

# **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 псевдоожиженного 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>7</b>
<b>Выпаривание .....</b>	<b>8</b>
<b><i>Выпарные аппараты с падающей пленкой.....</i></b>	<b>9</b>
Термокомпрессия TVR.....	12
Механическая компрессия MVR.....	15
Сравнение расхода энергии в разных выпарных аппаратах .....	17
Конструкция промышленных выпарных аппаратов.....	19
<b><i>Вспомогательное оборудование выпарных аппаратов.....</i></b>	<b>20</b>
Сепараторы.....	21
• Сепараторы с тангенциальной подачей пара .....	21
• Коаксиальный сепаратор.....	21
Система распределения продукта .....	21
• Динамическая система распределения .....	21
• Статическая система распределения.....	22
Подогреватели .....	22
• Спиральные подогреватели .....	22
• Подогреватели с прямыми трубками .....	23
Оборудование для пастеризации и выдержки .....	23
• Бактериологические требования.....	24
• Классификация сухого обезжиренного молока по термоустойчивости	24
• Сохранение качества цельного молока .....	24
• Термоустойчивое сухое молоко для высокотемпературной обработки	24
• Быстрорастворимое цельное сухое молоко .....	25
Подогревающее оборудование для снижения роста термофильных бактерий .....	26
• Промежуточная чистка .....	27
• Сверхвысокотемпературная обработка.....	27
• Сдвоенная система подогрева.....	27
• Контактный подогрев инъекцией пара.....	27
• Регенерация тепла в контактном подогревателе.....	28
Оборудование для конденсации .....	28
• Смешивающий (прямоточный) конденсатор .....	29
• Поверхностный конденсатор.....	29
Вакуумное оборудование .....	29
• Вакуумный насос.....	30
• Пароструйная вакуумная установка .....	30
Градирни .....	30
Установки высокой концентрации .....	30
Установки мгновенного охлаждения .....	31
Оборудование для водяного уплотнения .....	31
Контрольно-измерительные приборы и автоматика .....	31
• Расход исходного продукта .....	32
• Температура пастеризации .....	32
• Давление острого пара в термокомпрессоре .....	32
• Содержание сухого вещества .....	32

. Вакуум и температура кипения в последнем корпусе.....	33
<b>Свойства сгущенного продукта .....</b>	<b>35</b>
. Обезжиренное молоко .....	36
. Цельное молоко .....	36
. Сыворотка .....	37
<b>Распылительная сушка.....</b>	<b>38</b>
<b>Сушильная камера.....</b>	<b>39</b>
<b>Система нагрева и распределения воздуха.....</b>	<b>40</b>
Фильтрование воздуха .....	40
Система нагрева воздуха .....	41
. Косвенный нагрев .....	41
. Прямой нагрев.....	42
Распределение воздуха .....	43
. С вращающимся воздушным потоком .....	44
. С поршневым воздушным потоком .....	44
<b>Система подачи.....</b>	<b>45</b>
Емкости для подачи.....	45
Водяной бак .....	45
Насос для концентрата.....	46
Система подогрева .....	46
. Пластинчатый теплообменник .....	46
. Теплообменник "труба в трубе" .....	46
. Скребокый теплообменник .....	46
. Прямая инжекция пара (ПИП) .....	47
. Мягкая инжекция пара (МИП).....	47
Фильтр.....	47
Гомогенизатор/насос высокого давления.....	47
Линия подачи .....	48
<b>Распылитель .....</b>	<b>48</b>
Форсуночное распыление.....	49
Пневматическое распыление .....	50
Дисковое распыление.....	51
. Расход жидкости .....	51
. Окружная скорость.....	51
. Вязкость жидкости .....	52
<b>Распыление молочных продуктов в сушилках .....</b>	<b>53</b>
. Форсунки.....	53
. Диски.....	54
<b>Система улавливания порошка.....</b>	<b>54</b>
Циклон.....	54
Рукавные фильтры .....	57
. Рециркуляция с водой .....	58
. Однопроходная система с молоком или сывороткой.....	59

Рукавный фильтр, допускающий безразборную мойку .....	59
• Сравнение различных уловителей порошка .....	61
<b>Система пневмотранспорта и охлаждения.....</b>	<b>62</b>
<b>Досушивание и охлаждение в виброожиженном слое .....</b>	<b>63</b>
<b>Контрольно-измерительные приборы и автоматика .....</b>	<b>64</b>
<b>Технология производства сухого молока.....</b>	<b>66</b>
<b>Одноступенчатая сушка .....</b>	<b>66</b>
• Содержание влаги в готовом порошке .....	68
• Температура и влажность сушильного воздуха .....	68
• Содержание сухих веществ в концентрате .....	69
• Распыление .....	69
• Вязкость концентрата .....	69
<b>Двухступенчатая сушка.....</b>	<b>70</b>
Двухступенчатая сушка в аппарате Vibro-Fluidizer (поршневой поток) 71	
Двухступенчатая сушка со статическим псевдоожиженным слоем (с возвратным смешиванием) .....	76
• Кольцевой виброожиженный слой (сушилки Compact).....	77
• Круговой виброожиженный слой (сушилки MSD).....	80
• Распылительная сушильная установка с встроенными фильтрами и виброожиженными слоями (IFD).....	81
<b>Агломерация.....</b>	<b>83</b>
Агломерация при распылительной сушилке .....	83
• Спонтанная первичная агломерация.....	83
• Принудительная первичная агломерация .....	83
• Спонтанная повторная агломерация .....	83
• Принудительная повторная агломерация .....	84
• Разделение .....	85
• Истирание.....	85
• Классификация .....	85
• Структура агломерата и свойства продукта .....	86
Увлажняющая агломерация .....	87
• Увлажнение .....	87
• Агломерация .....	88
• Повторная сушка.....	89
• Охлаждение .....	90
• Сортировка.....	90
<b>Экономия тепла в линии по производству сухого молока 91</b>	
<b>Подогрев .....</b>	<b>91</b>
Подогрев сушильного воздуха конденсатом .....	91
Подогрев сушильного воздуха вторичным паром из выпарного аппарата .....	92

<b>Рекуперация тепла .....</b>	<b>93</b>
Скруббер .....	93
Рекуператоры.....	94
• Рекуператор воздух-воздух .....	94
• Рекуператор воздух-жидкость-воздух.....	95
<b>Другие способы экономии энергии.....</b>	<b>96</b>
<b>Лабораторные методы контроля молочного сырья, концентрата и сухого продукта .....</b>	<b>98</b>
<b>Качество молочного сырья .....</b>	<b>98</b>
Обезжиренное молоко .....	98
Цельное молоко .....	99
Сладкая сыворотка .....	99
<b>Лабораторный контроль молочного сырья .....</b>	<b>101</b>
Кислотность (рН).....	101
<b>Лабораторный контроль концентрата молока .....</b>	<b>102</b>
Содержание воздуха в концентрате молока.....	102
Растворимость .....	102
Пригорелые частицы .....	103
<b>Лабораторный контроль сухого молока .....</b>	<b>103</b>
Влажность .....	103
Насыпная плотность .....	104
Плотность частиц, абсорбированный воздух .....	105
• Температура пастеризации молока перед выпариванием .....	106
• Количество воздуха в концентрате .....	106
• Пенообразующая способность концентрата .....	106
• Тип распылительного диска или размер форсунки.....	106
• Содержание сухих веществ в концентрате .....	107
• Условия сушки (одно- или двухступенчатый процесс).....	107
Воздух между частицами.....	107
Сыпучесть .....	108

# 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 первопроходцы заложили основу современной индустрии сухого молока, техника развивалась быстро, и современное оборудование, как правило, отличается сложным устройством и использованием изоциренных 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.

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 ( $40-60^\circ$ ) 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 псевдооживленным 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. 80.

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.

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. Трещины 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**

### **Фильтрация воздуха**

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

- Воздух должен подаваться отдельным вентилятором через фильтр грубой очистки в цех, где размещаются вентилятор, фильтр и нагреватель. В этом цеху должно поддерживаться избыточное давление, чтобы в него не проникал нефльтрованный воздух.
- Выбор класса и расположения фильтра зависят от конечной температуры рабочего воздуха следующим образом:
  - Для основного сушильного воздуха, который нагревается выше 120 °С, требуется только грубое фильтрование с эффективностью до 90 %. Фильтр должен располагаться на стороне нагнетания вентилятора.
  - Для вторичного воздуха, который нагревается менее чем до 120 °С или совсем не нагревается, эффективность фильтрации должна составлять 90-95 % и фильтр должен быть установлен после нагревателя (охладителя). В некоторых странах действуют даже более строгие требования – эффективность фильтрации должна



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  $50 \text{ ккал/}^\circ\text{C} \times \text{ч} \times \text{м}^3$  при скорости воздуха  $5 \text{ м/с}$ . 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.

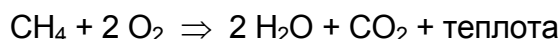
В поверхностных нагревателях, нагреваемых мазутными или газовыми горелками, воздух и продукты горения движутся по разным каналам. Продукты горения проходят через оцинкованные трубы, которые передают тепло воздуху. Камера сгорания выполняется из теплоустойчивой стали. Крышки нагревателя должны быть съемными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

Масляные воздушнонагреватели 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 воздушнонагревателей 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  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Если установка оборудуется воздушнонагревателем с непосредственным нагревом от горелки, необходимо учесть образующийся при сгорании водяной пар ( $44 \text{ мг/кг}$  сухого воздуха/ $^\circ\text{C}$ ), который увеличивает влажность сухого воздуха. Поэтому температуру на выходе нагревателя нужно увеличить для компенсации увеличения содержания влаги и поддержания требуемой относительной влажности.

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



Требуемый для горения кислород поступает из атмосферного воздуха, который содержит 21% O<sub>2</sub> и 79% N<sub>2</sub>.

Поэтому при горении образуется небольшое количество оксидов азота в результате реакции азота и кислорода при повышенной температуре. Образующаяся смесь оксида азота NO и диоксида азота NO<sub>2</sub> обозначается NO<sub>x</sub>.

Нужно заметить, что высокие температуры сгорания, высокая интенсивность теплопередачи, большой избыток воздуха и малое время пребывания в камере сгорания увеличивают образование NO<sub>x</sub>.

Для сравнения ниже приведены приблизительные концентрации NO<sub>x</sub> в различных условиях:

сигаретный дым	4000 ppm
выхлопные газы автомобиля	2000 ppm
перекресток с интенсивным движением	900ppm
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 NO<sub>x</sub> 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 NO<sub>x</sub> абсорбируется сухим молоком.

Содержание NO<sub>x</sub> в сухом молоке зависит не только от способа нагрева рабочего воздуха, но и от корма, который получали коровы, а также от применявшихся удобрений и от почвы, на которой корм произрастал.

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 концентратом. Эта система, однако, затрудняет возврат мелочи, и достижимая 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:

#### ***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 регулируемые 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 °С, 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, встроенная в последнюю нагревательную камеру выпарного аппарата.

## **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 (шестречный 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. Он 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 °С 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 ( $\leq 5$  °С) позволяет работать 20 часов без перерыва на мойку.

### ***Скребокый 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. Скребокый 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 инъекцией пара (ПИП)
- с мягкой инъекцией пара (МИП)

### ***Прямая инъекция 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 инъекция 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 °С.

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.

## **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.

## **Подающая линия**

Подающая 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 ствол 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 сушки. 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.

Итак, главная функция распыления – это:

- создание высокой поверхности капель для обеспечения высокой производительности 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:

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

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

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 сверхзвуковой 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

## 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 лопажки различной формы, предотвращающие скольжение жидкости по его внутренней поверхности. Эти лопажки 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 капле 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 капле с увеличением вязкости становится более широким. Этот эффект иногда используют для увеличения насыпной плотности порошка.

Размер среднего размера капле 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. x фут
- $P$  = плотность жидкости, фунт/фут<sup>3</sup>
- $N$  = частота вращения распылителя, об/мин
- $\mu^1$  = вязкость, фунт/фут x 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 капле. Они приведены только для того, чтобы дать читателю представление о связи между средним диаметром и различными техническими и технологическими параметрами.

# 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.

## **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 экономичность.

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.

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 тангенциально 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
- $V_t$  = 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.

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  $V_t$ ) 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:

- а) предельный диаметр частицы
  - б) фактический размер
  - в) общая эффективность циклона
- 
- а) 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.

Другой способ определения эффективности циклона состоит в простом изменении потерь порошка. Очень небольшая часть выходящего из циклона воздуха пропускается через высокоэффективный 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 высокоэффективном циклоне не должны превышать 0,5 % ( $\approx 250 \text{ мг/м}^3$  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  $10 \text{ мг/м}^3$  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. Собраный 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.

## Скрубберы

Скрубберы 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.

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 каплей 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  $\approx 45$  °С, 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 90-95 °С (для одноступенчатой сушилки), охлаждается до температуры смоченного термометра ( $\approx 45$  °С) за счет испарения воды. См. рис. 59.

Поскольку вода постоянно имеет температуру около 45 °С, 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 °С (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.

Поскольку температура в скруббере благоприятна для бактерий, можно ожидать их рост. 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 конденсатом 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 скрубберы 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 псевдооживленного 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 расположенное 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 псевдооживления 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 псевдооживления скопившегося там порошка. Это обеспечивает равномерную выгрузку порошка из корпуса фильтра. При простое фильтра 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.

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 омывают 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 встряхиваются, 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 3A.
- 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 + рукавный фильтр	Циклон + скруббер	SANICIP™
Выбросы	20-400 мг/м <sup>3</sup>	5-20 мг/м <sup>3</sup>	не более 20 мг/м <sup>3</sup>	5-20 мг/м <sup>3</sup>
Потери давления в вытяжной системе (включая	280 мм вод. ст.	340 мм вод. ст.	340 мм вод. ст.	170 мм вод. ст.

трубы и пр.)				
Вспомогательные средства	нет	сжатый воздух	система циркуляции жидкости	сжатый воздух
Мойка	безразборная мойка	затруднена	безразборная мойка	безразборная мойка
Обработка гигроскопичных продуктов	возможна	затруднена	возможна	возможна *)
Использование отделенного продукта	первый сорт	первый и второй сорт	не рекомендуется	первый сорт
Техническое обслуживание	минимальное	обслуживание системы сжатия воздуха и смена рукавов	минимальное	обслуживание системы сжатия воздуха и смена рукавов
Санитарные условия	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.

Система пневмотранспорта обычно применяется в одноступенчатых распылительных сушилках 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 °С. Температура, до которой требуется охлаждать воздух, зависит от продукта и внешних условий, но обычно близка к 8 °С. 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 °С, 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 (испарением 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 (быстрорастворимое сухое молоко, см. стр. 185), пневмотранспортная система не применима.

## **Двухступенчатая сушка и охлаждение в псевдооживленном слое**

Для повышения экономичности сушки этот процесс делится на две ступени. Первая протекает 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 псевдооживленном слое, см. рис. 63. Сушка в псевдооживленном слое идет очень успешно, поскольку время пребывания в слое достаточно велико, чтобы влага из центра частицы достигла поверхности, где происходит испарение.



Воздух подается в ожижаемый 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 псевдооживленным, 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 оснащается контрольно-измерительными приборами и средствами автоматизации. Система состоит из устанавливаемого по месту оборудования и программируемого логического контроллера (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 псевдооживленного слоя, а также температуру 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 счетчику часов работы можно определить время смены масла. Если распыление выполняется форсунками, необходим манометр для контроля давления сырья. Для управления давлением 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 выполняется автоматически. Это позволяет автоматически пускать и останавливать установку.

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 микропенка 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 устранении 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 перегретого 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 безотносительно 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 непроизводительную трату 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.

# 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.

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.

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. подогреть 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 ( $T_i = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_o = 95 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $\zeta \approx 0,56$ .

Обсуждавшаяся до сих пор технология сушки относилась к установке с системой пневмотранспорта и охлаждения, в которой выгружаемый со дна камеры продукт высушен 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 обладает 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

## 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 псевдооживления порошка, которая в свою очередь определяется свойствами порошка, такими как содержание влаги и термопластичность.

Температура определяется требуемым испарением. Размер отверстий выбирается так, чтобы скорость воздуха обеспечивала псевдооживление порошка на пластине. Скорость воздуха не должна быть слишком большой, чтобы агломераты не разрушались от истирания. Однако невозможно (а иногда и нежелательно) избежать уноса некоторых (особенно мелких) частиц из псевдооживленного 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 псевдооживленным слоем обратного смешивания.

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



В аппарате Vibro-Fluidizer весь псевдооживленный слой вибрирует. Перфорации в пластине сделаны так, чтобы сушильный воздух направлялся вместе с потоком порошка. Для того чтобы перфорированная пластина не вибрировала 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 °С. 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 °С или даже 275 °С 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 оживает. 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 моющего 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.

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 продувочного 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 сушиллки 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.

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.

<b>СИСТЕМА СУШКИ</b>		<b>Распылите льная сушилка с пневмотра нспортной системой</b>	<b>Распылите льная сушилка с аппаратом Vibro- Fluidizer</b>	<b>Распылител ьная сушилка с аппаратом Vibro- Fluidizer при высокой температуре</b>
<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

**СУШКА В ЦЕЛОМ**

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

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:

$$\frac{345}{0,025} = 13800 \text{ ккал/кг}$$

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 псевдоожиженным слоем (с обратным смешением)**

Для улучшения КПД сушки, выражаемого формулой (17), стр. 69, температура воздуха на выходе  $T_0$  при двухступенчатой сушке уменьшена (см. стр. 70) до того уровня, при котором порошок с содержанием влаги 5-7 % становится липким и начинает оседать на стенках камеры.

Однако создание псевдоожиженного 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 °С. Такая утилизация сушильного воздуха позволяет значительно уменьшить размеры установки при той же производительности сушилки.

Сухое молоко всегда считалось трудным для псевдоожижения. Однако пластина специальной запатентованной конструкции, см. рис. 82 и стр. 70, 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 псевдоожижения позволяет создавать статический псевдоожиженный слой для любого выработанного из молока продукта.

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

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

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

Кольцевой псевдооживленный слой обратного смещения 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 псевдооживленного 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 псевдооживленного слоя, перетекая через перегородку регулируемой высоты, таким образом поддерживается определенный уровень псевдооживленного 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 виброоживленном слое, в котором одновременно осуществляется агломерация порошка. В этом случае фракция мелочи возвращается из циклона в распылитель для агломерации. См. рис. 84.

<b>СИСТЕМА СУШКИ</b>		<b>Двухступенчатая сушка в распылительной сушилке с VF</b>	<b>Распылительная сушка с кольцевым псевдооживленным слоем (Compact)</b>	<b>Распылительная сушка с циркуляционным псевдооживленным слоем (MSD)</b>
<b>РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ СУШКА</b>				
Температура воздуха на входе	°С	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
<b>АППАРАТ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ</b>		<b>VF</b>	<b>SFB</b>	<b>SFB</b>
Сушильный воздух	кг/ч	4,290	6,750	11,500
Температура воздуха на входе	°С	100	115	120
Испарение в VF/SFB	кг/ч	45	125	165
Порошок из псевдооживленного 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 псевдооживленном слое	Мкал	115	195	265
<b>СУШКА В ЦЕЛОМ</b>				
Общее энергопотребление	Мкал	2,235	2,325	2,645

	л			
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



### ***Циркуляционный псевдооживленный 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 частицах 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 псевдооживления слоя осевших частиц, а его температура обеспечивает вторую ступень сушки. Воздух, выходящий из этого псевдооживленного 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 псевдооживленный 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 псевдооживленный 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 псевдооживленного слоя. См. рис. 85.

Такую установку можно эксплуатировать при очень высокой температуре воздуха на входе (220-275 °С) 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.

### ***Распылительная сушка с встроенными фильтрами и псевдооживленными 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 псевдооживленный слой представляет собой комбинацию слоя обратного смешения для сушки и слоя поршневого типа для охлаждения. Аппарат с псевдооживленным 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 псевдооживленный 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 отложения порошка на потолке, а при мойке она используется как обычная CIP-форсунка. Камера чистого воздуха очищается стандартной форсункой безразборной мойки.

### 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 сушиллки 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/м<sup>3</sup>.

- Экономия энергии до 15 %
- Меньший уровень шума в связи с меньшим падением давления в вытяжной системе

## **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.

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 псевдооживленный 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 различными 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 псевдооживленного слоя и попадает в Vibro-Fluidizer. При движении вниз вдоль стенок конической части камеры происходит некоторая стабилизация протекающей агломерации. В статическом псевдооживленном слое и в виброкипящем слое порошок контактирует с теплым воздушным потоком, который испаряет избыток влаги, как и в случае двухступенчатой сушки.

### ***Истирание***

это частичное разрушение агломератов в псевдооживленном 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 псевдооживленном 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 псевдооживления и конструкцией перфорированной пластины.

### ***Классификация***

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

По завершении сушки порошок поступает в секцию охлаждения, где охлаждается сначала воздухом, имеющим температуру окружающей среды, а затем охлажденным осушенным 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