамины, ионы железа или лактулоза (галактозидофруктоза), приближающие коровье молоко к составу человеческого.

На рынке, в основном, представлены две группы гуманизированных продуктов детского питания:

Состав детского питания	Возраст младенцев	
	0-6 месяцев	6-12 месяцев
Белок:		
- казеин	6%	17%
- сывороточные белки	10%	4%
Жиры:		
- животные	6%	5%
- растительные	20%	16%
Углеводы:		
- лактоза	56%	40%
- мальтодекстрин	-	14%
Зола:	2%	4%

Как указывалось на стр. 47, коровье молоко содержит приблизительно вдвое больше белка, чем человеческое, меньше углеводов и приблизительно такое же количество жира. Эти два вида молока отличаются по основному типу белка. Поэтому сгустки, образующиеся в желудке младенца при створаживании человеческого молока, мягкие и хлопьевидные, а при створаживании коровьего – клейкие и эластичные. Кроме того, коровье молоко содержит больше минеральных солей (особенно  $\text{Ca}^{++}$ ) и меньше витаминов.

С точки зрения потребности в белке, очевидно, разбавления коровьего молока до уровня 15 г/л с добавлением углеводов и жиров недостаточно, так как эти два вида молока сильно отличаются по составу белка. Концентраты сывороточного белка, см. стр. 38, широко применяются для коррекции уровня белка в детском питании.

Для такой коррекции часто применяют подсырную сыворотку, белок которой состоит практически только из лактабумина и бетаглобулина. Ее, однако, не рекомендуется использовать непосредственно, так как это приведет к слишком большой концентрации минеральных веществ в готовом продукте.

Поэтому в наши дни все шире применяют удаление части солей мембранный фильтрацией или деминерализацию посредством ионного обмена или электродиализа, см. стр. 45.

В отношении жира человеческое молоко отличается от коровьего, во-первых, большей концентрацией, а во-вторых, более высоким содержанием полиненасыщенных кислот, таких как линолевая и арахидоновая, которые необходимы для лучшей утилизации энергии пищи. Поэтому после нормализации по уровню белка в молоко следует добавлять жир.

В связи с этим в молоко добавляют растительный жир (часто, кукурузное, пальмовое или подсолнечное масло), так как он содержит упомянутые полиненасыщенные кислоты. Обсуждалась возможность полной замены животного жира, но тогда в готовом продукте недоставало бы олеиновой кислоты, присутствующей в животных жирах.

Содержание минералов в коровьем молоке приблизительно в четыре раза выше, чем в человеческом. В процессе нормализации молока, особенно сывороточными белками (при условии, что сыворотка деминерализована), а также жирами и, возможно, лактозой, содержание минералов снижается до приемлемого уровня. Однако в большинстве случаев это приводит к слишком низкому содержанию железа, поэтому в продукт часто добавляют лактат, сахарат или сульфат железа.

Концентрация витаминов в коровьем молоке обычно меньше, чем в человеческом. Кроме того, она меняется по сезонам, поэтому в детское питание всегда добавляют витамины, тем более, что при обработке продукта часть витаминов разрушается.

Для аллергочувствительных детей производят питание, в котором белки молока заменены соевыми белками. Из-за соевых белков концентрат имеет высокую вязкость, поэтому его упаривают только до 40-45 % СВ.

### ***Продукты с крахмалом***

Еще одна большая группа продуктов детского питания, предназначенная для младенцев от 9 месяцев, содержит крахмал и имеет приблизительно следующий состав:

40-50%      концентрат цельного молока

35-45%      крахмал

10-15%      сахароза

2.5%      витамины + минералы

Крахмал можно вводить в продукт либо в сухом виде, либо в жидкой форме.

- Сухое дозирование – цельное молоко и сахароза смешиваются и пастеризуются, затем выпариваются до 45 % СВ и высушиваются в распылительной сушилке при температуре на выходе 180 °C. Сухой крахмал вводится в распылительную сушилку через систему возврата мелочи и агломерируется с частицами высшенного концентрата. Агломерация крахмала очень важна, так как предотвращает разделение продукта при хранении в банках. Поскольку сухой крахмал часто содержит бактерии, для получения приемлемого готового продукта может понадобиться облучение его гамма-лучами.
- Жидкое смешивание имеет то преимущество, что крахмал пастеризуется с остальными продуктами. Если температура пастеризации остается ниже 60 °C, крахмал не подваривается, и такую смесь упаривают до 45 % СВ и сушат при температуре 180 °C. Если температура пастеризации превышает 72 °C, крахмал подваривается и его вязкость возрастает. Из-за этого содержание сухих веществ приходится ограничивать 20-25 %. Температура сушки равна 180 °C. Отработанный воздух требуется очищать рукавными фильтрами, иначе потери порошка будут слишком высоки.

## Производство сухого детского питания

Продукт можно, конечно, нормализовать в сухом виде, т.е. просто смешивать различные сухие компоненты. Но один из важнейших моментов приготовления детского питания – обеспечение нормальных микробиологических показателей готового продукта.

Поскольку гораздо проще пастеризовать жидкий продукт, чем предотвратить попадание микроорганизмов в сухие продукты во время их технологической обработки (некоторые продукты могут изначально содержать недопустимо высокий уровень бактерий), предпочтительно смешать все ингредиенты в жидкой форме, а затем пастеризовать и сушить.

Такая смесь содержит 40-45 % СВ и готовится на основе упаренного молока с 20-30 % СВ. К нему добавляют сухую деминерализованную и (или) ультрафильтрованную сыворотку. При необходимости добавляются углеводы и жиры. Смешивание производится в больших резервуарах, оборудованных средствами контроля объема и массы. Смесь пастеризуется и выпаривается до 50-55 % СВ (в зависимости от состава), затем концентрат гомогенизируется и сушится. Важно не допустить загрязнения продукта после пастеризации. Поэтому открытые накопительные резервуары не применяются.

Концентрат детского питания можно сушить в распылительной сушилке обычной конструкции, широко применяемой в молочной промышленности.

Однако из-за отличий в составе эти продукты ведут себя при сушке иначе, чем молоко. Это обусловлено повышенным содержанием углеводов и жиров. Порошок становится термопластичным и липким, что ведет к отложениям на стенках камеры и засорению циклонов, потере продукта и опасности загрязнения.

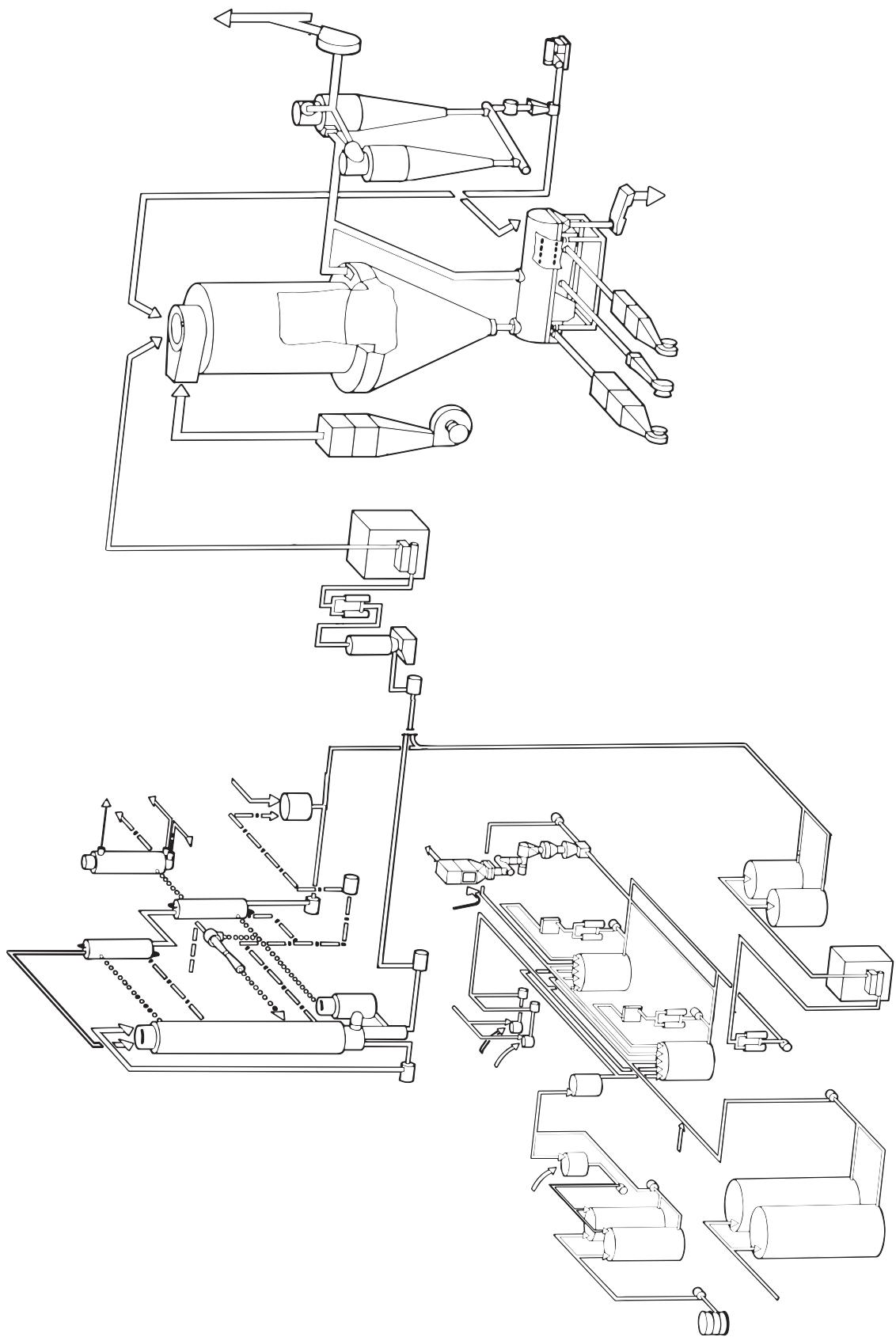


Рис. 143 Схема установки для производства детского питания с влажным смешиванием и концентрированием сырья для сушки.

Типичные рабочие условия:

содержание СВ в сырье: 50-55%

температура сырья: 70-80°C

Температура сушки: 180-190°C

Для продуктов с очень высоким уровнем углеводов может понадобиться снизить температуру сушки.

Возврат мелочи и агломерация позволяют получить быстрорастворимый сыпучий продукт. Избыток влаги выпаривают в аппарате Vibro-Fluidizer, где также охлаждают порошок. Иногда на этот порошок распыляют лецитин для повышения растворимости продукта.

Однако чаще всего детское питание производят либо в башенных сушилках, либо в многоступенчатых, если требуется продукт с крупными агломератами. Эти два типа сушилок имеет ряд преимуществ применительно к данному типу продуктов:

- Сырье распыляется форсунками, что повышает сыпучесть порошка.
- Поршневой воздушный поток минимизирует отложения на стенках, что увеличивает рабочий период между чистками.
- Специальная конструкция отвода воздуха из башенной сушилки снижает долю уносимого порошка, а значит и трудности, связанные с эксплуатацией циклонов. Такая установка может производить как агломерированные, так и неагломерированные продукты.
- Специальная конструкция отвода воздуха из многоступенчатой сушилки оптимизирует агломерацию порошка.

На рисунке 143 показано соединение выпарного аппарата и сушилки, которое позволяет избежать загрязнения продукта. Выпарной аппарат работает как "ведомое" устройство по отношению к распылительной сушилке и оборудован закрытым накопительным резервуаром с устройством контроля уровня, расположенным под нагревательной камерой. Контуры управления обеспечивают постоянный уровень сухих веществ в концентрате, поступающем в распылительную сушилку.

В некоторых случаях готовый продукт может содержать недопустимо много бактерий из-за слишком большой бактериальной обсемененности ингредиентов. В настоящее время смесь перед выпариванием можно подвергать сверхвысокотемпературной обработке. Высокая температура (120-140 °C) создается прямой инжекцией пара в смесь. После этого температура смеси резко снижается до 80 °C в мгновенном подогревателе/теплоутилизаторе непосредственно перед подачей в выпарной аппарат. См. рис. 144.

Порошок упаковывается в банки вместимостью 1-2 фунта. Для продления срока хранения упаковку рекомендуется заполнять азотом. Содержание кислорода должно быть меньше 2 %.

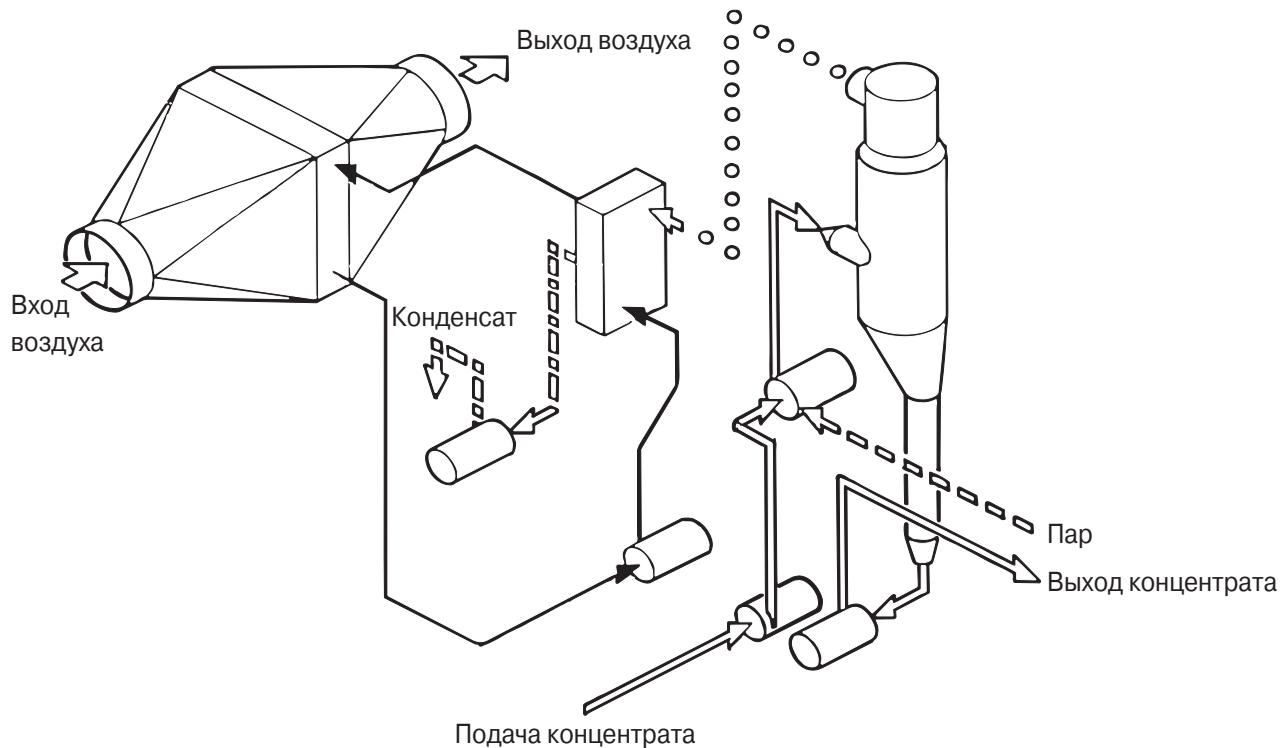


Рис. 144 Установка сверхвысокотемпературной обработки детского питания.



## Казеинаты

Казеинаты производят, растворяя осажденный казеин гидроксидом натрия, фосфатом натрия или гидроксидом кальция.

Казеинаты обычно применяют в качестве белковых компонентов детского питания, эмульгаторов и стабилизаторов пены в мороженом и эмульгаторов и водосвязывающих веществ в мясных продуктах.

Свежесажденные сгустки кислотного казеина – наилучшее сырье для производства казеинатов распылительной сушки. Для осаждения казеина подходит любая кислота (казеин осаждается в изоэлектрической точке, которая соответствует pH 4,6), однако, если казеин предназначен для кормов или пищевых продуктов, желательно использовать молочную кислоту, полученную из обезжиренного молока сбраживанием и осаждением.

Поскольку растворы казеината натрия содержат практически один белок, они обладают высокой вязкостью. Эта вязкость возрастает не только с увеличением содержания сухого вещества, но и при длительном воздействии высокой температуры. Кроме того, pH также имеет значение – вязкость минимальна в диапазоне pH 6,6-7.

Из-за высокой вязкости раствора казеината содержание сухих веществ в нем не должно превышать, в зависимости от особенностей технологии, 18-24 %.

Возможны два способа растворения казеина щелочью:

- периодический процесс
- непрерывный процесс

### *Периодический процесс*

В случае периодического процесса из-под пресса выгружается казеиновый сгусток, содержащий 48-50 % СВ. Этот сгусток диспергируют в теплой воде в баке с паровой рубашкой. Этую дисперсию медленно нагревают до 70 °C при непрерывном перемешивании, и добавляют раствор NaOH до pH 6,6-7.

Поскольку реакция между казеином и NaOH (или  $(\text{Ca(OH})_2$ ) требует времени (10-15 минут при температуре 70 °C), увеличение вязкости (загустевание с течением времени) оказывается значительным. Вязкость возрастает еще больше из-за того, что перед распылительной сушкой партия должна некоторое время храниться. Одновременно возникает еще одна проблема, так как в этих условиях невозможно избежать обесцвечивания из-за реакции Мейларда между остатками лактозы и аминокислотами. Поэтому готовый продукт имеет желтоватый цвет и, возможно, клейкий вкус.

### *Непрерывный процесс*

Растущий спрос на высококачественный казеинат натрия или кальция стимулировал разработку улучшенной технологии его производства. В результате была создана технологическая линия непрерывного растворения взвеси кислотного казеина с получением раствора казеината.

С технической точки зрения задача проста, сложность в том, чтобы подобрать оборудование, надежно работающее с вязким материалом. Судя по имеющимся в литературе данным о периодическом процессе, непрерывный процесс можно разделить на три стадии:

1. дезинтеграция казеиновых частиц
2. дозировка щелочи

## 3. смешивание

Кроме того, необходимо контролировать вязкость и температуру раствора.

Эти стадии непрерывного процесса растворения казеина показаны на рис. 145.

Свежесажденные хорошо промытые сгустки кислотного казеина подаются с водой в обрудованную мешалкой емкость 1. Количество воды регулируется так, чтобы поддерживать требуемое содержание сухих веществ во взвеси казеина.

Из емкости 1 суспензия казеина перекачивается насосом 2 в коллоидную мельницу 3. Здесь взвесь частиц казеина в воде превращается в густую пасту. Размер частиц казеина уменьшается настолько, что последующий процесс растворения значительно ускоряется.

Из коллоидной мельницы 3 казеиновая паста поступает в смеситель 4, куда одновременно дозатором 5 подается раствор гидроксида натрия соответствующей концентрации. Добавление NaOH или Ca(OH)<sub>2</sub> автоматически регулируется по значению pH.

После смесителя раствор казеината натрия проходит через оборудование для контроля и регулирования pH (6), температуры (7) и вязкости (8) раствора.

Затем раствор казеината натрия поступает в питающий резервуар распылительной сушки.

Период, в течение которого дисперсия казеина имеет низкий pH и поэтому высокую вязкость, очень непродолжителен. После этого поддерживается pH 6,6-7,0, при котором вязкость раствора минимальна (в зависимости от содержания сухих веществ и температуры она может достигать нескольких тысяч сантиметров).

Непрерывный процесс позволяет сократить время реакции от подачи щелочи в суспензию казеина до получения сухого казеината, так что оно составляет только 1-2 % от такого же времени при периодическом процессе.

Это дает возможность частично противодействовать ухудшению вкуса и в некоторой степени использовать связь между температурой и вязкостью раствора казеината натрия. Чем выше температура (при условии недолгого воздействия), до которой можно нагреть смесь в процессе растворения и особенно непосредственно перед сушкой, тем выше допустимое содержание сухих веществ в растворе.

При непрерывном процессе благодаря короткому времени выдержки можно сушить концентраты, содержащие (в зависимости от вида щелочи) до 24 % СВ.

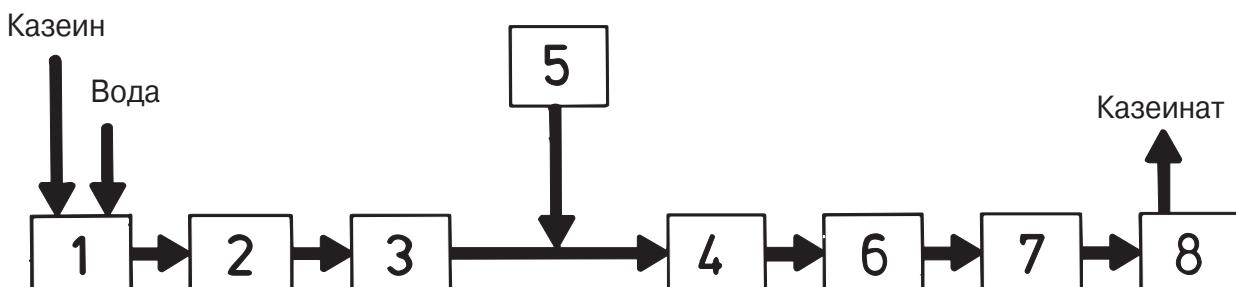


Рис. 145 Схема установки непрерывного производства Na-казеината.

***Распылительная сушка казеинатов***

Распылительная сушка казеинатов не представляет сложности и обычно проводится при высокой температуре.

Главная проблема в том, что низкий уровень сухих веществ ведет к малой плотности частиц и малой насыпной плотности. Поэтому особое внимание уделяется системе извлечения порошка, в которой применяют руканые фильтры.

Для повышения плотности частиц рекомендуется распыление форсунками и двухступенчатая сушка. Влажность порошка на выходе из камеры может быть довольно большой, 10-12 %, так как казеинаты хорошо связывают воду. Остаток влаги выпаривается в аппарате Vibro-Fluidizer, где требуется поддерживать низкую скорость охлаждающего воздуха, чтобы предотвратить значительный унос порошка.

Типичные условия сушки:	Казеинат натрия	Казеинат кальция
Температура сушки:	200-230°C	200-250°C
Содержание сухих веществ:	20-24%	20-22%
Температура сырья:	80-90°C	80-90°C
Влажность порошка на выходе	10-12%	7-9%

Из-за отсутствия связующих углеводов (лактозы) казеинаты практически невозможно агломерировать, если они сушатся в установках традиционной конструкции, даже в случае возврата мелочи. Такую возможность дает только многоступенчатая сушка (см. стр. Ошибка! Закладка не определена., рис. 85), а для получения быстрорастворимого порошка необходима лецитинизация - по тем же причинам, которые обсуждались для 80 % сухого концентрата сывороточного белка, см. стр. 38.

Казеинаты чаще всего применяются в колбасных изделиях, где действуют как эмульгаторы жира и водосвязывающие агенты, защищая продукт от высыхания и сохраняя его свежесть и одновременно увеличивая содержание белка.

Эмульгирующий свойства казеинатов широко используются в заменителях молочных продуктов, таких как молоко с наполнителями, искусственное молоко, забеливатель для кофе, взбитые сливки, мороженое, замороженное молоко и т.д.

Высокая питательная ценность казеината делает пригодным и для других пищевых продуктов, где желательно увеличить содержание белка, например, для спагетти и макарон.

## Продукты, содержащие бактерии

Распыление продуктов, содержащих бактерии, не составляет труда, однако если не принять специальных мер, в порошке будет очень мало живых бактерий.

Проведенная в лаборатории компании NIRO испытательная распылительная сушка обычных заквасочных культур (т.е. молока, заквашенного стрептококками, бетакокками и другими штаммами молочнокислых бактерий, широко применяющимися в молочной промышленности), содержавших 10-12 % СВ, показала, что в порошке остается очень мало живых бактерий. Температура сушки всего 140 °С инактивировала большую часть бактерий, даже если сырьем служила культура в фазе постоянной скорости деления (т.е. фазе логарифмического роста), на которой бактерии обычно проявляют максимальную устойчивость к резким изменениям условий. В той же серии испытаний сушилку эксплуатировали в таком режиме, что порошок на выходе из камеры имел влажность 15-20 %, что соответствует температуре воздуха около 50 °С. Это означает, что частицы не нагревались больше чем до 35 °С. Тем не менее, количество живых бактерий в порошке было очень мало. Это означает, что бактерии погибают при сушке не только из-за воздействия температуры. Хотя это и не доказано, но представляется логичным, что определенную роль в этом играет резкий рост осмотического давления (из-за испарения воды).

При распылительной сушке йогуртовых культур принимается ряд мер, чтобы решить эту проблему. Один тип сухого продукта можно произвести, если ограничиться частичной ферментацией и остановить ее, прежде чем pH опустится до 5,9. Это предотвращает коагуляцию казеина, а сравнительно низкое содержание молочной кислоты также облегчает сушку.

Процесс выполняется следующим образом...

Нормализация молока до требуемой жирности, пастеризация при 100 °С, выпаривание до приблизительно 35 % СВ., охлаждение до 42 °С, заквашивание 5 % закваской, сбраживание до pH 5,9-6,0, гомогенизация при 100 бар, охлаждение до 15 °С, распылительная сушка при 120-150 °С, влажность порошка на выходе из камеры – максимально допустимая, т.е. 10 %. Сушка в аппарате Vibro-Fluidizer при 50 °С до 2 % влаги. Выживаемость составляет (1-10) x 10<sup>7</sup> / г порошка, т.е. 5-10 %

Такой порошок используют для приготовления йогурта, растворяя порошок в воде и инкубуя в течение суток при оптимальной температуре (38 °С).

Недавно была опубликована формула изобретения на способ селекции штаммов бактерий, пригодных для распылительной сушки. Полученный вышеописанным способом сухой йогурт последовательно заквашивается и сушится, и после четвертого поколения практически все бактерии остаются жизнеспособными. Неясно, однако, будут ли такие штаммы обладать ферментной системой, необходимой для производства йогурта.

## Заменитель молока

Заменитель молока или молоко с наполнителем – это заменитель цельного молока, в котором молочный жир замещен более дешевым животным или растительным жиром.

Заменитель молока применяется для кормления телят, цыплят и поросят. Телятам его дают на стадиях выращивания и откорма. Для каждой из этих целей производят свой тип заменителя цельного молока.

Однако готовая кормовая смесь не имеет определенного состава. Доля компонентов может варьироваться в следующих диапазонах:

Жир: 15 - 20%

Сухой обезжиренный молочный остаток: 65 - 80%

Декстроза, лактоза, СВ сыворотки: 0 - 10%

Эмульгаторы \*): 0 - 2%

Мука: 0 - 7%

Минералы, витамины: 0 - 0.5%

\*) Эмульгаторы включают в себя: лецитин, моноглицериды, сахароглицериды

Минералы: Ca, Na, Mg, Cu, PO<sub>4</sub>, Cl, HCO<sub>3</sub>

Витамины: A, D, E, (B, C)

Антибиотики: террамицин или ауреомицин

Обогащенное жиром сухое обезжиренное молоко можно произвести двумя способами:

- сухим смешиванием сухого обезжиренного молока и жира
- сушкой эмульсии жира в концентрате обезжиренного молока

### *Сухое смешивание сухого обезжиренного молока и жира*

Первоначально для производства этого продукта применялось именно сухое смешивание. Транспортер с сухим обезжиренным молоком проходил под форсункой, через которую распыляли жир.

Однако такой продукт имел низкую растворимость и плохо хранился.

Затем был разработан другой метод – жир распыляли в камере, куда пневматически подавалось сухое обезжиренное молоко. Получающийся продукт состоял из шариков жира, покрытых частицами сухого обезжиренного молока.

Такой продукт имеет много достоинств, но для некоторых применений его качество недостаточно высоко. Главный его недостаток состоит в структуре жира, так как весь жир является свободным, а размер шариков слишком велик. Это ухудшает его сохранность и затрудняет пищеварение у телят.

Сушка эмульсии жира в концентрате обезжиренного молока

*Этим методом обычно производят премикс, содержащий больше жира (до 60 % по сухим веществам), чем необходимо для конечной кормовой смеси.*

Этот премикс затем смешивают с другими компонентами согласно пищевым потребностям животных.

Сырьем служит: (а) прошедшее обычную обработку (пастеризованное) обезжиренное молоко с кислотностью не выше 14° Дорника (0,14 % молочной кислоты) и (б) первосортный жир с концентрацией свободных жирных кислот менее 0,4 % (по олеиновой кислоте) и очень низким содержанием примесей и воды.

Обезжиренное молоко выпаривается до 40-45 % с.в. и нагревается до 65 °C.

Жиры плавятся и нагреваются приблизительно до 55 °C. Возможно применение как животных, так и растительных жиров. Если жир поставляется автоцистернами, он обычно имеет температуру 50-55 °C и оборудование для его плавления не требуется.

В расплавленный жир могут вводиться антиоксиданты (например, бутил-гидрокситолуол). Если требуются эмульгаторы, они вводятся на этой стадии.

Затем жир нагревают приблизительно до 65 °C, смешивают с концентратом обезжиренного молока, пропускают смесь через гомогенизатор, и эмульсия готова к сущке.

Смешивание жира и обезжиренного молока можно осуществлять как

- Периодический процесс
- Непрерывный процесс

### ***Периодический процесс***

Из выпарного аппарата концентрат обезжиренного молока перекачивается через промежуточный резервуар в смесительный танк. В этом танке определяется объем (или масса), плотность и температура партии концентрата. Отсюда рассчитывается количество сухого обезжиренного молока и, соответственно, необходимое количество жира.

Жир, который хранят в танке при температуре 50-55 °C, перекачивают через подогреватель в смесительный танк бак, где расчетное количество жира смешивают с концентратом обезжиренного молока.

Обычно используют три смесительных танка. Пока один выгружается, второй заполняется а в третьем идет смешивание.

Гомогенизация нужна для дезинтеграции жировых шариков, что повышает их переваримость. Требуется получить жировые шарики размером не больше 3 мкм и не меньше 1 мкм.

Гомогенизация увеличивает вязкость смеси. Слишком вязкое сырье приводит к крупно-дисперсному распылению, что ухудшает условия сушки и качество продукта. Добавка эмульгаторов может ограничить увеличение вязкости. Но это создает свои трудности, увеличивая количество отложений в сушильной камере, так что введение эмульгаторов нежелательно.

### ***Непрерывный процесс***

Для непрерывного смешивания жира с концентратом обезжиренного молока требуется следующее оборудование:

1. Выпарной аппарат с автоматическим регулированием производительности по выпаренной воде и содержания сухих веществ в концентрате.
2. Резервуар для растопленного жира.
3. Центробежные насосы, перекачивающие концентрат обезжиренного молока и жир.
4. Поршневой насос с тремя поршнями, позволяющий перекачивать концентрат обезжиренного молока, жир и, возможно, эмульгатор в постоянном соотношении.
5. “комбинатор” для нагрева и смешивания жира и концентрата обезжиренного молока. Соотношение жира и концентрата обезжиренного молока можно регулировать, изменения рабочий ход поршней насоса.
6. Из “комбинатора” смесь подается в гомогенизатор, который одновременно служит питающим насосом сушильной установки. Расход сырья регулируется изменением частоты вращения двигателя по температуре воздуха на выходе из сушилки.

Распылительная сушка сконструирована специально для данной цели и работает так, чтобы минимизировать отложения и эффективно охлаждать производимый порошок.

Важнейший параметр – это температура воздуха на выходе, которая должна быть достаточно низкой, чтобы не ухудшить свойства продукта. В современных распылительных сушилках, производящих такой продукт, температура воздуха на входе равна 160-190 °C.

При сушке продуктов с высоким содержанием жира отложения неизбежны. Такие отложения нежелательны, поскольку затрудняют чистку установки и увеличивают потери продукта. Кроме того, после некоторого пребывания в сушилке отложения пригорают, пригорелые частицы могут осипаться и смешиваться с продуктом, снижая его качество. Наконец, отложения могут стать причиной пожара из-за экзотермического самоокисления. Ниже перечислены меры, которые позволяют сократить отложения до минимума.

- Надлежащая гомогенизация уменьшает содержание свободных жиров.
- Эмульгаторов следует по возможности избегать.
- Требуется установка, минимизирующая количество отложений, - Compact или MSD.
- В продукт можно добавлять сухое обезжиренное молоко или средство от комкования, чтобы сделать его менее липким и более сыпучим. Это помогает обеспечить чистоту камеры и циклонов.
- В сушильную камеру тангенциально полается вторичный охлаждающий воздух.

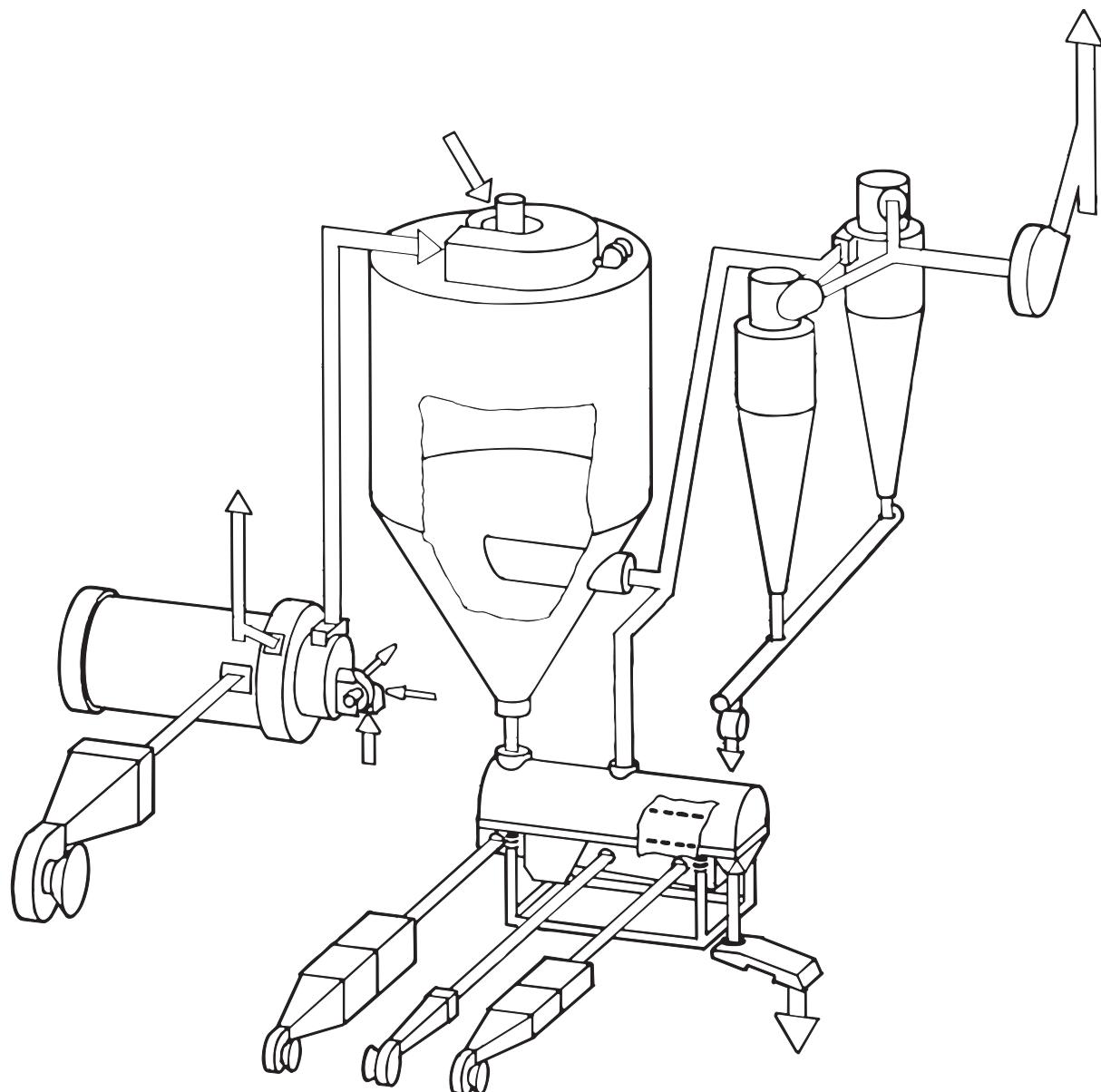


Рис. 146 Распылительная сушилка заменителей молока для телят (CDI/C).

Основная часть порошка выгружается из камеры непосредственно в Vibro-Fluidizer, где порошок охлаждается в виброожиженном слое посредством окружающего воздуха и охлажденного осушенного воздуха.

Порошок из циклонов транспортируется виброконвейером в камеру для агломерации или в Vibro-Fluidizer, где происходит охлаждение. На выходе из охлаждающего виброожиженного слоя порошок просеивается и пакуется в мешки. См. рис. 146.

Пищевое сухое молоко с наполнителями находит все больший спрос. Его общий химический состав такой же, как у сухого цельного молока, т.е. содержание жира – 26-28 %. Для этой цели используют различные растительные жиры, обычно обработанные так, чтобы по температуре плавления эта смесь соответствовала молочному жиру. Естественно, в продукт добавляют различные витамины (в основном, А, Д и Е).

Смешивание обезжиренного молока и жира осуществляется по непрерывному процессу, описанному выше. Сушка осуществляется в установке, оборудованной системой возврата мелочи для агломерации порошка и дозатором лецитина для повышения растворимости сухого продукта. Такой порошок применяют, в основном, в столовых, гостиницах, больницах, воинских частях и т.д.

Этот тип продукта выпускают в странах с ограниченным собственным производством молока. Порошок изготавливается на основе импортного сухого обезжиренного молока, которое растворяют и смешивают с жиром местного производства.

## **Сухое цельное молоко с высоким содержанием свободных жиров**

При выработке сухого цельного молока стремятся минимизировать содержание свободных жиров, чтобы увеличить срок хранения продукта.

Шоколадная промышленность, однако, заинтересована в получении сухого цельного молока с максимальным содержанием свободных жиров, поскольку это снижает вязкость шоколадной пасты. Это позволяет использовать меньше масла какао, которое является дорогим продуктом.

Такой продукт производят, кристаллизуя лактозу в концентрате цельного или обезжиренного молока и смешивая этот концентрат со сливками в надлежащей пропорции. Затем смесь сушат в многоступенчатой сушилке, см. рис. 147. Эта установка обладает многими преимуществами, поскольку рассчитана на обработку трудных для сушки продуктов с высоким содержанием жира. Другое преимущество этой сушилки – встроенный псевдоожиженный слой, в котором ожигается порошок с высоким содержанием влаги. В результате сушки раствор лактозы вновь становится пересыщенным, см. раздел “Кристаллизация концентрата сыворотки”, стр. 27, и кристаллизация приводит к увеличению содержания свободных жиров, поскольку растущие кристаллы лактозы разрушают белковые мембранны жировых шариков. Добавление лактозы перед выпариванием молока (до 20 % по сухим веществам) усиливает кристаллизацию и увеличивает долю свободных жиров до 90 % от общего содержания жира.

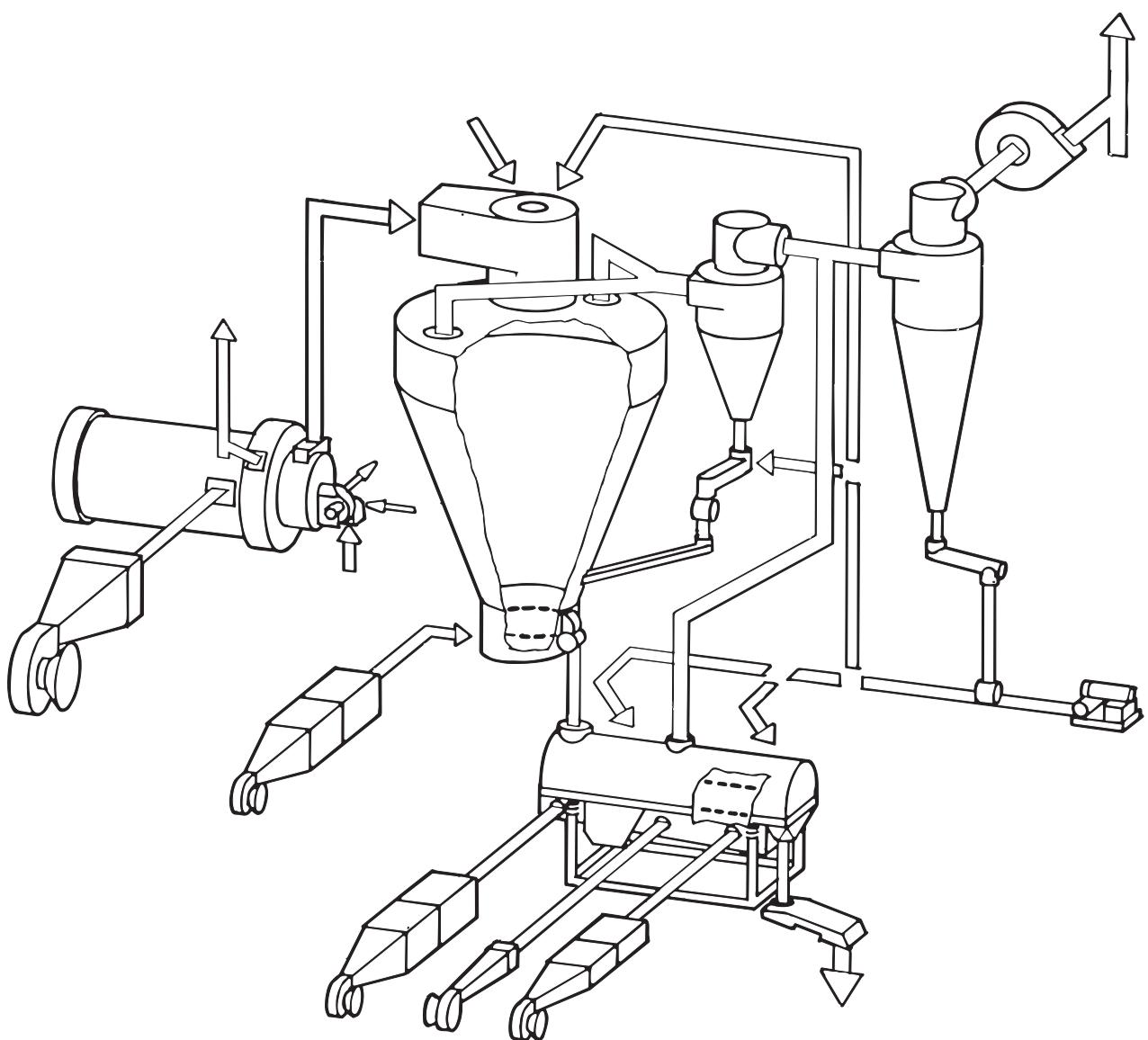


Рис. 147 Многоступенчатая сушилка для производства сухого цельного молока с высоким содержанием свободных жиров (MSD).

Высокий уровень свободных жиров, конечно, осложняет эксплуатацию циклонов по сравнению с производством нормального сухого цельного молока, но установка специального циклона предварительной сепарации или моющегося рукавного фильтра частично решает эту проблему. Окончательная сушка и охлаждение выполняются в аппарате Vibro-Fluidizer. Для нормального цвета шоколада важно, чтобы влажность готового порошка была ниже 2 %.

## Порошки для производства сыра

### *Обезжиренное молоко*

В последние годы прилагались значительные усилия для производства сухого обезжиренного молока, пригодного для выработки сыра, чтобы противодействовать сезонным изменениям поставок молока для сырорделия. Одновременно это позволяет отправлять порошок в страны, не имеющие собственного молочного производства, для изготовления мягкого сыра с коротким сроком хранения или создавать запасы порошка, если цены на сыр невелики, чтобы в дальнейшем растворить порошок и изготовить из него сыр, поскольку сухое молоко хранится лучше, чем сыр.

Прежде чем вдаваться в детали техники сушки, стоит отметить, что порошок, пригодный для производства сыра, можно получить только из молочного сырья, отвечающего самым высоким стандартам гигиены.

Хорошо известно, что для производства традиционного сыра типа гауда пастеризация должна проходить при температуре не выше 72 °C в течение 15 с, а многие предпочитают не поднимать температуру выше 60 °C, чтобы не нарушить нормальную ферментную систему молока. Повышение температуры пастеризации могло бы увеличить выход сырного сгустка, поскольку сывороточные белки в этом случае осаждаются вместе с казеином, но из-за иного аминокислотного состава сывороточных белков это придает сыру горьковатый вкус, который не нравится большинству потребителей. В новых сортах сыра, где ароматообразующие бактерии не доминируют и созревание протекает быстрее, этот эффект, кажется, не проявляется. Поэтому молоко с высокой обсемененностью бактериями, особенно теплоустойчивыми, не пригодно для производства традиционных сыров, так как столь низкая температура не уничтожит бактерии.

Вышеуказанные требования относятся и к сухому молоку, которое используется для производства сыра, поэтому обычное сухое обезжиренное молоко для этой цели не пригодно, так как подвергается сильной термической обработке. Сыр нужно изготавливать из сухого молока, приготовленного специально для этой цели – так называемого сухого молока низкотемпературной обработки.



Нижняя часть распылительной сушилки MSD и присоединенный к ней аппарат Vibro-Fluidizer для досушки и охлаждение.

Сухое обезжиренное молоко можно классифицировать следующим образом:

## Индекс азота сывороточного белка, мг/г порошка

Молоко среднетемпературной обработки: от 1,5 до 6

Молоко высокотемпературной обработки: не выше 1,5

Индекс азота сывороточного белка выражает количество нативных сывороточных белков в порошке и служит показателем интенсивности теплового воздействия при обработке молока. Поскольку нас интересует количество денатурированных сывороточных белков и поскольку практического метода определения степени денатурации не существует, необходимо определить общее количество нативных сывороточных белков в молочном сырье. Сезонные изменения и характер сывороточных белков в молочном сырье заставляет проводить это измерение не реже раза в неделю, но, только зная термостойкость местного молока в каждый период года, можно выбрать правильное сочетание температуры и длительности тепловой обработки для получения сухого молока требуемого сорта.

Поскольку уровень сывороточных белков варьирует в пределах 6-13 мг/г (как правило, это 8-9 мг/г), недостаточно обеспечить индекс азота сывороточного белка 6 мг/г, так как это может означать до 7 мг нативных сывороточных белков на 1 г сухого обезжиренного молока, т.е. опасность развития горького вкуса сыра. Поэтому требуется добиться как можно более высокого индекса азота сывороточного белка в сухом молоке, что предполагает низкую температуру пастеризации.

Как уже отмечалось, требования к качеству молока высоки, но сырье можно пастеризовать прямой инжекцией пара непосредственно перед подачей в первый корпус, где молоко мгновенно остывает до температуры в нагревательной камере. Такая тепловая обработка практически не влияет на сывороточные белки, но заметно снижает уровень бактерий.

Поэтому следует уделить особое внимание термофильным спорообразующим бактериям, так как они не уничтожаются при “низкотемпературной” пастеризации. Они могут начать размножаться в подогревателях после 14-16 часов работы, если не принять специальных мер при проектировании выпарного аппарата. См. стр. 48.

Но что происходит с сывороточными белками в выпарном аппарате и распылительной сушилке? В выпарном аппарате – очень немногое, а в распылительной сушилке – практически ничего, если рабочая температура не слишком высока. Причем, чем выше концентрация, тем меньше денатурация сывороточных белков.

Типичные рабочие условия:

Подогрев до 65-70 °C без выдержки (возможна пастеризация до 90 °C с мгновенным охлаждением до 65-70 °C перед подачей в первую нагревательную камеру, но при этом следует следить за уровнем термофильных бактерий, особенно их спор).

Выпаривание до 44-46 % СВ (температура в первом корпусе не выше 65 °C), возможно, хранение при 40 °C в течение 1-2 часов.

Распылительная сушка при 180 или даже 200 °C.

Рекомендуется использовать выпарные аппараты без рециркуляции, а сушку желательно проводить в две ступени, поскольку это обеспечивает более мягкую обработку – температура частиц остается гораздо более низкой, особенно в критической фазе сушки от 20 до 10 % влаги, что предотвращает денатурацию белков. Фракция мелочи возвращается в Vibro-Fluidizer, где смешивается с фракцией из сушильной камеры, и весь порошок досушивается до требуемой влажности и охлаждается перед упаковкой в мешки.

Мягкая двухступенчатая сушка улучшает скорость гидратации, т.е. сокращает время, необходимое для полного восстановления влагосодержания.

Помимо повышения качества продукта, такая обработка сокращает расходы на сушку и увеличивает производительность по выпаренной влаге, что является преимуществом, поскольку рекомендуемое низкое содержание сухих веществ в упаренном растворе означает, что в распылительной сушилке необходимо испарять больше воды.

В последние годы многократно публиковались и обсуждались данные о применении сухого обезжиренного молока для производства традиционного сыра. Здесь недостаточно места, чтобы ссылаться на все эти работы, но их можно резюмировать следующим образом.

Лучший конечный результат обеспечивается при низкой температуре пастеризации перед выпариванием, хотя и доказано, что такая температура не влияет на свертывание белка. Один из авторов утверждает, что хранение концентрата 1-2 часа при 40 °C улучшает качество сгустка, и в любом случае это качество повышается при добавлении 0,2 г CaCl<sub>2</sub> на литр молока. Количество сухого обезжиренного молока, которое можно использовать для производства сыра, зависит от типа сыра. Чем больше воды в готовом сыре, тем больше допустимая доля сухого молока (до 50 % по сухим веществам). Для сыров типа гауда или чеддер нормальным является 20-25 % (по сухим веществам). Перед свертыванием сухое молоко растворяют до концентрации 9-12 % СВ, выдерживают в течение ночи и затем применяют для нормализации цельного молока до требуемой жирности. В одной из статей описано применение сухого обезжиренного молока (коровьего) для нормализации буйволиного молока до соотношения казеин:жир 0,7:1 перед производством сыра типа чеддер или эдам.

Желательно применять сухое молоко, произведенное в летние месяцы, так как характерный зимний привкус может составить проблему.

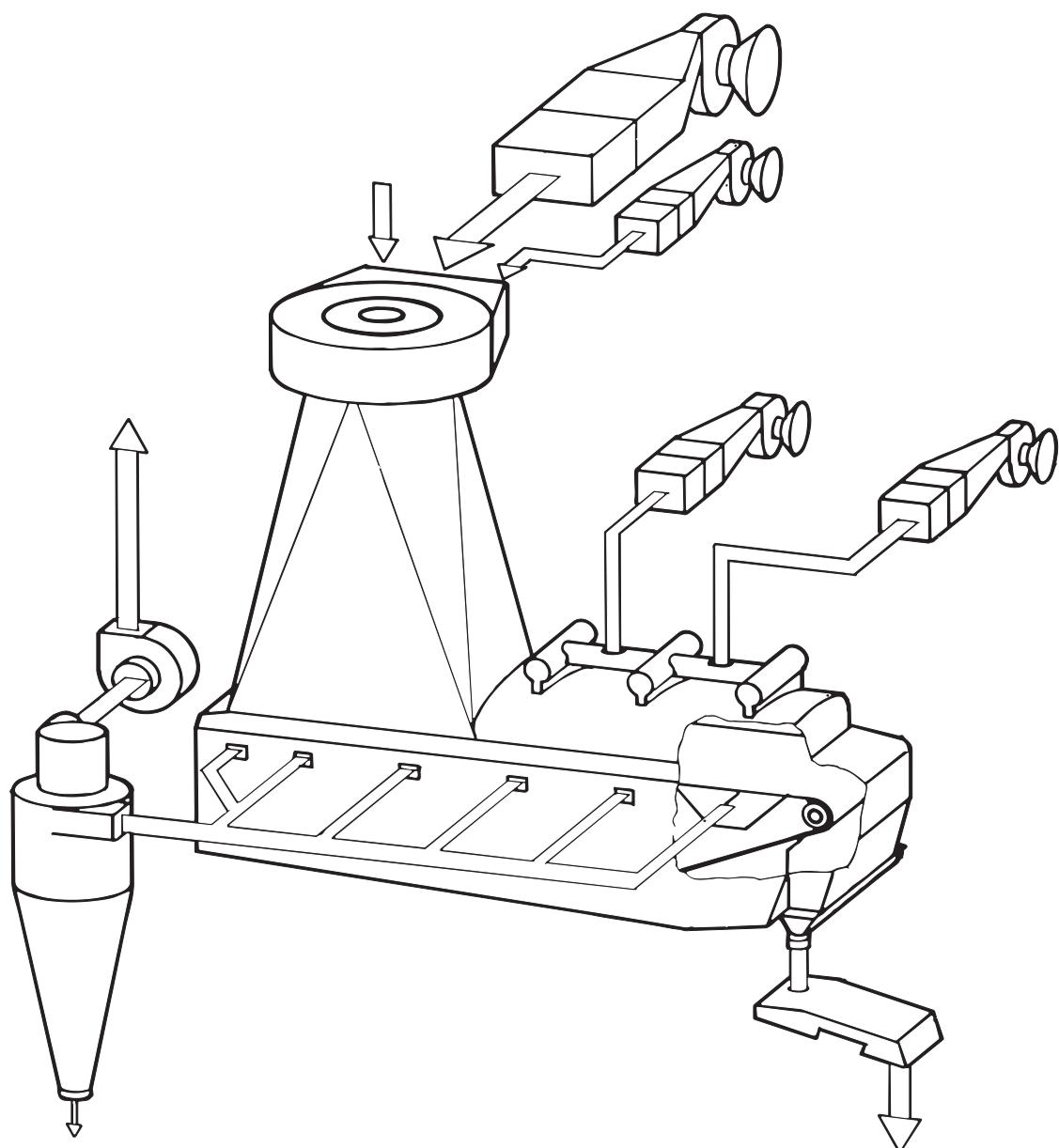


Рис. 148 Сушилка со встроенным транспортером FILTERMAT® (FMD).

Другая возможность – производство сыра из восстановленного молока и молочного жира, полученного осаждением из сливок. При восстановлении молока важно избегать вспенивания, которое приводит к получению нестандартного сыра. Молоко нормализуют до отношения жир:казеин 0,78:1, затем смесь гомогенизируют при давлении не выше 30 бар. Более высокое давление разрушает жировые шарики, и свободные жирные кислоты придают сыру посторонний привкус. Желательно гомогенизировать как можно меньшую часть жира, рекомендуется подготовить сливки 25-30 % жирности и смешать с оставшимся восстановленным обезжиренным молоком.

В большинстве статей отмечается, что использование сухого обезжиренного молока – хороший способ сгладить сезонные колебания поставок молока, что позволяет более эффективно эксплуатировать сыродельное оборудование.

#### **Ретентат**

Ультрафильтрация цельного молока – хорошо известный в сыротделении прием: ретентат, в котором снижена доля лактозы, непосредственно используется в сырной ванне, что обеспечивает увеличенный выход продукции, или же обрабатывается оборудованием для непосредственной коагуляции и используется в производстве мягкого белого сыра. Ретентат, который содержит 35-40 % СВ, можно непосредственно после ультрафильтрации подавать в распылительную сушилку. Получаемый порошок можно затем растворять и использовать для компенсации сезонных колебаний. Это особенно относится к овечьему и козьему молоку.

## **Порошкообразный сыр**

Для распылительной сушки сыра его нужно перевести в жидкую форму. Это делается посредством обычного плавления – сырная корка, если она есть, удаляется, сыр измельчается и в процессе нагрева и перемешивания вместе с водой добавляются соли-плавители, такие как фосфаты и цитраты.

Цель состоит в получении сырья с содержанием сухих веществ около 35 % и температурой 75 °C, вязкость которого не слишком велика для распыления. Сушка проводится при температуре 180-190 °C. Порошок охлаждается в аппарате Vibro-Fluidizer, в первую секцию которого подают окружающий воздух, а во вторую – охлажденный осущененный воздух.

Сушилка со встроенным транспортером FMD, см. рис.148, оказалось особенно удобна для производства порошкообразного сыра, поскольку он выгружается в виде агломерата. Кроме того, порошок практически не уносится в циклон, т.е. не создает никаких проблем с эксплуатацией.

Порошкообразный сыр применяют, главным образом, в соусах, приправах, крекерах, чипсах, а также непосредственно для заправки горячих блюд, таких как спагетти и супы.

Поскольку часть запаха теряется в процессе сушки, рекомендуется сушить зрелый сыр. Чтобы отработанный воздух не имел запаха, его рекомендуется пропустить через фильтр с активированным углем.



Верхняя часть распылительной сушилки FILTERMAT – узел форсунок и воздухораспределитель.

## Смеси какао, молока и сахара

Этот тип порошка широко применяют в торговых автоматах для приготовления горячих шоколадных напитков, но его продают и в розницу для домашнего употребления.

Обычно порошок имеет следующий состав:

Какао: 15-35%

Сухой обезжиренный молочный остаток: 40-60%

Сахар: 20-40%

Если количество какао и сахара не превышает 15 и 20 % соответственно, можно смешать и гомогенизировать компоненты и сушить смесь, содержащую 45 % СВ, при температуре 170-180 °C. Для получения сыпучего порошка, пригодного для применения в торговых автоматах, фракцию из циклонов нужно возвращать в распылитель для агломерации. Затем порошок досушивается и охлаждается в аппарате Vibro-Fluidizer, так же как в процессе распылительной сушки и агломерации, описанном на стр. Ошибка! Закладка не определена..

Если доля какао и сахара выше, их рекомендуется добавлять в сухом виде. Это делается через систему возврата мелочи с применением дополнительного продуваемого клапана и оборудования для дозированной подачи из бункера смеси какао и сахара. Для оптимальной агломерации важно, чтобы сахар был мелко размолот.

## Забеливатель для кофе

Забеливатели для кофе, т.е. изготовленные из растительного масла заменители сливок, - еще одна большая группа предназначенных для растворения сухих продуктов, производимых распылительной сушкой.

Типичный состав забеливателя для кофе:

Глюкозный сироп или мальтодекстрин с ДЕ 25-30: 60-65%

Гидрогенизованный растительный жир

с температурой плавления 35-40 °C: 30-32%

Na-казеинат: 3-5%

Вкусовые добавки, красители и эмульгаторы: 1-3%

Фосфаты: 1-3%

Перечисленные компоненты разводят в воде в больших танках при температуре 60-70 °C до содержания сухих веществ 65-70 %. Смесь гомогенизируют в две стадии и подают в распылительную сушилку.

Для распыления можно применять и форсунки, и диски, однако обычно выбирают форсунки, так как они обеспечивают лучшую сыпучесть порошка. Порошок должен легко растворяться в горячих напитках, таких как кофе или чай, поэтому его агломерируют.

Если продукт производят в традиционной сушилке, оборудованной аппаратом Vibro-Fluidizer и системой возврата мелочи, сушку ведут при 165-170 °C. Из камеры выгружают порошок с содержанием влаги не более 3,5 %, чтобы избежать отложений: из-за высокого содержания глюкозного сиропа продукт термопластичен и при высокой влажности легко прилипает к стенкам.

Окончательная сушка и охлаждение выполняются в аппарате Vibro-Fluidizer. Если применяется многоступенчатая сушилка, сушку можно вести при более высокой температуре (180-200 °C), не опасаясь проблем с отложением порошка.

## Порошкообразный забеливатель-капучино

Этот продукт используется как забеливатель кофе, но его главное назначение – создать после растворения толстый стабильный слой пены на поверхности кофе. Очень часто сухой забеливатель-капучино продается в виде готовой к применению смеси с растворимым кофе и сахаром.

Пенообразование достигается в результате высвобождения заключенных в порошке газов:

- абсорбированного воздуха и CO<sub>2</sub>, последний специально вдувается в концентрат перед сушкой;
- воздуха, заключенного между частицами при агломерации продукта.

Состав концентрата слегка отличается от состава для обычного забеливателя в связи с необходимостью создавать толстый слой стабильной пены. Типичный состав:

Глюкозный сироп или мальтодекстрин с DE 25-30: 40-45%

Гидрогенизованный растительный жир

с температурой плавления 35-40 °C: 20-25%

Сухое обезжиренное молоко

низкотемпературной обработки: 30-35%

Вкусовые добавки, красители и эмульгаторы: 1-3%

Фосфаты: 1-3%

Компоненты смешиваются при температуре 60-65 °C до содержания сухих веществ 50-55 %. При этом важно избегать попадания в концентрат воздуха, так как он займет “место” CO<sub>2</sub>, поэтому смешивание производится под вакуумом. Кроме того, важно не допускать длительной выдержки при 60-65 °C, так как это приведет к загустеванию с течением времени.

После смешивания концентрат гомогенизируют в две ступени при 150 и 50 бар, затем пастеризуют при 70-75 °C в течение 15 с.

После этого смесь охлаждают до 50-55 °C. CO<sub>2</sub> вдувают с помощью аппарата МИП, см. стр. Ошибка! Закладка не определена., который обеспечивает оптимальное растворение CO<sub>2</sub> в концентрате. Количество CO<sub>2</sub>, которое можно растворить в концентрате, зависит от температуры и давления концентрата. Низкая температура и высокое давление повышают растворимость CO<sub>2</sub>.

Концентрат сушат в многоступенчатой сушилке с форсуночным распылением, см. стр. Ошибка! Закладка не определена., поскольку такая установка обеспечивает наилучшую агломерацию, т.е. увеличивает количество воздуха, заключенного между частицами. Температура сушильного воздуха зависит от температуры окружающей среды, как правило, это 200-210 °C. Типичная насыпная плотность готового порошка – 0,15 г/см<sup>3</sup>, высота слоя пены – приблизительно 10 мм, а стабильность – 0,5-1 час.

# Список иллюстраций

---

- Рис. 1 Выпарной аппарат с принудительной циркуляцией.
- Рис. 2 Рециркуляционный выпарной аппарат с падающей пленкой.
- Рис. 3 Испарение в трубе выпарного аппарата с падающей пленкой.
- Рис. 3а Нагревательная камера выпарного аппарата.
- Рис. 4 Одноступенчатый выпарной аппарат. Определение различных удельных величин и соответствующая схема тепловых потоков.
- Рис. 5 Принцип двухступенчатого выпаривания воды.
- Рис. 6 Пароструйный компрессор.
- Рис. 7 Двухкорпусной выпарной аппарат с пароструйным компрессором.
- Рис. 8 Схема тепловых потоков. Двухкорпусной выпарной аппарат с пароструйным компрессором.
- Рис. 9 Моно-термокомпрессия. 7-корпусной выпарной аппарат с термокомпрессором.
- Рис. 10 Поли-термокомпрессия. 7-корпусной выпарной аппарат с термокомпрессором.
- Рис. 11 Одноступенчатый выпарной аппарат с механической компрессией.
- Рис. 12 Схема теплового потока в выпарном аппарате с механической компрессией
- Рис. 13 Рабочий цикл компрессорной машины.
- Рис. 14 Выпарной аппарат с механическим компрессором/ термокомпрессором.
- Рис. 15 Выпарной аппарат с механическим компрессором/ механическим компрессором
- Рис. 16 Рециркуляционный выпарной аппарат с падающей пленкой.
- Рис. 17 Разделенная на две секции нагревательная камера.
- Рис. 17а Сепаратор с тангенциальным входом.
- Рис. 17б Коаксиальный сепаратор.
- Рис. 18 Динамическая система распределения продукта.
- Рис. 19 Статическая система распределения продукта.
- Рис. 20 Спиральные подогреватели.

## NIRO A/S

- Рис. 21 Подогреватели с прямыми трубами.
- Рис. 22 Индекс азота сывороточного белка как функция интенсивности пастеризации, зависимость температуры и времени.
- Рис. 22а % денатурации  $\beta$ -лактоглобулина
- Рис. 23 Образование свободных SH-групп как функция температуры пастеризации.
- Рис. 24 Переключаемые теплообменники поверхностного типа.
- Рис. 25 Последовательные спиральные теплообменники, нагреваемые острым паром и паром, образовавшимся при мгновенном испарении.
- Рис. 26 Система контактной пастеризации с контактным регенеративным подогревателем мгновенного испарения.
- Рис. 26а Оптимальные условия роста бактерий.
- Рис. 26б Сдвоенный подогреватель.
- Рис. 26в Контактная подогревающая камера мгновенного испарения.
- Рис. 27 Смешивающий конденсатор.
- Рис. 28 Поверхностный конденсатор.
- Рис. 29 Градирня.
- Рис. 30 Концентратор и система питания.
- Рис. 31 Регулирование плотности изменением расхода сырья.
- Рис. 32 Регулирование плотности изменением давления или расхода пара.
- Рис. 33 Регулирование плотности подмешиванием пастеризованного молока или конденсата.
- Рис. 34 Регулирование вакуума изменением расхода охлаждающей воды в смешивающем конденсаторе.
- Рис. 35 Регулирование вакуума посредством "системы напуска" в смешивающем конденсаторе.
- Рис. 36 Загустевание во времени как функция температуры (обезжиренное молоко, 48,5 % СВ).
- Рис. 37 Загустевание во времени как функция содержания сухих веществ (обезжиренное молоко, 55 °C).
- Рис. 38 Установка распылительной сушки.
- Рис. 39 Разные типы сушильных камер.

## NIRO A/S

- Рис. 40 Съемные изоляционные панели камер распылительной сушки.
- Рис. 40а Классы фильтров.
- Рис. 41 Поверхностный нагреватель воздуха с мазутной горелкой.
- Рис. 42 Воздухораспределитель в горизонтальной сушильной камере.
- Рис. 43 Потолочный воздухораспределитель с регулируемыми направляющими лопатками.
- Рис. 44 Воздухораспределитель с поршневым воздушным потоком.
- Рис. 45 Система подачи.
- Рис. 46 Теплообменник NIPEX.
- Рис. 47 Скребковый теплообменник.
- Рис. 47а Вязкость концентрата цельного молока как функция давления гомогенизации и содержания сухих веществ в концентрате.
- Рис. 47б NANOVALVE®
- Рис. 48 Форсунка высокого давления “Delavan”.
- Рис. 49 Форсунка высокого давления “Spraying System”.
- Рис. 50 Пневматическая форсунка.
- Рис. 51 Центральный циклон.
- Рис. 52 Циклон.
- Рис. 53 Батарея циклонов с центральным бункером.
- Рис. 54 Роторный затвор с коническим ротором.
- Рис. 55 Критический размер частиц и кривые фракционной эффективности циклона.
- Рис. 56 Рукавный фильтр.
- Рис. 57 Распылительная сушилка с рукавным фильтром.
- Рис. 58 Скруббер гигиенической конструкции.
- Рис. 59 Скруббер с рециркуляцией воды.
- Рис. 59а Скруббер с рециркуляцией воды.
- Рис. 60 SANICIP™
- Рис. 60а Сопло обратной продувки.

## NIRO A/S

- Рис. 61 Пневмоконвейер для предварительного охлаждения порошка.
- Рис. 62 Пневмотранспортная система.
- Рис. 63 Vibro-Fluidizer
- Рис. 64 Перфорированная пластина BUBBLE PLATE™.
- Рис. 65 Панель управления.
- Рис. 66 Электронная архитектура системы управления.
- Рис. 67 Распылительная сушилка традиционной конструкции с пневмотранспортной системой (SDP).
- Рис. 68 Уменьшение массы, объема и диаметра капли при идеальных условиях сушки.
- Рис. 69 Диск с загнутыми лопатками для производства порошка с высокой насыпной плотностью.
- Рис. 70 Диск с обдувом паром.
- Рис. 71 Пенообразующая способность концентрата обезжиренного молока.
- Рис. 72 Изменение температуры.
- Рис. 73 Типичная частица после одноступенчатой сушки.
- Рис. 74 Частица после распылительной сушки. Одноступенчатая сушка.
- Рис. 75 Перегретая частица. Одноступенчатая сушка.
- Рис. 76 Микрофотография сухого обезжиренного молока из установки с пневмотранспортной системой.
- Рис. 77 Vibro-Fluidizer гигиенической конструкции.
- Рис. 77a BUBBLE PLATE™
- Рис. 78 Распылительная сушилка с аппаратом Vibro-Fluidizer для двухступенчатой сушки.
- Рис. 79 Типичная частица после двухступенчатой сушки.
- Рис. 80 Нагнетательная пневмотранспортная система между аппаратом Vibro-Fluidizer и бункерами.
- Рис. 81 Расход энергии на кг испаренной воды как функция остаточной влажности.
- Рис. 82 Перфорированная пластина для направленной подачи воздуха (BUBBLE PLATE™).
- Рис. 83 Компактная распылительная сушилка с пневмотранспортной системой (CDP).

## NIRO A/S

- Рис. 84 Компактная распылительная сушилка с аппаратом Vibro-Fluidizer в качестве агломератора-инстантайзера (CDI).
- Рис. 85 Многоступенчатая распылительная сушилка (MSD).
- Рис. 85а Сушилка с встроенным фильтром.
- Рис. 85б Сопло обратной продувки.
- Рис. 86 Определение типов агломерационных процессов.
- Рис. 86а Спонтанная первичная агломерация.
- Рис. 86б Принудительная первичная агломерация.
- Рис. 86в Спонтанная вторичная агломерация.
- Рис. 86г Принудительная вторичная агломерация.
- Рис. 87 Возврат мелочи в роторный распылитель “старого типа”.
- Рис. 88 Возврат мелочи для принудительной вторичной агломерации в роторном распылителе FRAD.
- Рис. 89 Возврат мелочи для принудительной вторичной агломерации в форсуночном распылителе.
- Рис. 90 Комплектная установка для производства агломерированных продуктов (CDI).
- Рис. 90а Зависимость свойств порошка от структуры агломерата.
- Рис. 90б “Луковичный” агломерат.
- Рис. 90в Структура агломерата “плотный виноград”.
- Рис. 91 Увлажняющий инстантайзер Пиблса.
- Рис. 92 Установка увлажняющей агломерации (Nestle).
- Рис. 93 Система подачи для установки увлажняющей агломерации (смачивание теплой водой, разбрызгиваемой распылителем).
- Рис. 94 Система подачи для установки увлажняющей агломерации. Увлажнение теплым влажным воздухом.
- Рис. 95 Многоцелевая установка увлажняющей агломерации Niro.
- Рис. 96 Подогрев конденсатом.
- Рис. 97 Диаграмма энталпия-влагосодержание для системы воздух-вода (набор адиабат для температуры воды 45 °C).
- Рис. 98 Рекуператор воздух-воздух.

## NIRO A/S

- Рис. 99 Одноступенчатая распылительная сушилка с рекуператором воздух-воздух.
- Рис. 100 Рекуператор воздух-жидкость-воздух.
- Рис. 100а Одноступенчатая распылительная сушилка с рекуператором воздух-жидкость-воздух.
- Рис. 101 Сравнение шкал титруемой кислотности, основанных на расходе щелочи.
- Рис. 102 Лабораторное оборудование для измерения содержания воздуха в концентрате молока.
- Рис. 103 Определение влажности.
- Рис. 104 Определение насыпной плотности порошка.
- Рис. 105 Зависимость насыпной плотности сухого обезжиренного молока от температуры пастеризации (выраженной через индекс азота сывороточного белка).
- Рис. 106 Аппарат для измерения сыпучести.
- Рис. 107 Определение показателя растворимости.
- Рис. 108 Определение пригорелых частиц.
- Рис. 109 Определение поверхностных свободных жиров.
- Рис. 110 Определение смачиваемости.
- Рис. 111 Определение диспергируемости.
- Рис. 112 Определение гигроскопичности.
- Рис. 113 Распылительная сушилка для одноступенчатой сушки (SDP).
- Рис. 114 Распылительная сушилка с аппаратом Vibro-Fluidizer в качестве сушилки второй ступени (SDI).
- Рис. 115 Распылительная сушилка с аппаратом Vibro-Fluidizer в качестве агломератора-инстантизатора (SDI).
- Рис. 116 Агломерация посредством возврата мелочи (принудительная вторичная агломерация).
- Рис. 117 Схема процесса. Получение быстрорастворимого сухого цельного молока.
- Рис. 118 Двухступенчатая установка лецитинизации.
- Рис. 119 Оборудование дозирования лецитина.
- Рис. 120 Комплектная установка для производства быстрорастворимого сухого цельного молока.

## NIRO A/S

- Рис. 121 Различные процессы обработки сыворотки.
- Рис. 122 Консервирование сыворотки формальдегидом и перекисью.
- Рис. 123 коэффициент концентрирования: С как функция массового расхода и производительности по выпаренной влаге.
- Рис. 124 Предварительное концентрирование сыворотки для транспортировки на сушильную установку.
- Рис. 125 Соотношение между содержанием влаги, температурой воздуха, температурой частиц и температурой прилипания.
- Рис. 126 Молекула лактозы в  $\alpha$ - и  $\beta$ -конфигурациях.
- Рис. 127 Мутаротация.
- Рис. 128 Трансформация  $\beta$ -лактозы в  $\alpha$ -форму в течение 1 часа (в % от полной трансформации до достижения равновесия).
- Рис. 129 Растворимость  $\alpha$ - и  $\beta$ -лактозы в воде при различной температуре.
- Рис. 130 Кристаллизаторы сыворотки.
- Рис. 131 Изменение вязкости в процессе кристаллизации концентрата сыворотки.
- Рис. 132 Кристаллизация лактозы как функция времени.
- Рис. 133 Установка в составе выпарного аппарата, двух мгновенных охладителей с кристаллизаторами и компактной сушилки для непрерывного производства частично кристаллизованной сухой сыворотки.
- Рис. 134 Выпарной аппарат, кристаллизаторы и распылительная сушилка с пневмотранспортной системой.
- Рис. 135 Выпарной аппарат, кристаллизаторы и распылительная сушилка с аппаратом Vibro-Fluidizer.
- Рис. 136 Распылительная сушилка с транспортером для вторичной кристаллизации.
- Рис. 137 Производство обогащенного жиром сухого обезжиренного молока.
- Рис. 138 Сушилка со встроенным транспортером FILTERMAT® (FMD).
- Рис. 139 Растворимость готового концентрата сывороточного белка как функция температуры воздуха на выходе из распылительной сушилки.
- Рис. 140 Башенная сушилка для производства сывороточного белка (TFD).
- Рис. 140a Компактная сушилка для пермеата – сухой процесс
- Рис. 140б Башенная сушилка для пермеата - влажный процесс.

Рис. 140в Процесс TIXOTHERM™

Рис. 141 Аппарат с комбинацией псевдоожиженных слоев возвратного смешивания и поршневого типа для сушки лактозы

Рис. 142 Технологическая схема. Ионный обмен.

Рис. 143 Схема установки производства детского питания с влажным смешиванием и концентрированием сырья для сушки.

Рис. 144 Установка сверхвысокотемпературной обработки детского питания.

Рис. 145 Схема установки непрерывного производства Na-казеината.

Рис. 146 Распылительная сушилка заменителей молока для телят (CDI/C).

Рис. 147 Многоступенчатая сушилка для производства сухого цельного молока с высоким содержанием свободных жиров (MSD).

Рис. 148 Сушилка со встроенным транспортером FILTERMAT® (FMD).

# Библиография

---

“Spray Drying”, 5th edition, K. Masters, NIRO A/S

“Analytical Methods for Dry Milk Products”, 4th edition, I. Haugaard Sørensen, J. Krag, J. Pisecky, and V. Westergaard, NIRO A/S

“Avances Tecnológicos en los Procesos de Fabricación de Productos Lácteos en Polvo”, Conferencia FAO Chile 1976, Ing. Vagn Westergaard, NIRO A/S

“Energy Economy in Evaporation and Spray Drying”, Ing. Harald Torsell L.M.C. Vandersborg - Lecture held at Dairy Exhibition, Paris 14th November, 1974

“Baby Food Powder”, I. Haugaard Sørensen, NIRO A/S, Danish Dairy Industry, June 1978

“Bulk Density of Milk Powders”, J. Pisecky, NIRO A/S, Dairy Industries International, February 1978

“The Theory and Practice of Atomization in Spray Drying”, K. Masters, NIRO A/S, Chemical Engineer, Birmingham University, Vol. 17 No. 1, 1966

“Wet Scrubbers - Powder Problems Solved”, J. Krag, H. Hauberg, NIRO A/S, Dairy Industries International, October 1976

“Manufacture of Instant Whole Milk Powder Soluble in Cold Water”, Dr. J. Pisecky, Vagn Westergaard, NIRO A/S, Dairy Industries, March 1972

“Producción de Leche Instantánea en Polvo”, Vagn Westergaard, NIRO A/S, Industrias Lácteas, Julio/Agosto 1978

“Evaporation and Spray Drying in the light of Automation”, NIRO A/S, Scandinavian Galaxy 1968

“Continuous Production of Spray dried Sodium Caseinate”, A. Bergmann, NIRO A/S, Journal of the Society of Dairy Technology, April 1978

“Milk Droplets, their Creation and Drying”, Dr. J. Pisecky, NIRO A/S, World Galaxy, November 1974

“Winter School on Spray Drying”, various authors, Australia

“Structure and Properties of Organic Components”, Noller, Stanford University

“Dairy Microbiology”, E.M. Foster, Etal London, Macmillian & Co. Ltd. 1958

“Elaboración de Leche en Polvo y Productos lácteos”, Ing. N. Parareda, NIRO A/S, Argentina

“Some Aspects of Whey Drying”, I. Haugaard Sørensen, Dr. J. Pisecky, NIRO A/S

“Atomización para Producir Leche en Polvo”, NIRO A/S, 1969

NIRO A/S

“Standards for Grades of Dry Milks”, ADMI Bulletin 916

“Basic Principles of Spray Drying of Milk”, I. Haugaard Shirensen, NIRO A/S, Lecture given at Dairy Exhibition “SALIMA”, 1975

“The Effective Utilization of Energy in the Milk Powder Industry”, Dr. J. Pisecky, NIRO A/S

“Utilization of Whey”, Vagn Westergaard, NIRO A/S, FAO Cheese Production Seminar, Valdivia 1978

“Instant-Vollmilchpulver”, Dr. J. Pisecky, NIRO A/S, Deutsche Molkerei Zeitung 21/78

“Drying of Milk and Milk Products”, sec. edition, Halland Hedrick, Westport, Connecticut. The AVI Publishing Company Inc. 1971

“Condensed Milk and Milk Powder”, seventh edition. Hunziker, published by the author, La Grange, Illinois, 1949

“Energiutnyttjande i Mjolkpulverindustrin”, Dr. J. Pisecky, NIRO A/S. Nordisk Mejeriindustri 4/5-78

“Neuentwicklungen beim Eindampfen von Milch und Milchprodukten”, Dipl.Ing. J. van Loon, Niro Atomizer B.V., Holland. Konserven-Institut Neumünster 4.-6. März 1981

“Concentraciyn por Recompresiyn Mecánica - Comparaciyn con la Tecnologña Clásica”, Mr. Parant Laguilharre, France

“Tecnologña de la Leche en Polvo”, Lic. E Bisgaard and Ing. Vagn Westergaard, NIRO A/S. Simposio Agro-Industrial, Mexico-Dinamarca 26 y 27 Nov. 1981

“The Microprocessor Instrumentation”, Frederik Steensen, NIRO A/S, Danish Dairy Industry Denmark, May 1980

“Nuevos Desarrollos en la Economña Térmica del Proceso de Secado por Atomizaciyn”, Vagn Westergaard, NIRO A/S

Bulletin 45 and 53, Heat Recuperators, NIRO A/S

“Nueva Tecnologña del Suero en Polvo”, Ing. Vagn Westergaard, NIRO A/S. Industrias Lócteas, 1983

“New Generation of Spray dryers for Milk Products”, Dr. J. Pisecky, NIRO A/S. Dairy Industries International, April 1983

“Hygienic Improvements in Evaporators and Spray Dryers”, V. Westergaard, NIRO A/S. European Dairy Magazine, June 1990

“Meeting Powder Specifications through Correct Spray Dryer Design Selection”, Dr. Keith Masters, NIRO A/S

“Processing Plants for the Dairy Industry”, Vagn Westergaard, NIRO A/S

“Impianti di Processo per l’Industria Lattiero-Casearia”, Vagn Westergaard, NIRO A/S

## NIRO A/S

“Spiral Wound Membranes”, Jørgen Wagner, NIRO A/S. Danish Dairy & Food Industry World Wide, 1990

“20 Years of Instant Whole Milk Powders”, Dr. Jan Pisecky, NIRO A/S. Scandinavian Dairy Information

IDF Bulletin Document 133, 1981

IDF Bulletin Document 243, 1984

“Processing and Quality of Foods”, Vol 1. P. Zeuthen, DTH, 1990, Elsevier Science Publishers Ltd., Essex, England

“Omdannelse af Protein og Laktose ved UHT-behandling af Melk”. Studieopgave på KVL Mejeribrugsstudiet. Henrik Bo Andersson og Niels Lange Jørgensen, 1990-91

“Thermal Processing and Quality of Foods”. P. Zeuthen, DTH, Elsevier Science Publishers Ltd., Essex, England

Various Analytical Methods from NZDRI/NZ Dairy Board, New Zealand

“Milcherhitzung und SH-Gruppenentwicklung”, O. Kirchmeier et al. Milchwissenschaft 39 (12), 1989

“Production of Powdered Baby Foods”, I. H. Sørensen, E. Jørgensen, V. Westergaard, NIRO A/S, Scandinavian Dairy Information 4/1992

“Fortschritte beim Agglomerieren während des Sprührochers”, E. Refstrup, NIRO A/S, ZFL/European Food Science 10/1992

“A new generation of CIP-able bag filters”, Vagn Westergaard, Niro A/S, SDI 2/01

“The new Niro Integrated Filter Dryer IFD™”, Vagn Westergaard, Niro A/S, Danish Dairy & Food Industry, September 2002

“Effect of lactose crystallisation on the oxidative stability of infant formula”, M.K. Thomsen, J.C. Knudsen, J. Risbo and L.H. Skibsted, The Royal Veterinary and Agricultural University, Denmark, published in Milchwissenschaft 58 (7/8) 2003

Patent application WO 01/62098 A1 - 30 Aug. 2001







