



Центральный институт научно-технической  
информации и технико-экономических  
исследований по химическому и нефтяному  
машиностроению

**ХМ-1**

**Химическое**

**и нефтеперерабатывающее**

**машиностроение**

Обзорная информация

ТИПОВЫЕ СУШИЛКИ  
СО ВЗВЕШЕННЫМ  
СЛОЕМ МАТЕРИАЛА

УДК 66.047.096.5(047)

В обзоре приведены описания конструкций, классификация и технико-экономические показатели сушилок со взвешенным слоем материала, разработанных НИИхиммашем в качестве типовых для химической, нефтехимической, микробиологической, химико-фармацевтической и других отраслей промышленности.

Обзор является первым систематическим изложением разработок НИИхиммаша в период 1967–1973 гг.

Обзор предназначен для специалистов, занимающихся выбором, эксплуатацией и разработкой сушильного оборудования.

---

Под редакцией д-ра техн. наук Б.С. Сажина

© ЦИНИТХИМНЕФТЕМАШ. 1975

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО ХИМИЧЕСКОМУ И НЕФТЯНОМУ МАШИНОСТРОЕНИЮ

Обзорная информация

ХИМИЧЕСКОЕ  
И НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЕ  
МАШИНОСТРОЕНИЕ

Серия ХМ-1

Б. С. САЖИН и Е. А. ЧУВПИЛО  
(НИИхиммаш)

ТИПОВЫЕ СУШИЛКИ СО ВЗВЕШЕННЫМ СЛОЕМ  
МАТЕРИАЛА

---

**ВВЕДЕНИЕ**

Задача обеспечения всех производств химической промышленности высокоэффективным сушильным оборудованием с учетом большого ассортимента подлежащих сушке материалов и имеющихся мощностей заводов химического машиностроения может быть успешно решена путем создания типовых сушильных аппаратов, пригодных для сушки большой группы аналогичных по свойствам продуктов. Причем для достижения высоких технико-экономических показателей типовых сушилок необходимым условием является высокая интенсивность тепло- и массообмена, а также их маневренность, т.е. возможность настраивания на режимы, близкие к оптимальным для каждого конкретного продукта. Наиболее полно указанным условиям удовлетворяют аппараты взвешенного слоя с активными гидродинамическими режимами\*. Поэтому уточнение области применения таких аппаратов и разработка их рациональных конструкций имеет

---

\* Сажин Б.С. Современные методы сушки, М., "Знание", 1973.

первостепенное значение. При этом следует исходить из анализа всей гаммы подлежащих сушке продуктов и их классификации.

НИИхиммашем проведено комплексное исследование дисперсных материалов как объектов сушки и на основе их классификации разработаны эффективные типовые аппараты с активными гидродинамическими режимами для каждого класса продуктов. Разработаны также эффективные аппараты для тех групп диспергируемых материалов, где применение взвешенного слоя является целесообразным (сушилки с механическим и пневматическим измельчением, сушка с предварительным распылением форсунками на инертном носителе).

В 1975–1980 гг. номенклатура сушилок со взвешенным слоем, выпускаемых заводами химического машиностроения, будет состоять в основном из представленных ниже типовых аппаратов, что позволит увеличить серийность и добиться максимального обеспечения (при имеющихся мощностях) потребностей химической и смежных с нею отраслей промышленности. Поэтому заказчикам сушилок со взвешенным слоем (заводам, отраслевым исследовательским и проектным организациям и др.) необходимо ориентироваться именно на представленные типовые аппараты и установки.

## **КЛАССИФИКАЦИЯ ТИПОВЫХ АППАРАТОВ СО ВЗВЕШЕННЫМ СЛОЕМ ПО ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ**

Классификация типовых аппаратов и их конструкция обусловлены классификацией материалов как объектов сушки. Каждый из типовых аппаратов рассчитан на определенную область применения, охватывающую значительную (как правило несколько сотен наименований) группу сходных по свойствам высушиваемых материалов.

На основе комплексного анализа дисперсных материалов как объектов сушки установлено, что определяющим показателем, обуславливающим продолжительность сушки ма-

териала в активном гидродинамическом режиме, является внутренняя структура частиц. Разработан метод классификации дисперсных материалов по сорбционно-структурным характеристикам с учетом видов и энергии связи влаги с материалом и его адгезионно-когезионных свойств. В качестве основной характеристики структуры материала принята величина критического радиуса пор\* (т.е. наиболее тонких пор, из которых по технологическим условиям процесса необходимо удалить влагу для получения требуемой остаточной влажности). Разработаны экспресс-методы определения критического радиуса пор исследуемых материалов. Классификация дисперсных материалов в упрощенном виде представлена в табл. 1.

Шифр материала состоит из трех цифр, первая из которых обозначает группу материала, вторая – подгруппу, третья – разряд. Первая и вторая группы не имеют подгрупп, но имеют разряды, причем номер разряда увеличивается по мере возрастания адгезионно-когезионных свойств высушиваемых материалов, затрудняющих получение устойчивых гидродинамических режимов взвешенного слоя. В третью группу входят две подгруппы, различающиеся значениями критического размера пор; в каждой из подгрупп имеется два разряда. К четвертой группе отнесены дисперсные материалы с критическим размером пор менее  $20 \text{ \AA}$ , сушка которых во взвешенном слое связана с относительно длительным временем пребывания материала в сушильной камере.

Для каждой из первых трех групп дисперсных материалов, представленных в табл. 1 (а также для диспергируемых материалов, сушку которых целесообразно проводить во взвешенном слое), разработаны типовые аппараты с активными гидродинамическими режимами, классификация которых по области их применения представлена в табл. 2.

---

\* В данном случае термин "поры" является условным и принят для характеристики меры диффузионного сопротивления системы в процессе сушки, обусловленного структурой материала. Методики определения критического радиуса пор разработаны НИИхиммашем.

Классификация дисперсных материалов как объектов сушки во взвешенном слое


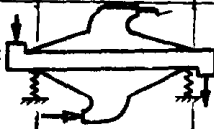


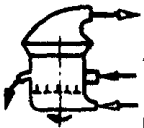
Таблица 1

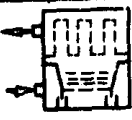

Группа материалов	Шифр	Величина критического радиуса пор, А	Характеристика видов связи влаги с материалом и его структуры	Продолжительность сушки во взвешенном слое	Примеры материалов, относящихся к данной группе				
Первая	1.0.1 1.0.2	Более 1000	Широкопористые материалы со свободной и слабосвязанной влагой	0,5–3 с	Сополимер стирола с дивинилбензолом, полистирол ПСБ, минеральные соли (хлористый калий, кремнефтористый аммоний и т.п.)				
Вторая	2.0.1 2.0.2 2.0.3	От 1000 до 60	Высоковлажные материалы с переходными порами со свободной и связанной влагой	3–30 с	Суспензионный поливинилхлорид, поливинилбутираль, резотропин, нефтенаты алюминия, стеараты				
Третья	3.1.1	До 40	Тонкопористые материалы со свободной и связанной влагой	0,5–2 мин	Сополимер стирола МСН, сополимер поливинилхлорида ВХД-40				
	3.1.2								
	3.2.1 3.2.2	До 20	Микропористые материалы со свободной и связанной влагой	2–15 мин	Поливинилацетат, амилпласты, хлоркаучук, адипиновая кислота				
Четвертая	4.1.1 4.1.2	Менее 20 (диаметр частиц $d_p \leq 1$ мм)	Дисперсные материалы со свободной и связанной влагой, содержащие ультрамикропоры, соизмеримые с размерами молекул удаляемой жидкости	10–20 мин	Полиолефины (полиэтилен, полипропилен, сополимеры), ионообменные смолы (катионитная смола КУ-2-84С, анионитная смола ЭДЭ-10П)				
	4.2.0					Менее 20 (диаметр частиц $1 \text{ мм} \leq d_p \leq 2 \text{ мм}$ )	Крупнодисперсные материалы, содержащие ультрамикропоры	20–60 мин	Полиамидные смолы, полиакрилонитрил и сополимеры
	4.3.0								

Таблица 2

Классификация типовых сушилок со взвешенным слоем материала по области их применения  
(→ поток материала, ↗ поток газа, ↘ смешанные потоки)

Назначение сушилок	Наименование и условное обозначение аппарата	Схема аппарата	Область применения (шифры продуктов по табл. 1)	Характеристика высушиваемых материалов	Примеры высушиваемых материалов	
Сушка дисперсных материалов	первой группы	Циклонная сушилка ЦС		1.0.1	Хорошо сыпучие широкопористые материалы со свободной или слабосвязанной влагой	Блочные полистиролы (ПСБ, ПСБС), сополимер стирола с дивинилбензолом
		Одноступенчатая труба-сушилка ТС-1		1.0.2	Сыпучие широкопористые материалы со свободной или слабосвязанной влагой	Минеральные соли (хлористый калий, кремнефтористый аммоний), фармацевтические препараты
	второй группы	Двухступенчатая труба-сушилка ТС-2		2.0.1	Сыпучие материалы с переходными порами (размером до 80А) со свободной и связанной влагой	Суспензионный поливинилхлорид, фармацевтические препараты
		Комбинированная циклонная сушилка КЦС		2.0.2	Высоковлажные материалы с переходными порами (размером до 60А) со свободной и связанной влагой	Полистиролы ПС-СУ <sub>2</sub> , ПС-С, сополимер МС, сополимер А-15, сополимер формальдегида, резотропин, перборат натрия, сульфиды
	Комбинированная аэрофонтанная сушилка КАС		2.0.3	Высоковлажные материалы с переходными порами (размером до 60А) со свободной и связанной влагой, проявляющие адгезивно-когезионные свойства	Поливинилбутираль, нефтенаты алюминия, стеараты	

Назначение сушилок		Наименование и условное обозначение аппарата	Схема аппарата	Область применения (шифр продуктов по табл. 1)	Характеристика высушиваемых материалов	Примеры высушиваемых материалов
Сушка дисперсных материалов	третьей группы и первой подгруппы 4-й группы	Вихревая сушилка ВС		3.1.1 3.1.2	Тонкокористые дисперсные материалы с порами размером до $40\text{Å}$ , содержащие свободную и связанную влагу	Эмульсионный полистрол, сополимер МСН, сополимер ВХВД-40, пресспорошки, волокнит, витаминные препараты
		Сушилка с виброкипящим слоем ВКС		3.2.1 3.2.2 4.1.1 4.1.2	Плохоожигаемые материалы с порами размером до $10\text{Å}$ , содержащие свободную и связанную влагу (размер частиц менее 1 мм)	Поливинилацетат, адипиновая кислота, хлоркаучук, мелалит, полиолефины (полиэтилен, полипропилен, сополимеры)
Сушка агрегированных материалов		Одноступенчатая труба-сушилка с дезагрегатором ТСИ-1		-	Относительно непрочные агрегаты из широкопористых дисперсных частиц со свободной влагой	Карбоксиметилцеллюлоза, ди-ацетатцеллюлозы, триацетат целлюлозы
		Вихревая сушилка с измельчителем СВИ		-	Прочные агрегаты из широкопористых дисперсных частиц со свободной и связанной влагой	Биошрот, свежескопанный жом, культура плесневого гриба
		Сушилка с кипящим слоем и вращающейся решеткой КСВР		-	Относительно непрочные агрегаты из высоковлажных микропористых частиц дисперсных материалов	Полиакриламиды, полиакрилонитрил, сополимер СП-2

Сушка паст, суспензий и растворов	Сушилка с кипящим слоем периодического действия КСП		-	Комкующиеся материалы, густые пасты с ярко выраженными адгезивно-когезионными свойствами	Материалы малотокиажных производств химических реактивов, анилинокрасочной и химико-фармацевтической промышленности
	Сушилка с фонтанирующим слоем инертного носителя СИИ		-	Суспензии и растворы, а также пасты, поддающиеся диспергированию	Красители и полупродукты анилинокрасочной промышленности

Для второй подгруппы третьей группы, а также для первой подгруппы четвертой группы типовым аппаратом может служить аппарат ВКС. Для других подгрупп четвертой группы применение сушилок со взвешенным слоем экономически нецелесообразно из-за низкого термического к.п.д. сушильных установок.

В последующих разделах данного обзора рассмотрены конструкции, технико-экономические показатели и особенности работы типовых аппаратов, помещенных в табл. 2, а также соответствующие этим аппаратам сушильные установки.

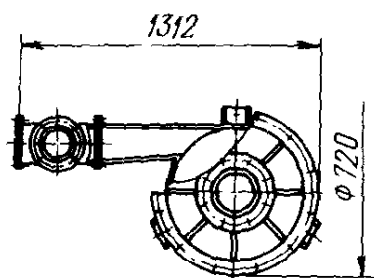
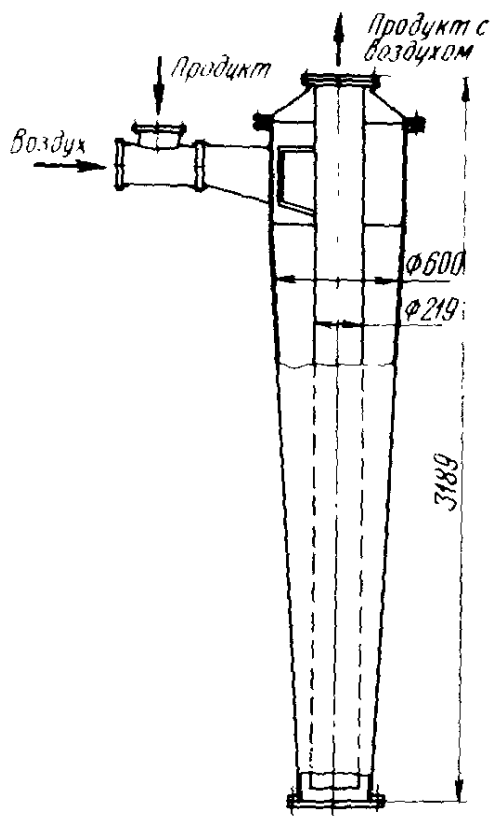
## **ТИПОВЫЕ АППАРАТЫ И УСТАНОВКИ ДЛЯ СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **Сушилки для материалов первой группы**

Сушка таких материалов (при подводе достаточного количества тепла) проходит мгновенно, а тип применяемого аппарата обуславливается, в основном, адгезионно-когезионными свойствами высушиваемого материала. По мере ухудшения сыпучести материалов первой группы (усиления адгезионно-когезионных свойств) для них можно рекомендовать циклонные сушилки ЦС или одноступенчатые трубы-сушилки ТС-1.

Сушилка ЦС-600 (рис. 1, а) представляет собой цилиндро-конический аппарат с тангенциальным вводом газозвеси в верхнюю часть цилиндра, снабженный опущенной почти до дна выводной трубой. Диаметр цилиндрической части 600 мм. Такая конструкция позволяет обеспечить нестационарные условия взаимодействия фаз (следовательно, высокую интенсивность тепло- и массообмена), а также гарантированное время пребывания материала в аппарате (в пределах нескольких секунд), достаточное для высушивания продуктов первой группы.





Установка сушилки ЦС-600 (см. рис. 1, б) комплектуется циклоном СКЦН-34 диаметром 820 мм, циклоном ЦВП-443 с водяной пленкой (конструкции ЛИОТ), двумя вентиляторами ВВД-8у (для подачи и отсоса воздуха), шнековым питателем для подачи продукта и секторным затвором под циклоном для выгрузки продукта. Расход воздуха до 3500 кг/ч при его начальной и конечной температуре соответственно 160 и 70°C. Производительность установки по испаренной влаге до 100 кг/ч. При наличии специальных технологических требований по согласованию с заводом-изготовителем установку можно комплектовать фильтром для предварительной очистки воз-

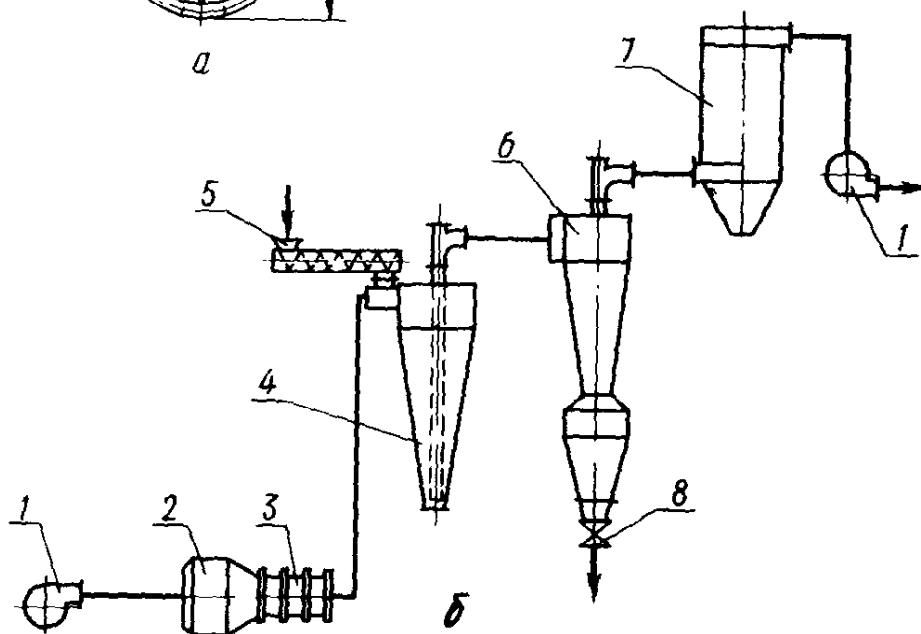


Рис. 1. Циклонная сушилка ЦС-600:

- 1 - вентиляторы; 2 - фильтр; 3 - паровые калориферы; 4 - циклонная сушилка; 5 - шнековый питатель; 6 - циклон СКЦН-34; 7 - циклон ЦВП-443; 8 - секторный затвор

духа. Количество и тип паровых калориферов заказчик определяет в каждом конкретном случае.

Головной образец сушильной установки ЦС-600 изготовлен Бердичевским заводом химического машиностроения "Прогресс" и установлен в производстве суспензионных полистиролов ПСБ и ПСБС на Горловском химическом комбинате.

Циклонные сушилки компактнее труб-сушилок, а эквивалентная длина сушильного тракта у них вследствие нестационарных условий взаимодействия фаз весьма значительна (под эквивалентной длиной понимается длина сушильного тракта такой одноступенчатой трубы-сушилки, у которой эффект сушки аналогичен рассматриваемой циклонной сушилке). Так, эквивалентная длина сушилки ЦС-600 составляет более 40 м, что позволяет осуществлять в циклонных сушилках более глубокую сушку и с большей интенсивностью, чем в одноступенчатых трубах-сушилках.

Недостатком циклонных сушилок является то, что их можно успешно применять только для хорошо сыпучих материалов, не обладающих заметными когезионно-адгезионными свойствами. Материалы, проявляющие адгезионно-когезионные свойства (шифр 1.0.2 по табл. 1), могут налипать на внутреннюю поверхность циклонной камеры, чему способствует центробежное поле, создаваемое закрученным потоком газозвеси. Для таких материалов целесообразно применение труб-сушилок, в которых отсутствует центробежное поле. Примерами подобных материалов могут служить различные минеральные соли.

НИИхиммашем разработано два типоразмера сушилок ТС-1, главным образом, для минеральных солей: ТС-1-375 для малотоннажных производств и ТС-1-1200 для многотоннажных производств.

Разработанные НИИхиммашем трубы-сушилки являются аппаратами с активными гидродинамическими режимами. Необходимо отметить, что трубы-сушилки можно отнести к аппаратам с активными гидродинамическими режимами только при обеспечении условий нестационарного взаимодействия фаз по всему сушильному тракту. Работами последних лет установлено, что в длинных трубах нестациона-

нарные условия взаимодействия фаз существуют только на разгонном участке, поэтому рационально конструировать трубы-сушилки переменного по высоте диаметра (например, с расширителями) с использованием эффектов закручивания потоков, фонтанирования и т.п., а прямолинейные участки постоянного диаметра, как правило, не должны превышать по длине разгонные участки. При разработке конструкций труб-сушилок был также использован большой опыт ведущих зарубежных фирм, выпускающих трубы-сушилки самых разнообразных конструкций [1].

Установка трубы-сушилки ТС-1-375 (рис. 2) состоит из трубы-сушилки диаметром 375 мм и высотой 12 м с расширителем диаметром 600 мм, двухшнекового питателя,

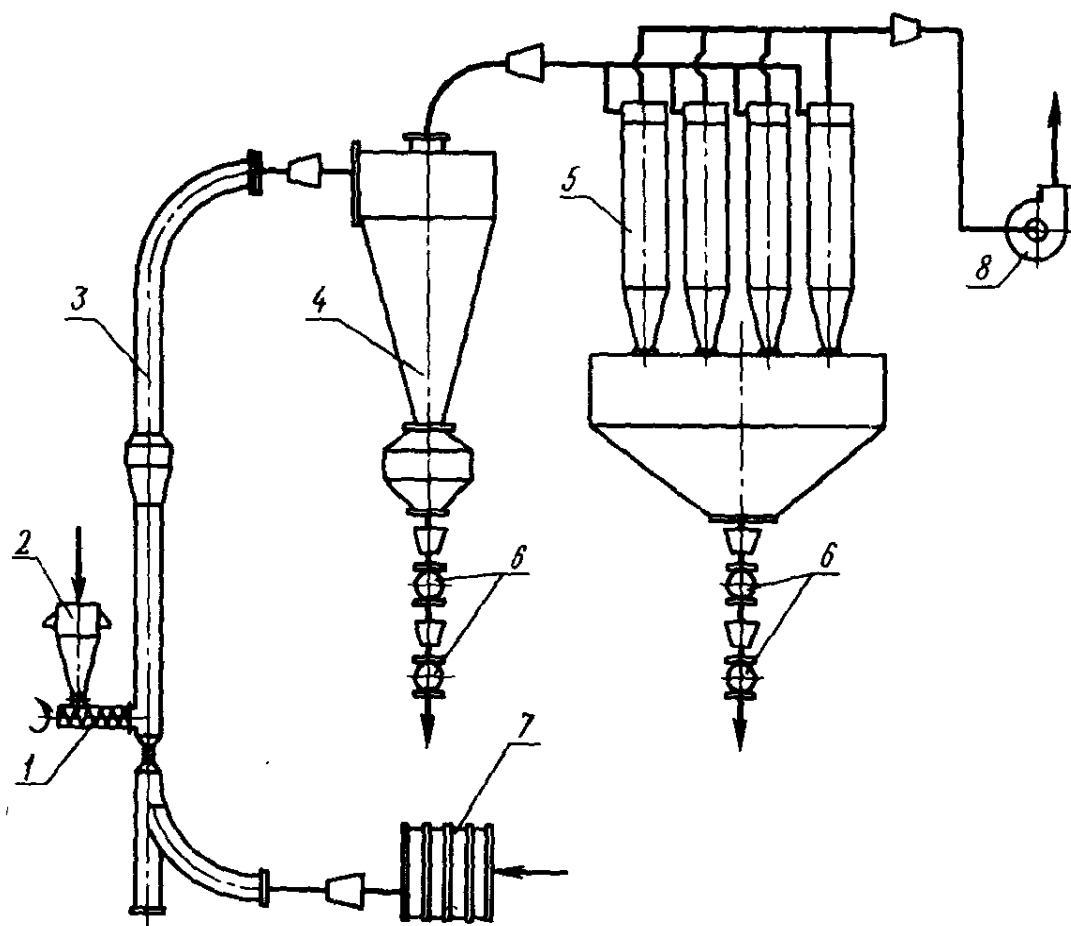


Рис. 2. Установка трубы-сушилки ТС-1-375:

1 - питатель; 2 - бункер с ворошителем; 3 - труба-сушилка; 4 - циклон СКЦН-34; 5 - циклоны ЦН-11; 6 - секторный затвор; 7 - калориферы; 8 - вентилятор

бункера с ворошителем, циклона СКЦН-34 диаметром 1500 мм, группы из четырех циклонов ЦН-11 диаметром 630 мм, секторных затворов ПШ-250 РК (по два под каждым из циклонов для исключения подсосов), четырех калориферов КФБ-9 и хвостового вентилятора ВВД-11у.

Установка разработана применительно к сушке кремнефтористого аммония на производительность до 2 т/ч по сухому продукту. Расход воздуха 8000 м<sup>3</sup>/ч, обеспечивается его нагрев до 160°С. Производительность по испаренной влаге до 250 кг/ч. Детали, соприкасающиеся с продуктом, изготовлены из нержавеющей стали. Система КИП и А, входящая в комплект установки, предназначена для некатегорийных помещений.

Установка трубы-сушилки ТС-1-1200 (рис. 3) предназначена для сушки термостойких солей. Применительно к производству хлористого калия производительность установки по сухому продукту 200 т/ч, по испаренной влаге 10000 кг/ч.

Труба-сушилка диаметром 1200 мм снабжена штуцером для ввода дымовых газов из топки. Участок трубы, непосредственно примыкающий к топке, футерован с целью предохранения трубы от прогорания. Топка откатная. На длине трубы от гидрозатвора до места ввода продукта, т.е. на участке с наиболее высокой температурой теплоносителя (~900°С), труба имеет рубашку с воздушным охлаждением. Воздух из рубашки используется при подаче продукта в трубу-сушилку.

Исходный продукт из бункеров объемом 60 м<sup>3</sup> трехшнековыми дозаторами подается в центробежные питатели-забрасыватели, установленные на диаметрально противоположных сторонах трубы-сушилки. Вместо центробежных питателей можно использовать пневматические забрасыватели.

Продукт вместе с агентом сушки - дымовыми газами - из трубы-сушилки поступает в загрузочную камеру, назначение которой отсепарировать продукт и снизить его температуру с 90 до 60°С. Влажность продукта, поступающего в камеру, менее 0,5%, на выходе из камеры влажность около 1%. Хладагентом является подмешиваемый к высу-

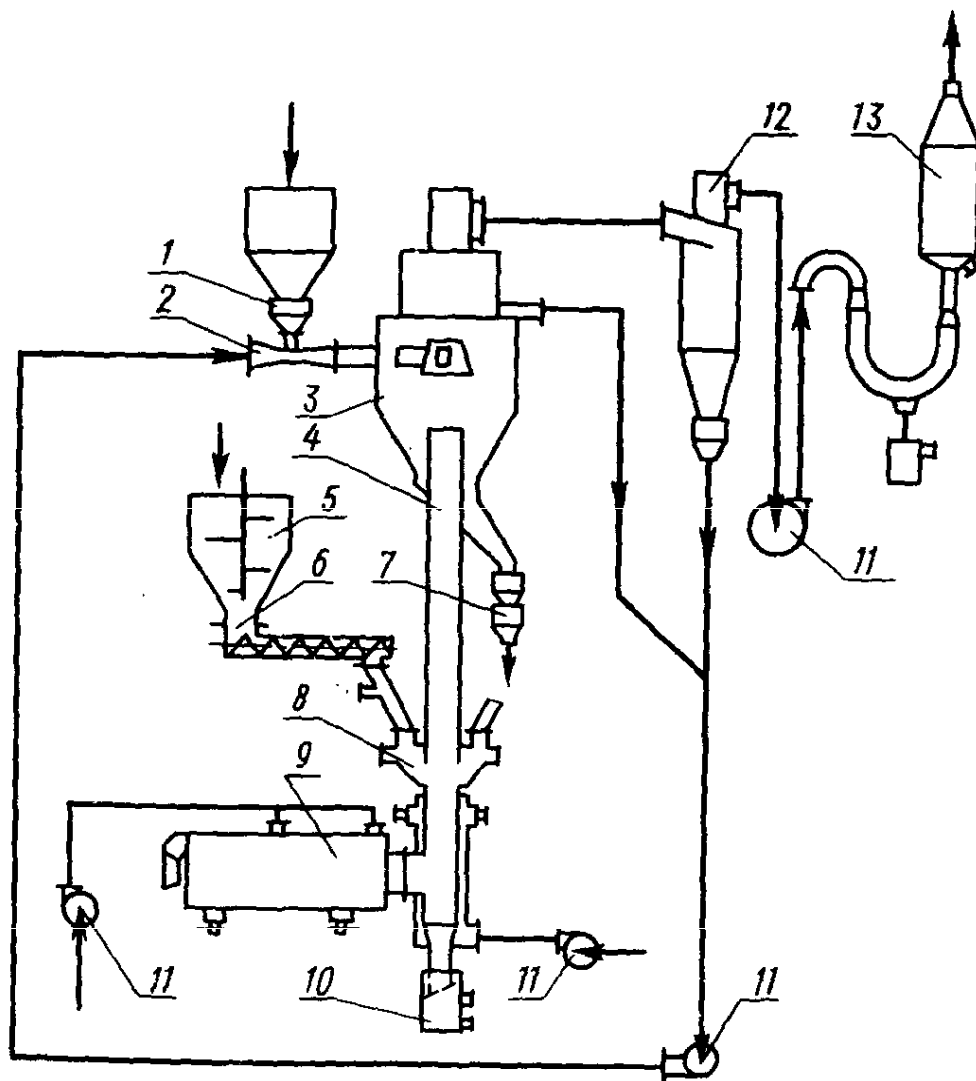


Рис. 3. Установка трубы-сушилки ТС-1-1200:

1 - виброактиватор; 2 - эжектор; 3 - разгрузочная камера; 4 - труба-сушилка; 5 - бункер исходного продукта; 6 - шиковый дозатор; 7 - двойной затвор; 8 - центробежный питатель; 9 - топка; 10 - гидрозатвор; 11 - вентиляторы; 12 - циклон; 13 - мокрый пылеуловитель.

шенному исходный продукт, который вводится в разгрузочную камеру через дополнительный бункер с виброактиватором и эжектор.

Из разгрузочной камеры продукт выгружается двумя потоками через двойные затворы. Теплоноситель очищается в циклоне диаметром 2400 мм и в мокром пылеуловителе МПР-75.

При разработке трубы-сушилки ТС-1-1200 в значительной мере использован опыт эксплуатации труб-сушилок большой единичной мощности, накопленный в угольной и

других отраслях промышленности (в частности, опыт ИОТТ и связанных с ним предприятий). В горнохимической промышленности накоплен опыт эксплуатации сушилок с кипящим слоем большой производительности для солевых продуктов. Этот опыт показывает, что сушить в кипящем слое солевые продукты можно успешно только в случае квалифицированного монтажа и обслуживания сушильной установки. При этом необходима высокая стабильность сыпучих свойств исходного продукта, что не всегда соблюдается. Поэтому в последнее время выяснена необходимость разработки типовой трубы-сушилки большой единичной производительности для сушки солевых продуктов.

Рассмотренная установка трубы-сушилки ТС-1-1200, разработанная для производств хлористого калия, пригодна для многотоннажных производств материалов первой группы. Эту трубу-сушилку, например, можно применять для сушки двойного суперфосфата, полученного по технологии, при которой на сушку подается двойной суперфосфат влажностью 12-15%.

### Сушилки для материалов второй группы

Для материалов второй группы (широкопористые материалы со свободной и связанной влагой с критическим размером пор от 1000 до 60 Å) по мере увеличения их адгезионно-когезионных свойств рекомендуются типовые сушилки ТС-2, КЦС и КАС.

Установка трубы-сушилки ТС-2-600. НИИхиммашем разработана установка трубы-сушилки ТС-2-600\* (рис. 4) для относительно сыпучих материалов второй группы типа суспензионного поливинилхлорида (ПВХ). Каждая из ступеней установки имеет самостоятельную систему подогрева, подачи и очистки теплоносителя. На первой ступени на сушку подается влажный продукт после центрифуг, а на второй – подсушенный продукт после первой ступени. Установка может работать с выбросом очищенного теплоно-

---

\* Авт. свид. № 245664.

сителя в атмосферу после каждой ступени или с возвратом теплоносителя после сухой пылеочистки второй ступени в нижнюю часть трубы-сушилки первой ступени.

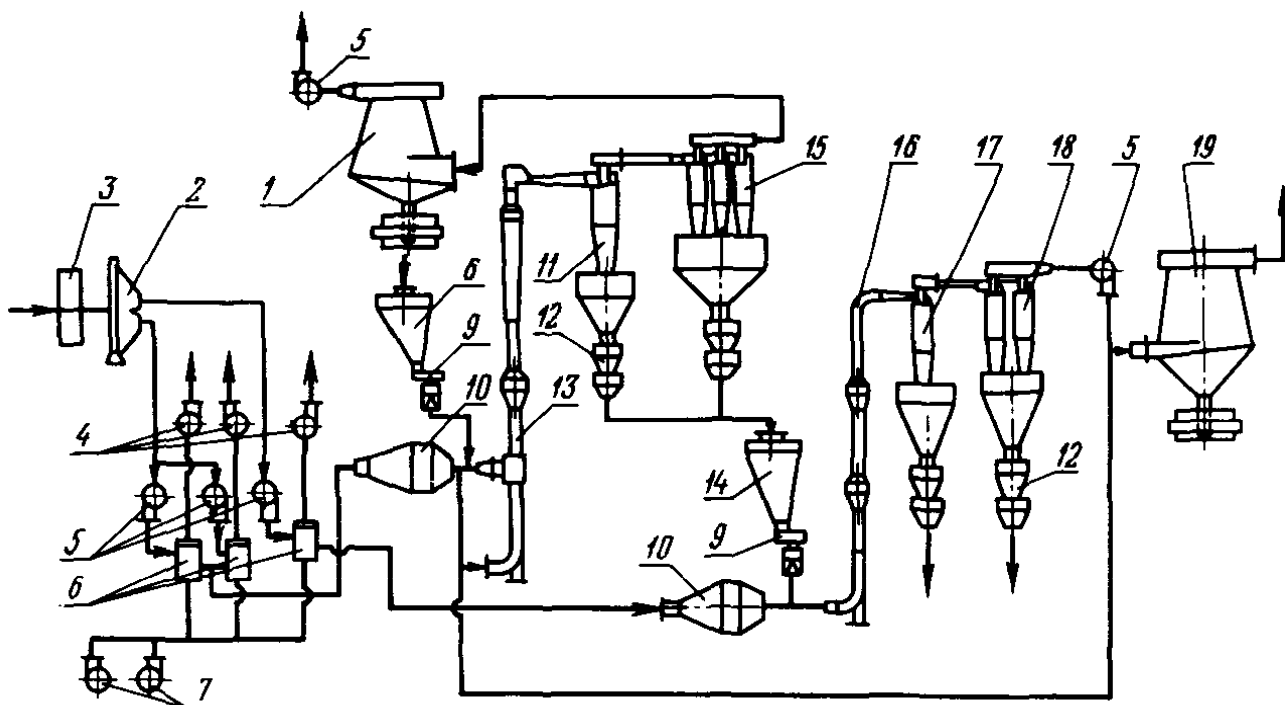


Рис. 4. Установка двухступенчатой трубы-сушилки ТС-2-600:

1 - циклон-промыватель СИОТ П5Ф006; 2 - масляный фильтр; 3 - паровые калориферы; 4 - дымососы Д-8; 5 - вентиляторы ВВД-11; 6 - воздухоподогреватель; 7 - вентиляторы ЦП7-40 № 8; 8 - бункер исходного продукта; 9 - тарельчатый питатель; 10 - фильтр; 11 - циклон ЦН-15 диаметром 1410 мм; 12 - двойные затворы; 13 - труба-сушилка 1 ступени; 14 - бункер подсушенного продукта; 15 - циклоны ЦН-15 диаметром 550 мм; 16 - труба-сушилка II ступени; 17 - циклон ЦН-15 диаметром 900 мм; 18 - циклоны ЦН-15 диаметром 400 мм; 19 - циклон-промыватель СИОТ П3Ф006

Труба-сушилка первой ступени диаметром 600 мм имеет смесительную камеру диаметром 900 мм с тангенциальным подводом газозвеси и охлаждающей рубашкой для предотвращения налипания продукта на горячие стенки. Длина трубы-сушилки от места ввода продукта с теплоносителем около 17 м. На этой длине труба имеет расширитель диаметром 1000 мм, аэрофонтанную камеру диаметром 1200 мм для создания условий нестационарного процесса, а также компенсатор. Ввод в циклон через колено или поворотную головку.

Влажный материал из бункера для исходного продукта тарельчатым питателем ПТ400ПВК подается в эжектор на входе в смесительную камеру трубы-сушилки первой ступени. Теплоноситель очищается от продукта последовательно в циклоне ЦН-15 диаметром 1410 мм и в группе из шести циклонов ЦН-15 диаметром 550 мм. Продукт через двойные пылевые затворы с электроприводом поступает в бункер для подсушенного продукта второй ступени, а отработанный теплоноситель вентилятором ВВД-11у подается в аппарат мокрой очистки - циклон-промыватель СИОТ Ц5Ф006, после которого выбрасывается в атмосферу.

Из бункера второй ступени подсушенный продукт тарельчатым питателем ПТ400ПВК подается в эжекторное устройство на входе в трубу-сушилку II ступени. Труба-сушилка II ступени диаметром 600 мм высотой около 12 м имеет два расширителя диаметром 1000 мм.

Теплоноситель очищается после трубы-сушилки II ступени последовательно в циклоне ЦН-15 диаметром 900 мм и в группе из четырех циклонов ЦН-15 диаметром 400 мм и вентилятором ВВД-11у подается либо на мокрую очистку в циклон-промыватель СИОТ Ц3Ф006, либо на вход трубы-сушилки I ступени. Готовый продукт из циклонов 17 и 18 выгружается двойными пылевыми затворами.

Система подготовки и нагрева теплоносителя для I и II ступеней состоит из двух паровых калориферов КФБ-9, масляного самоочищающегося фильтра КМД 4006, кожухотрубчатых воздухоподогревателей с топками, вентиляторов ВВД-11у и дымососов ДВ на подаче воздуха в топку и выбросе дымовых газов. Вентиляторы ВВД-11у обеспечивают подачу воздуха из масляного фильтра в воздухоподогреватели и далее через фильтры для очистки воздуха в сушилку.

Установка обеспечивает нагрев воздуха, подаваемого в I ступень, до 300<sup>0</sup>С, во II - до 150<sup>0</sup>С. Производительность установки по сухому ПВХ до 3000 кг/ч, по испаренной влаге - до 1000 кг/ч. Количество воздуха в I ступени до 12000 кг/ч (без учета возврата воздуха после II ступени), во II ступени - 6500 кг/ч. Установленная мощность электродвигателей 70 квт.



Установка предназначена для помещений класса В1а (по ПУЭ).

Система КИП и А обеспечивает контроль, запись и регулирование необходимых параметров и систему блокировок, гарантирующих соблюдение правил техники безопасности и надежность работы установки при сохранении заданных технико-экономических показателей.

Сушилки типа КЦС и КАС. Материалы второй группы, содержащие свободную и связанную влагу, часто имеют высокое начальное влагосодержание и ярко выраженные адгезионно-когезионные свойства. В таких случаях применение двухступенчатых труб-сушилок невозможно, хотя раздельное удаление свободной и связанной влаги (как это сделано, например, в двухступенчатой трубе-сушилке ТС-2-600) при сушке высоковлажных материалов второй группы особенно целесообразно. Первая ступень сушки при этом должна обеспечивать дезагрегацию слипающихся и комкующихся материалов. Это достигается в цилиндрическом аппарате с быстроходной мешалкой при повышенных скоростях воздуха с целью выноса подсушенного продукта в режиме пневмотранспорта во вторую ступень — камеру досушки. Такая конструкция аппарата является первой ступенью (подсушивателем) комбинированных циклонных КЦС и аэрофонтанных КАС сушилок.

Таким образом, в нижней части подсушителя образуется интенсивно "кипящий" слой (иногда его называют вихревым кипением), а в верхней — пневмотранспорт дезагрегированного при помощи быстроходной мешалки продукта. Благодаря повышенным скоростям воздуха (скорость воздуха в сечении подсушителя даже в верхней его части выше скорости витания частиц подсушенного продукта с влажностью, близкой к максимальной гигроскопической) и высокой влажности материала влагосъем в подсушивателе (особенно в нижней его части) очень велик и достигает  $1000 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{ч}$ . Из изложенного ясно, что подсушиватель имеет весьма существенные отличия по гидродинамическому режиму работы от аппаратов с классическим кипящим слоем.

Вторая ступень комбинированных циклонных сушилок представляет собой циклонную камеру (аппарат ЦС), а комбинированных аэрофонтанных сушилок – аэрофонтанную камеру (аппарат АС).

Если продукт при максимальной гигроскопической влаге (т.е. после подсушивателя) приобретает сыпучие свойства, его досушку целесообразно проводить в циклонной камере (при сушке широкопористых продуктов второй технологической группы дисперсных материалов, для удаления связанной влаги из которых требуется всего несколько секунд сушки в активном гидродинамическом режиме). Большое количество таких высоковлажных широкопористых продуктов обусловило принятие в качестве типового аппарата сушилки КЦС.

Таким образом, область применения сушилки КЦС – это продукты второй группы с шифром 2.02 (см. табл. 1). Разумеется, сушилку КЦС можно применять и для более сыпучих продуктов второй группы с шифром 2.01, а также для продуктов первой группы, но для таких продуктов экономически целесообразно использование более простых аппаратов (например, второй ступени КЦС в виде типового аппарата ЦС или трубы-сушилки ТС-1 и ТС-2). Для высоковлажных материалов первой группы с ярко выраженными адгезионно-когезионными свойствами можно использовать в качестве самостоятельного аппарата подсушиватель сушилки КЦС. Так как подобных продуктов сравнительно немного, подсушиватель сушилок КЦС и КАС не включен в число типовых аппаратов, однако он может быть по требованию заказчика изготовлен и поставлен заводом-изготовителем отдельно.

Значительная часть высоковлажных дисперсных материалов второй группы (нафтенаты алюминия, стеараты, некоторые ацетали, например, поливинилбутираль и др.) не теряет полностью своих адгезионно-когезионных свойств после удаления свободной влаги (т.е. после достижения максимального гигроскопического влагосодержания), что обуславливается, в основном, большим массосодержанием влаги макрокапилляров. Циклонную камеру для досушки таких продуктов применять нецелесообразно, так как не ис-

ключено налипание продуктов на стенки. Правильнее использовать аэрофонтанную камеру, тем более что при досушке таких дисперсных материалов наблюдается уменьшение скорости витания частиц. В целом для рассматриваемых материалов следует применять типовую сушилку КАС (рис. 5).

Таким образом, область применения типовых сушилок КАС — материалы второй группы с шифром 2.03 по классификационной табл. 1. Необходимо отметить, что и аэрофонтанную камеру сушилки КАС можно поставлять в виде самостоятельного аппарата, пригодного для сушки продуктов первой группы с явно выраженными адгезионно-когезионными свойствами. Следовательно, для сушки продуктов первой группы кроме специальных типовых аппаратов ЦС и ТС-1 можно также использовать обе ступени сушилки КАС. По мере возрастания адгезионно-когезионных свойств обрабатываемых материалов все указанные аппараты будут располагаться в следующем порядке: ЦС, ТС-1, АС, подсушиватель КЦС или КАС.

В настоящее время аппараты КЦС и КАС нормализованы, на базе этих аппаратов разработаны типовые установки, основные характеристики которых приведены в табл. 3.

Производительность по испаренной влаге установок, представленных в таблице, рассчитана из условий температуры поступающего воздуха  $160^{\circ}\text{C}$  и отходящего  $70^{\circ}\text{C}$ . В зависимости от требуемого температурного режима установки комплектуют паровыми калориферами, обеспечивающими температуру подаваемого воздуха до  $160^{\circ}\text{C}$ , кожухотрубчатыми теплообменниками, обеспечивающими более высокую

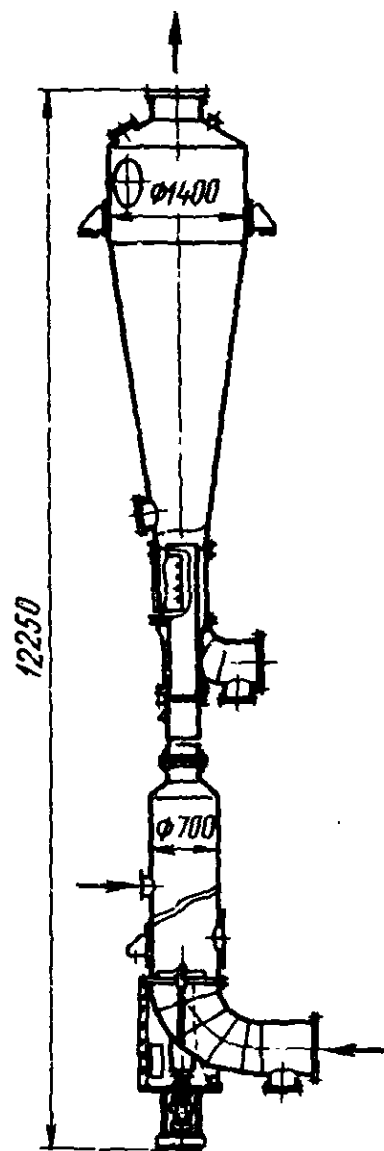


Рис. 5. Комбинированная аэрофонтанная сушилка КАС-1400

Таблица 3

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВЫХ УСТАНОВОК КЦС И КАС

Типраз- мер уста- новки	Расход воздуха, кг/ч		Количество		Размеры, мм			Комплектующее оборудование				Тип вектллатора			
			общий	в под- суши- ватель	подво- дного тепла, ккал/ч	испа- ряемой влаги, кг/ч	сушилки		подсушивателя		Тип шклона		Тип мак- рого вы- леулова- теля	Тип платтели	
							ди- метр D	об- щая высота H	ди- метр D <sub>д</sub>	ра- бочая высота H <sub>п</sub>	I ступени				II ступени
КЦС-300	600	300	13000	15	300	1500	150	800	ЦН-15 Ø 350	-	Ротоклон	Шлюзовый	ВД-2 (2 шт.); ВД-6		
КЦС-500	2500	1250	54000	55	500	2500	273	1000	ЦН-15 Ø 450	-	ЛИОТ ЦВП-443	Шнек Ø 120	ВВД-8; ВД-4		
КЦС-600	3000	1500	65000	70	600	3000	300	1200	ЦН-15 Ø 550	ЦН-15 Ø 500	-	Шлюзовый	ВД-5 (2 шт.); БК-6		
КЦС-800	5000	3000	110000	120	800	4000	400	1800	СКЦН-34 Ø 800 (2 шт.)	СКЦН-34 Ø 770 (2 шт.)	ЛИОТ ЦВП-443	Шнек Ø 120	ВВД-8 (2 шт.); ВВД-9		
КЦС-1000	11000	3500	240000	250	1000	5000	500	2000	СКЦН-34 Ø 1500	ЦН-11 Ø 630 (группа из 4)	Центро- бежный скруббер ВТИ ЦС-8 Ø 800	Двухшне- ковый	ВВД-8 (2 шт.); ВВД-11		
КАС-300	600	300	13000	15	300	1500	150	600	ЦН-15 Ø 250	-	Ротоклон	Шлюзовый	ВД-2 (2 шт.); ВД-5		
КАС-1100	6000	3500	130000	150	1100	4500	500	2000	ЦН-15 Ø 400 (группа из 4)	-	Мокрый пылеуго- витель МЧ-4	Шнек Ø 120	ВВД-8; ВД-4; ВВД-8		
КАС-1400	15000	8000	320000	350	1400	5600	700	2800	СКЦН-34 Ø 2000	СКЦН-34 Ø 1800	Центро- бежный скруббер ВТИ Ø 1000	Шнек	ВВД-9 (2 шт.); ВВД-11		

температуру подаваемого воздуха, или топками. Так, по требованию одного из заказчиков, в комплект поставки установки КАС-1400 включена топка, обеспечивающая заданную температуру подаваемого в сушилку газа ( $500^{\circ}\text{C}$ ). Это позволило в 4 раза увеличить производительность установки по испаренной влаге по сравнению с указанной в табл. 3.

Основными аппаратами установки КЦС-1000 (рис. 6) являются подсушиватель с мешалкой и циклонная сушилка.

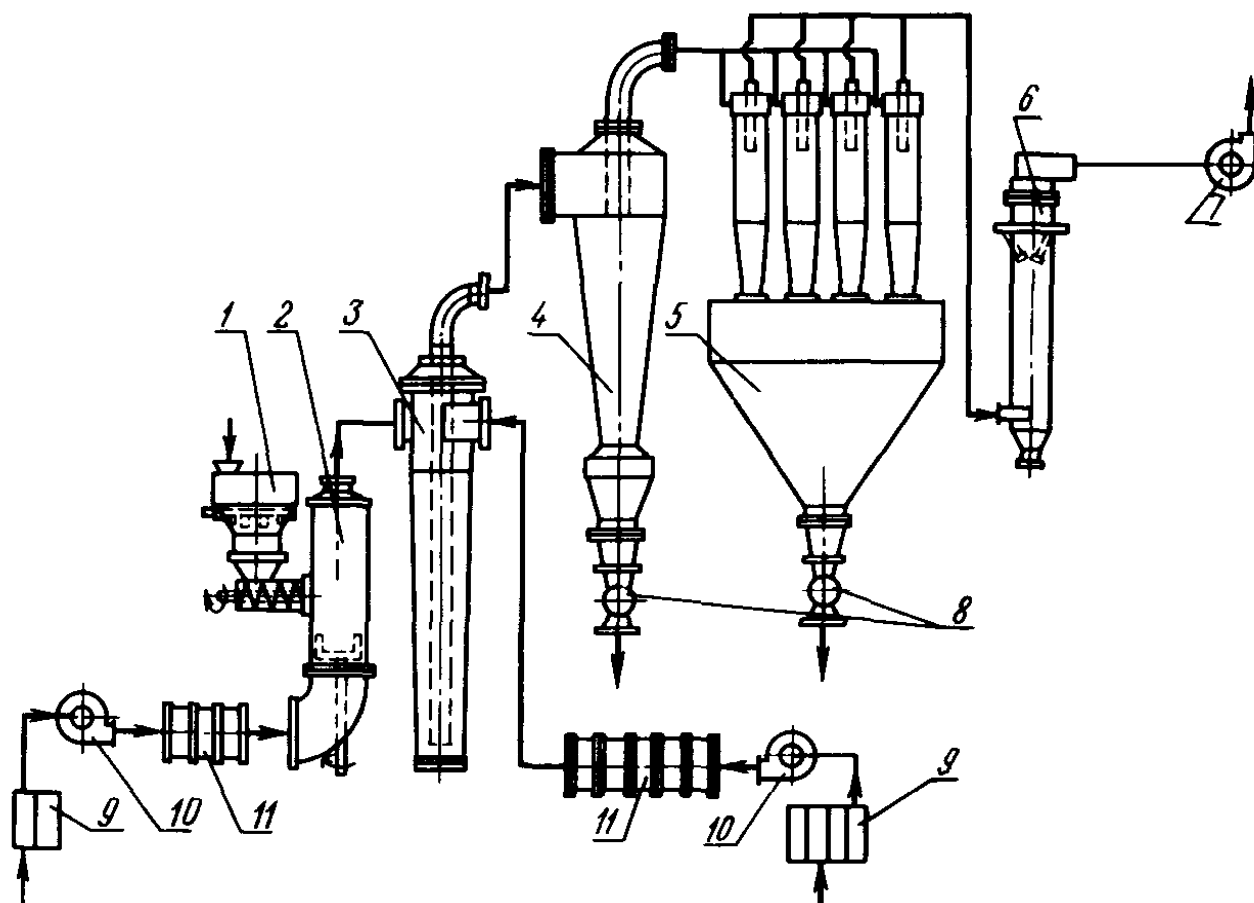


Рис. 6. Установка комбинированной циклонной сушилки КЦС-1000:

- 1 - бункер с винтовым питателем; 2 - подсушиватель; 3 - циклонная сушилка;
- 4 - циклон СКЦН-34; 5 - циклоны ЦН-11; 6 - центробежный скруббер ЦС-8; 7 - вентилятор ВВД-11у; 8 - секторный затвор; 9 - фильтр; 10 - вентилятор ВВД-8у;
- 11 - паровые калориферы КФСО-4

Влажный материал из бункера с ворошителем двухшнековым питателем загружается в подсушиватель, под решетку которого вентилятором ВВД-8у подается воздух, нагретый в паровых калориферах. Подсушенный материал потоком

первичного воздуха выносятся из подсушителя и вместе со вторичным воздухом, подаваемым вентилятором ВВД-8у и нагретым в паровых калориферах, поступает в циклонную сушилку, в которой досушивается в нестационарном гидродинамическом режиме. Высушенный продукт выносятся с теплоносителем в циклон СКЦН-34 диаметром 1500 мм.

Отработанный теплоноситель очищается в группе из четырех циклонов ЦН-11 диаметром 630 мм и мокром центробежном скруббере ЦС-8. На выбросе воздуха из установки установлен вентилятор ВВД-11. Продукт выгружается из циклонов 4 и 5 через секторные затворы.

Установка поставляется комплектно с КИП и А и предназначена для некатегорийных помещений (остальные типоразмеры сушилок КЦС и соответствующих им установок разработаны во взрывозащищенном исполнении и предназначены для помещений класса ВII-а).

Установка комбинированной аэрофонтанной сушилки КАС-1100 (рис. 7) во многом сходна с установкой КЦС-1000 (см. рис. 6). Основными аппаратами являются подсушитель, аналогичный по конструкции подсушителю в КЦС (см. табл. 3), и аэрофонтанная сушилка диаметром 1100 мм. Принцип подготовки теплоносителя и подачи его в подсушитель и аэрофонтанную камеру также аналогичен.

Материал в подсушитель подается одношнековым питателем, улавливание высушенного продукта и пылеочистка теплоносителя осуществляются в группе из четырех циклонов диаметром 550 мм и мокром пылеуловителе - ротоклоне. Первоначальная разработка установки применительно к сушке оптически чистого поливинилбутираля обусловила наличие дополнительных фильтров - масляного и бумажного для предварительной очистки воздуха, подаваемого в установку. При отсутствии специальных требований к чистоте продукта фильтры из объема поставки можно исключить.

Установка оснащена системой КИП и А, предназначенной для помещений класса ВIi-а.

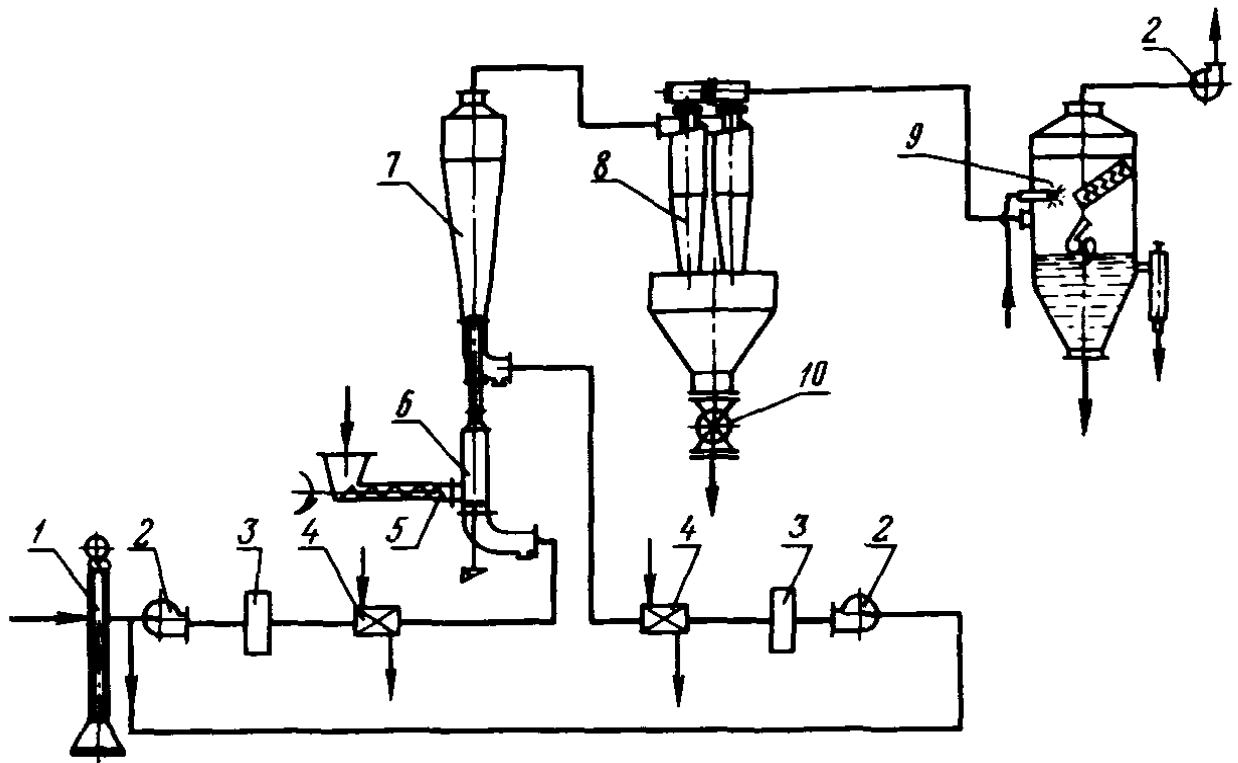


Рис. 7. Установка комбинированной аэрофонтанной сушилки КАС-1100:  
 1 - масляный фильтр; 2 - вентиляторы; 3 - бумажные фильтры; 4 - калориферы;  
 5 - винтовой питатель; 6 - подсушиватель с мешалкой; 7 - аэрофонтанная сушилка;  
 8 - циклоны; 9 - ротоклон; 10 - секторный затвор

Сушилки КЦС и КАС хорошо проявили себя в промышленной эксплуатации. В производствах ряда красителей и полупродуктов имеется опыт промышленной эксплуатации сушилок КЦС-500, КЦС-600, КАС-1100. В производстве полимерных материалов работают сушилки КАС-1100, КЦС-600 и КЦС-800. В химико-фармацевтической промышленности успешно эксплуатируются сушилки КЦС-400. Так, на химико-фармацевтическом заводе им. Семашко сушка всех продуктов, кроме сульгина, производится в сушилках КЦС-400, заменивших полочные сушилки (в производстве сульгина устанавливается опытно-промышленная сушилка со встречными закрученными потоками, разработанная и изготовленная в НИИхиммаше, позволяющая совместить процессы сушки и улавливания в одном аппарате).

В производстве поливинилбутираля работает установка комбинированной аэрофонтанной сушилки КАС-1100, показатели которой превосходят проектные, представленные в табл. 3. При этом успешно удаляется свободная и связанная влага, в том числе из капилляров размером до  $80\text{Å}$ ,

что особенно важно, так как в печати высказывалось мнение о невозможности сушки поливинилбутираля в сушилках типа КАС в связи с наличием значительного количества связанной влаги, которая "не успеет" удалиться за время пребывания материала в сушилке КАС. В действительности же необходимое время сушки определяется не столько количеством связанной влаги, сколько характеристикой структуры, из которой эта влага удаляется.

Изготовитель сушилок типа КЦС и КАС - Бердичевский завод химического машиностроения "Прогресс".

### Сушилки для материалов третьей группы

Как следует из классификационных табл. 1 и 2, к третьей группе относятся материалы с порами критическим размером от  $60 \text{ \AA}$  до  $20 \text{ \AA}$ , содержащие свободную и связанную влагу, причем материалы с порами критическим размером от  $60 \text{ \AA}$  до  $40 \text{ \AA}$  относятся к первой подгруппе третьей группы и типовым аппаратом для них являются вихревые сушилки (ВС), а материалы с порами критическим размером от  $40 \text{ \AA}$  до  $20 \text{ \AA}$  относятся ко второй подгруппе третьей группы и типовыми аппаратами для них являются сушилки с направленно перемещающимся виброаэрокипящим слоем (ВКС). Четвертую группу, как известно, составляют материалы с порами критическим размером менее  $20 \text{ \AA}$ , т.е. содержащие ультрамикropоры, соизмеримые с размерами молекул удаляемых жидкостей (вода или органические растворители). Учитывая, что для большинства материалов четвертой группы (кроме первой подгруппы - тонкодисперсных материалов с частицами размером менее  $1 \text{ мкм}$ ), как было указано ранее, применение сушилок со взвешенным слоем экономически нецелесообразно, а для материалов первой подгруппы четвертой группы типовыми аппаратами также служат сушилки ВКС (хотя и с другим, более длительным циклом сушки), в данном разделе наряду с сушилками ВС рассмотрены аппараты ВКС применительно как ко второй подгруппе третьей группы, так и к первой подгруппе четвертой группы дисперсных материалов.



Вихревые сушилки ВС, НИИхиммашем разработаны различные модификации вихревых сушилок дискового типа\*. Основные технические показатели вихревых сушилок и соответствующих им установок представлены в табл. 4.

Установки (по требованию заказчика) можно комплектовать нагревательными устройствами различных типов. Основным типоразмером вихревой сушилки является аппарат ВС-800, соответствующий наиболее распространенной производительности среди материалов третьей группы. В табл. 4 представлены характеристики двух установок с аппаратами ВС-800: для сушки крупнодисперсных материалов типа сополимеров стирола и тонкодисперсных материалов типа мела и талька (в последнем случае осуществляется частичная рециркуляция теплоносителя). Так как вихревые сушилки можно успешно применять для волокнистых материалов, в табл. 4 представлена характеристика установки ВС-1000, система питания и улавливание которой обеспечивает сушку не только сыпучих, но и волокнистых материалов, например волокнита.

Вихревые сушилки в связи с простотой их конструкции (как, впрочем, и сушилки типа КЦС и КАС) некоторые химические предприятия изготавливают собственными силами. Характеристика одной из таких установок (на базе вихревой сушилки ВС-1100), изготовленной и внедренной в производстве пресс-порошков на Кемеровском заводе "Карболит", включена в табл. 4. Причем производительность установки можно увеличить за счет увеличения расхода воздуха и повышения его температуры.

Конструкция типовой сушилки ВС представлена на рис. 8, а схема сушильной установки на рис. 9 (для примера рассмотрена установка ВС-800, предназначенная для сушки полимерных материалов типа сополимера МСН).

Вихревая сушилка ВС-800 (см. рис. 8) состоит из цилиндрической камеры дискового типа диаметром 800 мм и шириной 250 мм. Одна из торцовых стенок сушильной камеры представляет собой крышку с люком и смотровым окном. К другой торцовой стенке крепится улитка для

---

\* Авт. свид. № 237700 и № 326424.

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИПОВЫХ УСТАНОВОК ВИХРЕВЫХ СУШИЛОК

Типоразмер установки	Расход воздуха, кг/ч	Количество подводимого тепла, ккал/ч	Количество испаряемой влаги, кг/ч	Размер сушильной камеры, мм		Комплектуемое оборудование					
						Тип циклона		Тип пылеуловителя санитарной очистки	Тип питателя	Тип нагнетающего вентилятора	Тип хвостового вентилятора
						I ступени	II ступени				
ВС-480	650	25000	До 25	480	150	ЦН-15 Ø 300	СКЦН-34 Ø 300 (2 шт.)	-	Винтовой вертикальный	ВД-4	Вакуум-насос ВВД-8у
ВС-800	6000	175000	До 180	800	250	ЦН-15 Ø 550 (2 шт.)	ЦН-15 Ø 400 (2 шт.)	-	Двухшнековый	ВВД-8у	ВВД-8у
ВС-800М	2000	40000	До 45	800	250	ЦН-15 Ø 600	СКЦН-34 Ø 600 (2 шт.)	Фильтр ФВК-80	Винтовой вибрационный	Ц10-28 № 4	ВВД-8у
ВС-1000	12000	230000	До 250	1000	400	ЦН-24 Ø 1000	ЦН-15 Ø 700 (4 шт.)	-	Ленточный транспортер с эжектором	ВВД-11	ВВД-11
ВС-1100	9000	150000	До 150	1100	450	ЦН-15 (4 шт.)	ЦН-15 (6 шт.)	Фильтр ФВ-80	Ленточный транспортер с эжектором	ВВД-11	ВВД-8у (2 параллельных)

Примечание. Температура воздуха на входе в сушилки ВС-800М и ВС-1100 до 160°C, в сушилку ВС-480 до 240°C, в сушилку ВС-800 до 200°C. В установке ВС-800М, помимо 2000 кг/ч свежего воздуха, в циркуляции находится до 4000 кг/ч воздуха (суммарное количество воздуха, проходящего через камеру ВС-800М, достигает 6000 кг/ч).

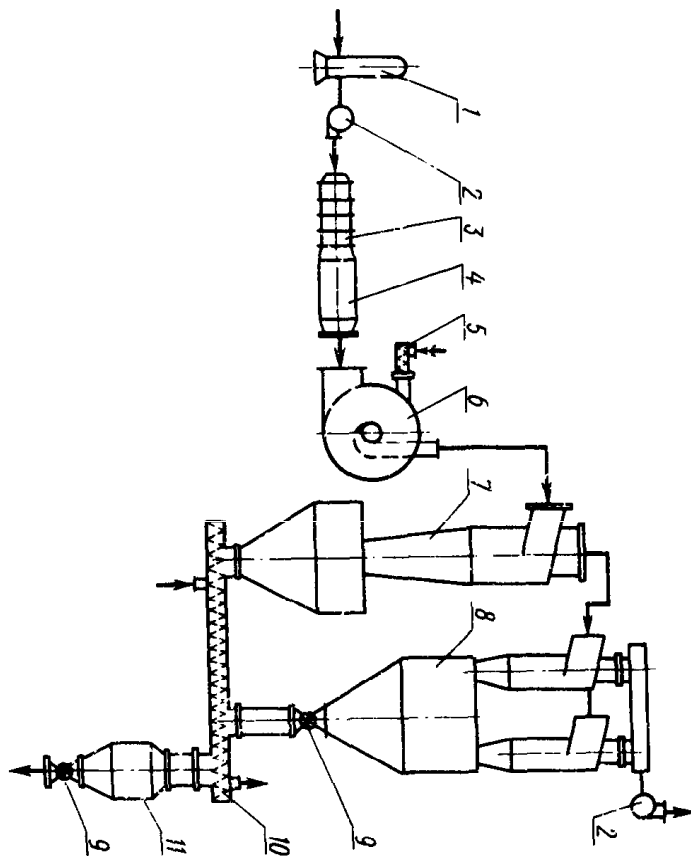


Рис. 9. Установка вихревой сушилки ВС-800:  
1 - масляный фильтр; 2 - вентилятор; 3 - паровые calorifier; 4 - электрокалорифер; 5 - питатель; 6 - вихревая сушилка; 7 - дилконы ЦН-15 Ø 550 мм; 8 - циклоны ЦН-15 Ø 400 мм; 9 - секторный затвор; 10 - охлаждаемый шнек; 11 - бункер

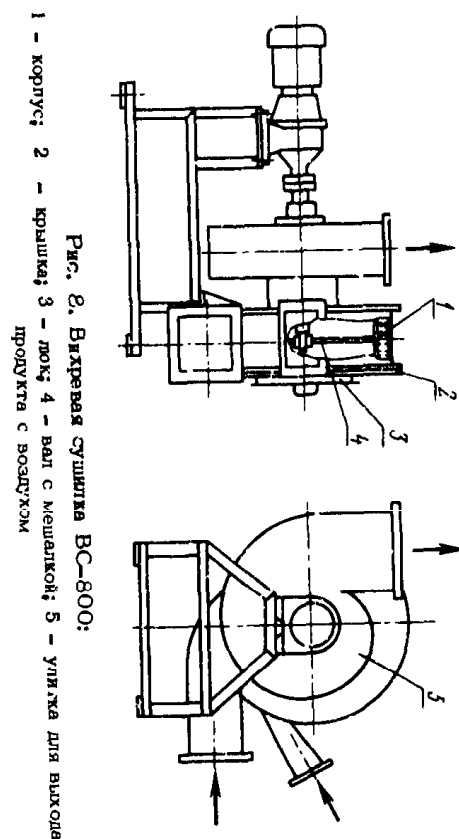


Рис. 8. Вихревая сушилка ВС-800:  
1 - корпус; 2 - крышка; 3 - дверь; 4 - вал с мешалкой; 5 - уликка для выхода продукта с воздухом

выхода газовзвеси. В корпусе со стороны улитки консольно расположен вал с мешалкой, на гребнях которой укреплены цепи. Вал мешалки с подшипниками имеет воздушное охлаждение. На боковой стенке корпуса сушилки расположен штуцер для подсоединения питателя подачи исходного материала. Снизу предусмотрен тангенциальный штуцер для подачи теплоносителя, который вводится в камеру через поворотные лопасти, позволяющие регулировать скорость и направление подаваемого воздуха.

Установка вихревой сушилки ВС-800 (см. рис. 9) первоначально разрабатывалась применительно к сушке сополимера МСН и помимо собственно сушилки ВС-800, системы улавливания, состоящей из двух циклонов ЦН-15 диаметром 550 мм и из двух циклонов ЦН-15 диаметром 400 мм и системы нагрева теплоносителя, включающей в себя паровые и электрический калориферы, оснащена масляным фильтром для предварительной очистки воздуха и винтовым охлаждаемым шнеком с бункером для охлаждения и сбора высушенного продукта.

Продукт в сушилку загружается двухшнековым питателем. На выгрузке из циклонов 8 и бункера установлены секторные затворы. Воздух в установку нагнетается и отсасывается вентиляторами ВВД-8у. Установка (как и все установки типа ВС) предназначена для помещений класса ВП-а.

Установки вихревых сушилок снабжены системами КИП и А. Так, система КИП и А установки ВС-1000 включает дистанционное управление со щита электродвигателями вентиляторов ленточного и секторного питателей, местное управление электродвигателями ленточного и секторного питателей; контроль и сигнализацию температуры воздуха на выходе из сушилки; блокировку электродвигателей вентиляторов линии сушки с электродвигателями ленточного и секторного питателей; сигнализацию нормальной работы и аварии электродвигателей вентиляторов линии сушки, ленточного питателя и секторного питателя. Напряжение питания силовых цепей 380 в; напряжение цепей управления 220 в. Давление питающего воздуха 4-6 кгс/см<sup>2</sup>.

Важнейшей технологической характеристикой вихревых сушилок является их удерживающая способность (количество материала в объеме камеры), определяющая время пребывания материала в вихревой камере. Удерживающая способность увеличивается приблизительно пропорционально третьей степени расхода газа до определенного критического значения, соответствующего наибольшему времени пребывания материала в вихревой камере. Это время может изменяться от 20–30 с до нескольких минут, т.е. соответствует времени, необходимому для сушки продуктов первой подгруппы третьей группы.

Особенностью двухфазного потока по сравнению с однофазным при движении в вихревой камере является резкое снижение гидравлического сопротивления аппарата, вызванное снижением окружных скоростей газа в камере вследствие рассеивания энергии струй газа при ударе и трении материала о стенку. Минимальное сопротивление имеет камера при загрузке в нее материала соответствующей критической (наибольшей) удерживающей способности при данном режиме. Удерживающая способность камер возрастает пропорционально их ширине при постоянном удельном расходе газа на единицу длины до значения ширины камеры, равной половине ее диаметра. При дальнейшем увеличении ширины камеры удельная удерживающая способность снижается вследствие влияния неравномерности распределения и развития осевых течений газа в камере. С увеличением ширины камеры гидравлическое сопротивление ее несколько увеличивается.

Коэффициент сопротивления вихревых камер в первом приближении не зависит от расхода теплоносителя, плотности, размера и формы частиц. При одинаковом удельном расходе высушиваемого материала с увеличением диаметра камеры возрастает среднее время пребывания его в аппарате. Одновременно снижаются напряжения по влаге, однако даже для аппаратов промышленных размеров их величины достаточно высоки (не менее  $600 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{ч}$ ), что обуславливает весьма малую металлоемкость и габариты сушилок ВС при высокой интенсивности процесса сушки.

В некоторых производствах вихревые сушилки выполняют роль сушильно-реакционных аппаратов, в которых сочетаются процессы сушки с химическими. Так, в установке вихревой сушилки ВС-1100 (рис. 10) на заводе "Карболит" (г. Кемерово) осуществляется не только сушка с

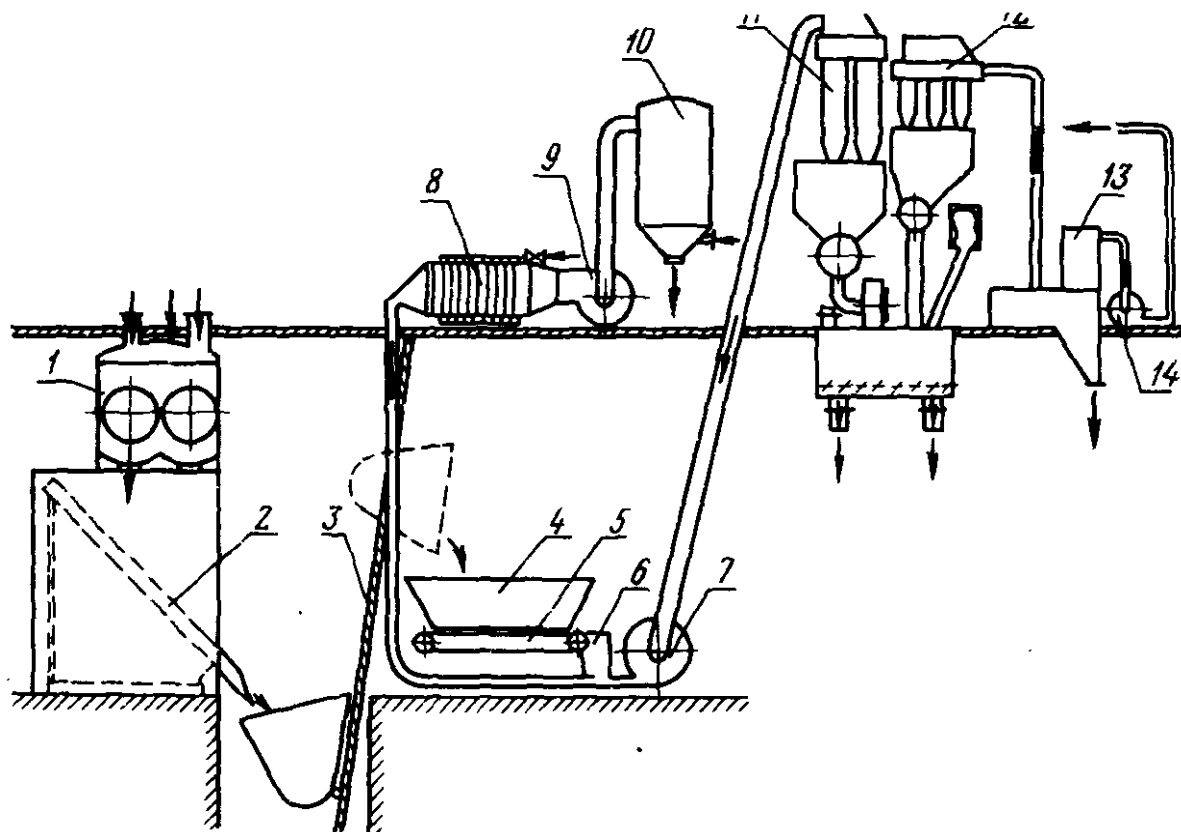


Рис. 10. Схема производства пресс-порошка К-21-22 на базе установки вихревой сушилки ВС-1100:

1 - лопастной смеситель; 2 - транспортер; 3 - скиповый подъемник; 4 - бункер влажного продукта; 5 - скребковый питатель; 6 - загрузочная воронка; 7 - вихревая сушилка; 8 - паровые калориферы; 9 - вентилятор ВВД № 11; 10 - фильтр для очистки воздуха; 11 - батарейный циклон из четырех циклонов ЦН-15; 12 - батарейный шестиэлементный циклон; 13 - фильтр ФВ-90; 14 - вентиляторы ВВД № 8

удалением воды и фенола, но и углубление реакции поликонденсации смол с частичным переводом резола в резитол. Подаваемая на сушку пресс-композиция готовится в лопастном смесителе. Из смесителя композиция подается на транспортер, с которого попадает на скиповый подъемник, подающий сырую массу в бункер, оборудованный скребковым питателем для подачи массы по течке в воздуховод.

Композиция высушивается воздухом, нагретым до 150–170°С в паровых калориферах. Воздух вентилятором ВВД № 11 (производительностью до 9000 м<sup>3</sup>/ч) подается через калориферы к месту загрузочной воронки по суживающемуся воздуховоду. Скорость движения воздуха в инжекционном сопле регулируется установленным в загрузочной воронке шибером.

Сырая композиция из бункера ленточным (скребковым) питателем равномерно подается в загрузочную воронку вихревой сушилки, затем захватывается воздухом и передается в сушилку. Высушенный пресс-материал по воздуховоду поступает в батарею из четырех циклонов ЦН-15, а затем в батарею из шести циклонов. Воздух от пыли очищается в фильтре ФВ-90. После фильтра ФВ-90 параллельно установлены два отсасывающих вентилятора ВВД №8, которые направляют очищенный воздух в насадочный скруббер для очистки от фенола (орошаемым абсорбентом является 4–6%-ный водный раствор щелочи, который с фенолом образует фенолят натрия).

Производительность вихревой сушилки по пресс-материалу К-21-22 составляет около 400 кг/ч, т.е. почти в 2 раза превышает производительность работающей в том же производстве крупногабаритной ленточной сушилки. Начальная влажность пресс-материала 12–15%, остаточная до 5%.

Вихревые сушилки применяются в ряде отраслей промышленности, в том числе в химической (для сушки полимеров и волокнистых материалов), химико-фармацевтической (в производстве витаминных препаратов), кондитерской и др. Успешно работают вихревые сушилки ВС-800 в производстве эмульсионного полистирола и волокнита на Узловском заводе пластмасс. Производительность сушилок по сухому продукту около 500 кг/ч. Сушилка ВС-800 для тонкодисперсных продуктов типа мела и талька изготовлена Бердичевским заводом "Прогресс" и смонтирована на заводе "Азовсталь". Она предназначена для сушки специальных "земель", служащих сорбентами при очистке масел в металлургических производствах.

Серийный выпуск сушилок типа ВС намечается в 1976 г.

Сушилки с виброаэрокипящим слоем ВКС. Термин "виброаэрокипящий слой" применяется к такому псевдооживленному слою, в образовании которого существенную роль играют продуваемый сквозь слой теплоноситель и механические вибрационные колебания (корпуса сушилки или части корпуса, элементов, погруженных в слой, и т.п.). По сравнению с обычным кипящим слоем виброаэрокипящий слой (ВКС) имеет ряд преимуществ и особенностей, основные из которых – возможность более четкого регулирования среднего времени пребывания материала в зоне сушки, безопасность в отношении образования значительных зарядов статического электричества, меньший пылеунос. Удельный расход воздуха в сушилках ВКС на единицу площади газораспределительной решетки меньше, чем в сушилках с кипящим слоем.

Это важно при сушке плохоожижаемых и крупнодисперсных материалов, для создания псевдооживленного слоя которых требуются значительно большие расходы воздуха, чем необходимые из условий тепло- и массообмена. Применение аппаратов ВКС в таких случаях позволяет добиться устойчивого кипения и снизить удельные расходы воздуха и тепла на сушку. Сушилки ВКС разрабатываются и выпускаются многими зарубежными фирмами.

Анализ конструкций и опыта эксплуатации сушилок ВКС за рубежом, а также проведенные НИИхиммашем и другими организациями исследования позволили разработать наиболее рациональные конструкции для подготовки их серийного выпуска заводами химического машиностроения. НИИхиммашем разработано несколько типоразмеров сушилок ВКС.

Техническая характеристика сушилок ВКС

	ВКС-0,14	ВКС-0,6	ВКС-2,6	ВКС-8
Площадь газораспределительной решетки, м <sup>2</sup> . . . . .	0,14	0,6	2,6	8
Расход воздуха, кг/ч . . . . .	600	1500	5500	15000
Параметры вибрации:				
амплитуда, мм . . . . .	0,5-6	1-2	1-1,5	0,5-1
частота рад/с . . . . .	145	145	300	300
угол вибрации, град. . . . .	45-90	45-90	80	80
Количество испаряемой влаги, кг . . . . .	До 10	До 20	До 100	До 400
Количество подводимого тепла, ккал/ч . . . . .	12000	25000	120000	500000
Габаритные размеры, м . . . . .	1,5x0,9x2,3	3,2x1,2x2,6	4x1,2x1,15	6,9x1,9x2,16

Количество подводимого тепла, указанное в технической характеристике, это наибольшее количество тепла, которое может быть передано высушиваемому материалу при использовании в качестве нагревателей паровых калориферов (для ВКС-8 учтено также количество тепла, подводимое теплообменными поверхностями). При сушке термолабильных материалов количество подводимого тепла уменьшается, а при сушке термостойких материалов может быть увеличено за счет дополнительной установки теплообменников, электрокалориферов или топок.

Характерной особенностью всех сушилок является большое отношение длины аппарата к ширине (не менее 6), что обеспечивает приближение сушилки по гидродинамической модели к аппаратам идеального вытеснения, способствуя равномерности сушки, а также наличие вертикального потока теплоносителя, продуваемого сквозь слой материала, и возможность регулирования всех параметров вибрации (угол, частота, амплитуда).

Сушилки ВКС, выпускаемые зарубежными фирмами, применяются для сушки различных материалов (в том числе для таких дешевых продуктов как поваренная соль) и рассчитаны на часовую производительность от нескольких килограммов до нескольких тонн.

Первым отечественным опытом эксплуатации сушилки ВКС в многотоннажном производстве для сушки минеральных солей будет разработанная НИИхиммашем и намеченная к внедрению в производстве сульфата аммония сушилка ВКС на производительность по сухому продукту более 10 т/ч. В отличие от других сушилок с вибрирующим корпусом она снабжена теплообменными поверхностями, погруженными в слой, что позволяет значительно повысить тепловую мощность сушилки, а следовательно, и ее производительность.

Головной образец сушилки ВКС-0,6 предназначен для сушки бисерного поливинилацетата (сейчас она работает в производстве хлоркаучука), а образцы сушилок ВКС-2,6 и ВКС-8 соответственно для производства адипиновой кислоты и сульфата аммония. Поэтому параметры теплоносителя рассчитаны на условия сушки названных термочувств-



вительных продуктов. В зависимости от допустимой температуры сушки тех или иных материалов заказчик в каждом конкретном случае должен обусловить тип и количество поставляемых заводом-изготовителем калориферов или теплообменников. Вследствие значительной продолжительности сушки в аппаратах ВКС, обусловленной кинетикой сушки тонкопористых материалов третьей группы и первой подгруппы четвертой группы (см. табл.1), допустимая температура подаваемого теплоносителя при одинаковой термостойкости высушиваемых материалов, как правило, ниже, чем при сушке в установках КЦС, КАС или даже ВС, и в каждом конкретном случае устанавливается в процессе экспериментальных работ на опытной установке. Такой опытной установкой может служить сушилка ВКС-0,14, разработанная применительно к самым малотоннажным и опытным производствам (по сути дела, это укрупненная лабораторная установка).

Аппарат ВКС-0,6 предназначен для широкого круга малотоннажных производств. Кроме тонкодисперсных материалов, такие сушилки рекомендуются для применения во многих производствах химико-фармацевтической промышленности и в промышленности химических реактивов, где имеется масса подлежащих глубокой сушке комкующихся, плохожижаемых кристаллических термолабильных материалов, не допускающих измельчения в процессе высушивания. Аналогичные сушилки широко используются во многих странах.

На рис. 11 представлена схема установки ВКС-0,6, изготовленной в НИИхиммаше. Сушилка ВКС-0,6 с общей поверхностью решетки  $0,6 \text{ м}^2$  состоит из двух лотков сечением  $0,3 \times 1 \text{ м}$ , каждый из которых установлен на четырех амортизаторах и имеет индивидуальный вибратор, позволяющий изменять направление и амплитуду вибрации. Воздух подается двумя вентиляторами ВД-2, нагревается в паровых калориферах и двумя потоками поступает под распределительные решетки вибрирующих лотков. Продукт из бункера питателем подается на поддерживающую решетку в торце первого лотка и в виброкипящем слое, перемещаясь по лотку, пересыпается на второй лоток, на противополож-

ном торце которого имеется устройство для его выгрузки.

Отработанный теплоноситель очищается от пыли в циклоне ЦН-15 диаметром 250 мм и вентилятором Ц4-70 № 2,5 выбрасывается в атмосферу. Температура воздуха,

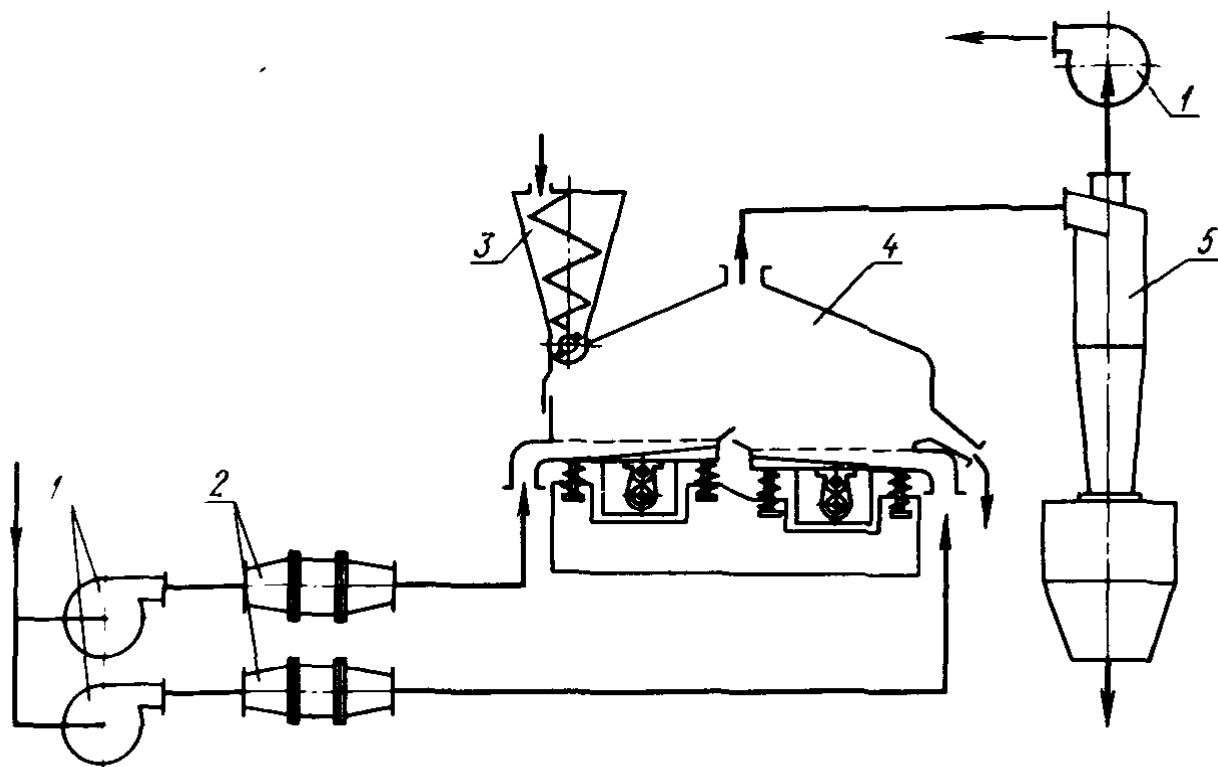


Рис. 11. Установка сушилки с виброкипящим слоем ВКС:

1 - вентиляторы; 2 - калориферы; 3 - питатель; 4 - сушилка; 5 - циклон

подаваемого в сушилку через смонтированные на раме сушилки калориферы,  $80-100^{\circ}\text{C}$ ; при необходимости более высокой температуры количество калориферов можно увеличить. Установленная мощность электродвигателей 4 кВт. Масса установки, смонтированной на единой раме, вместе с металлоконструкциями 2,5 т. Габаритные размеры 5300 x 2770 x 4140 мм.

Установка оснащена системой КИП и А и предназначена для помещений класса В1-а.

Сушилки с виброаэрокипящим слоем в случае необходимости применяют в сочетании с сушилками других типов в качестве второй или даже третьей ступени комбинированных

агрегатов. Такие сочетания целесообразны, если в обрабатываемых материалах содержатся значительные количества свободной влаги или связанной капиллярной влаги, или то и другое вместе. Характерный пример таких материалов — полиолефины (полиэтилен, полипропилен и их сополимеры). Так, полиэтилен высокой плотности, высушиваемый от воды или органических растворителей (последнее особенно распространено, причем жидкой фазой в таких случаях является, как правило, бензин), представляет собой материал с большим содержанием свободной влаги (более 1 кг на 1 кг сухого материала), для сушки которого до остаточной влажности около 1% целесообразно применение циклонных сушилок типа ЦС. Однако по технологическим условиям его нужно высушивать до остаточного массосодержания растворителя не более 0,1%.

Анализ структуры полиэтилена показывает, что он не имеет переходных пор, а массосодержанию, близкому к 1%, соответствует заполнение ультрамикропор размерами менее  $20\text{\AA}$ , т.е. соизмеримых с размерами молекул воды и тем более органического растворителя (например, бензина). Поэтому если до массосодержания 1% полиэтилен ведет себя как материал первой группы, то при сушке в пределах массосодержания 1–0,1% это уже материал первой подгруппы четвертой группы (см. классификационную табл. 1). Следовательно, досушивать полиэтилен нужно в аппарате ВКС. Сушку от начальной влажности более 50% проводить в аппаратах ВКС нецелесообразно (хотя сушка в таких аппаратах при начальной влажности материала 20–30% осуществляется за рубежом). Поэтому наиболее рационально для сушки полиэтилена использовать комбинированный агрегат, состоящий из циклонной сушилки ЦС для подсушки и сушилки с виброаэрокипящим слоем ВКС для досушки. Учитывая большое народнохозяйственное значение полиолефинов, НИИхиммашем разработана типовая установка для их сушки в замкнутом цикле инертного газа, причем на первой ступени применена модификация типовой установки ЦС, а на второй ступени — модификация типовой установки ВКС (рис. 12).

Эта автоматизированная установка для сушки полиэтилена от бензина в замкнутом цикле азота включает подсушку порошка полиэтилена в циклонной сушилке с вихревой форкамерой от начального влагосодержания бензина

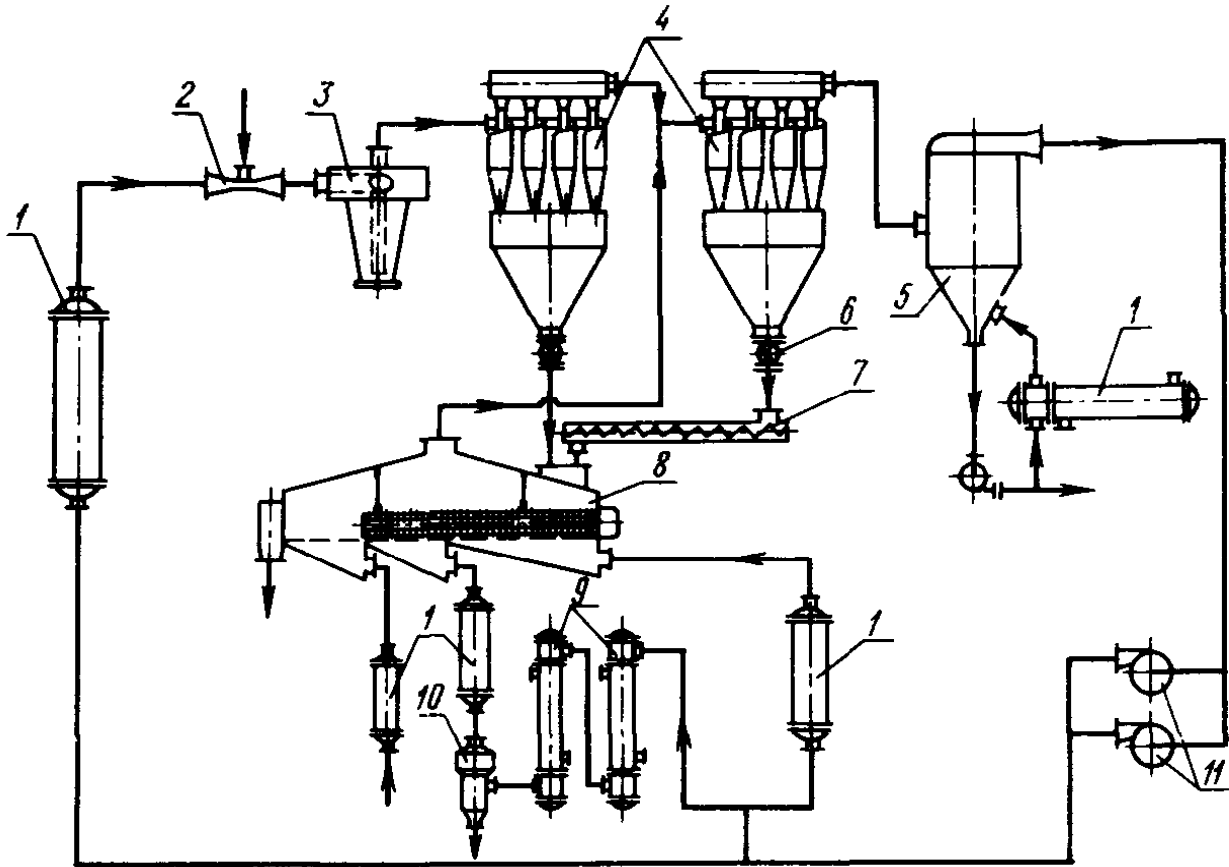


Рис. 12. Установка для сушки полиолефинов:

I - теплообменники; 2 - эжекторный питатель; 3 - сушилка I ступени; 4 - циклоны ЦН-11; 5 - циклонно-пенный скруббер; 6 - секторные затворы; 7 - шнековый транспортер; 8 - сушилка II ступени; 9 - конденсаторы; 10 - каплеотбойник; 11 - газодувки

3,5 кг/кг до 0,03 кг/кг и досушку в аппарате ВКС (в данном случае это сушилка кипящего слоя с вибрирующими поверхностями нагрева) от влагосодержания 0,03 кг/кг до остаточного содержания бензина 0,001 кг/кг. Влажный продукт из центрифуг поступает в эжекторный питатель, откуда смесью азота с парами бензина подается в верхнюю часть сушилки, представляющую собой вихревую форкамеру диаметром 2000 мм. Перемещаясь в вихревой форкамере от периферии к центру, продукт поступает в циклонную часть сушилки с верхним диаметром 1200 мм и

вместе с теплоносителем по центральной трубе выносятся из аппарата в группу из восьми циклонов ЦН-11 диаметром 600 мм.

Продукт из бункера циклона через секторный затвор поступает во II ступень установки – сушилку кипящего слоя. Сушилка кипящего слоя имеет встроенные поверхности теплообмена, обогреваемые паром давлением 1,1 ата, погруженные в кипящий слой и вибрирующие при помощи вибропривода с частотой 30 Гц. Коэффициенты теплоотдачи в слой составляют  $150 \text{ ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град}$  и более.

Сушилка кипящего слоя имеет три зоны подвода теплоносителя: в первую зону по ходу продукта подается бензоазотная смесь с влагосодержанием, равным влагосодержанию на входе в циклонную сушилку, во вторую – теплоноситель, осушенный в конденсаторах, и в третью – чистый азот для отдувки паров бензина из слоя продукта для достижения необходимого конечного содержания бензина (0,001 кг/кг).

Теплоноситель, подаваемый в сушилку I ступени и в каждую из зон сушилки II ступени, нагревается в соответствующих теплообменниках. Готовый продукт выгружается из сушилки кипящего слоя, а теплоноситель поступает на пылеочистку вместе с теплоносителем I ступени из первой группы циклонов во вторую группу из восьми циклонов ЦН-11 диаметром 600 мм. Продукт, уловленный во второй группе циклонов, через секторный затвор шнековым транспортером подается в сушилку 8, а теплоноситель поступает на мокрую очистку от пыли и конденсацию паров бензина в циклонно-пенный скруббер.

В скруббер поступает бензин, охлажденный в теплообменнике оборотной водой. Температура бензоазотной смеси после скруббера  $45^{\circ}\text{C}$ , содержание бензина 2 кг/кг азота, после конденсаторов  $10^{\circ}\text{C}$ , влагосодержание 0,38 кг/кг азота. Циркуляцию бензоазотной смеси в системе обеспечивает газодувка ТГ-250-1,12 (одна резервная).

Поверхности нагрева в сушилке кипящего слоя обогреваются паром, полученным из конденсата теплообменника на нагреве бензоазотной смеси, подаваемой в сушилку I ступени, путем расширения его в расширительном бачке.

Техническая характеристика установки для сушки  
полиэтилена от бензина

Производительность, кг/ч:	
по готовому продукту . . . . .	5000
по испаряемой жидкости (бензину) . . . . .	7900
Расход:	
пара давлением 12 ата, кг/ч . . . . .	3200
воды температурой 25°С, м <sup>3</sup> /ч . . . . .	195
хладагента температурой 10°С, кг/ч . . . . .	47500
Установленная мощность электродвигателей, кВт . . . . .	212

Установка предназначена для помещений класса В1-а; оснащена системой КИП и А и имеет необходимые блокировки для обеспечения ее безопасной эксплуатации.

Необходимо отметить, что в процессе анализа возможных решений по конструкции сушилки для полиолефинов были рассмотрены все известные за рубежом аппараты и установки. В частности, проанализирована работа сушилок системы "Рурская химия" и предложены улучшенные варианты конструкций такого типа, а также другие варианты. Однако наиболее целесообразным признан в качестве типового решения вариант комбинированного агрегата ЦС+ВКС в замкнутом цикле инертного газа.

Описанная выше типовая комбинированная сушилка для полиолефинов (ее также можно применять и для сушки от воды), которая может быть использована и в ряде других многотоннажных производств полимерных материалов, например, при сушке поликарбонатов, является не единственным случаем применения НИИхиммашем комбинированных многоступенчатых установок. Так, в производстве винифлекса успешно работает комбинированный агрегат, представляющий собой сочетание КЦС+КС, каждая из которых разработана НИИхиммашем (изготовитель - Бердичевский завод "Прогресс").

Дело в том, что винифлекс - материал с высокой влажностью, содержащий в больших количествах все виды свободной и связанной влаги, с ярко выраженными адгезионно-когезионными свойствами и развитой капиллярной структурой, имеющей поры всех размеров - от макропор

\* Авт. свид. № 231378 и № 381852.

до ультрамикророр. Винифлекс представляет собой сочетание материала второй группы, для которого целесообразно использовать сушилку типа КЦС, с материалом второй подгруппы третьей группы, для которого типовой является сушилка ВКС. Применять для досушки винифлекса аппарат кипящего слоя вместо аппарата ВКС оказалось целесообразным в связи с тем, что к продукту не предъявляются строгие требования по равномерности сушки и он не образует взрывоопасных пылевоздушных смесей. После сушилки КЦС продукт уже хорошо сыпучий, но имеет довольно высокую остаточную влажность (до 10% и выше), для удаления которой требуются значительные удельные расходы теплоносителя (в пересчете на массу сухого продукта), что, как известно, проще получить в условиях сушки в аппарате КС, чем в сушилке ВКС.

Из рассмотренных примеров видно, что выбор типового аппарата или их сочетания при сушке каждого конкретного материала обусловлен характеристикой его как объекта сушки, причем основным критерием являются массосодержание различных видов связи влаги с материалом с учетом его капиллярно-пористой структуры, адгезионно-когезионных свойств и технологических особенностей сушки (термолабильность, взрывоопасность и т.п.). В большинстве случаев дисперсные материалы проявляют свойства, характерные для одной из групп по классификации (см. табл. 1), но иногда и нескольких групп одновременно. В таких случаях следует заказывать соответствующую комбинацию из нескольких типовых аппаратов. В наиболее трудных случаях помощь в выборе типовых аппаратов может оказать Лаборатория сушилок со взвешенным слоем материала НИИхиммаша.

## **ТИПОВЫЕ АППАРАТЫ И УСТАНОВКИ ДЛЯ СУШКИ АГРЕГИРОВАННЫХ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Значительная часть материалов поступает на сушку в виде агрегатов частиц (комков, кусков и т. п.). Сушка с одновременным измельчением (деагрегацией и собственно

измельчением, когда дробятся единичные частицы, составляющие агрегаты) получила широкое распространение за рубежом в ряде отраслей промышленности, в том числе в химической. В Советском Союзе такой способ применяется пока довольно редко.

НИИхиммашем проведен комплекс работ, включающий анализ опыта зарубежных фирм [1, 2] и отечественных организаций [3, 4, 5], аналитические и экспериментальные исследования, а также опытно-конструкторские проработки по сушке с одновременным измельчением различных групп материалов\*. В результате разработаны типовые сушилки и установки для сушки с одновременным измельчением (деагрегацией) высушиваемых материалов (продукты химической промышленности – карбоксиметилцеллюлоза, оксиэтилцеллюлоза, ацетаты, аминокласты; продукты микробиологической промышленности – культура плесневого гриба, свекловичный жом и др.). Ранее уже рассматривались сушилки типа КЦС и КАС, в подсушивателе которых предусмотрена быстроходная мешалка, способная деагрегировать непрочные агрегаты в виде комков. В данном разделе рассматриваются сушилки с устройствами, разрушающими значительно более прочные агрегаты и даже при необходимости дробящими дисперсные материалы.

В качестве измельчающего органа сушилок с одновременным измельчением выбран дисмембратор, а тип сушильной камеры, в которой он установлен (или последующей за ним), определяется группой материала (по классификации дисперсных материалов), полученного в результате измельчения.

Так как деагрегация происходит в потоке горячего воздуха, в дисмембраторе удаляется свободная и слабо-связанная влага, включающая влагу широких пор и крупных капилляров (с учетом поверхностей, образованных в результате измельчения). Дисмембратор (вернее, его штамповая зона) является сушильным аппаратом, аналогичным подсушивателю комбинированных сушилок КЦС и КАС, но только в случае сушки не легко разрушаемых, а прочных агрегатов из частиц дисперсных материалов. Выбор

---

\* Авт. свид. № 222958.



типа аппарата на последующей стадии сушки зависит от характеристики полученного дисперсного материала и технологических требований к высушенному продукту. Учитывая, что подсушка происходит в самом измельчителе, досушивать материал можно в трубе-сушилке (вихревой камере или аппарате с кипящим слоем). При этом также следует руководствоваться классификацией по табл. 1.

НИИхиммашем разработаны три типа сушилок с механическими измельчителями: труба-сушилка типа ТСИ, вихревая сушилка с измельчением типа СВИ, а также сушилка с кипящим слоем с вращающейся решеткой. Последняя разработка является модификацией известной конструкции, созданной в МИТХТ им. Ломоносова.

Установка одноступенчатой трубы-сушилки с центробежными дезагрегаторами (рис. 13) состоит из трубы-сушил-

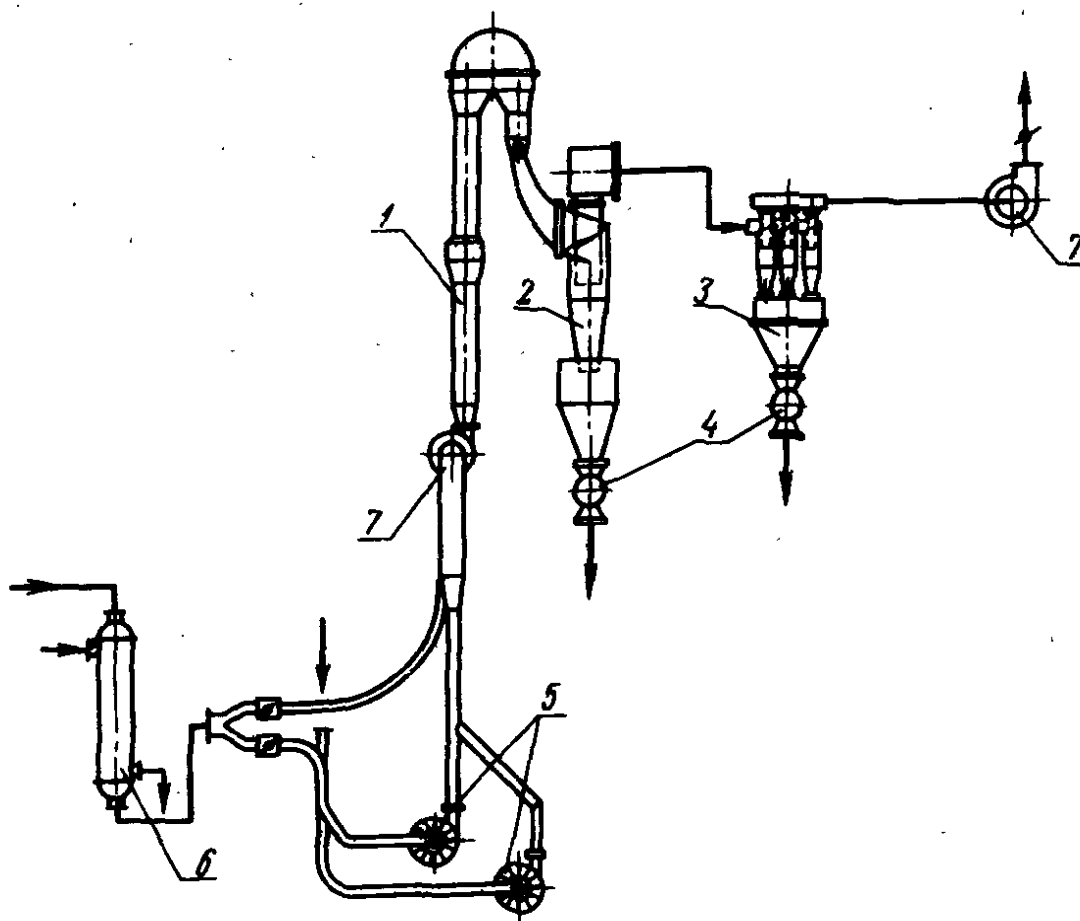


Рис. 13. Установка одноступенчатой трубы-сушилки с центробежными дезагрегаторами:

- 1 - труба-сушилка с расширителем; 2 - циклон ЦН-24; 3 - циклоны ЦН-15;  
4 - секторный затвор; 5 - измельчители; 6 - теплообменник; 7 - вентиляторы

ки диаметром 500 мм, высотой около 13 м с расширителем-аэрофонтаном диаметром 700 мм и поворотной головкой, циклона ЦН-24 диаметром 1100 мм для разгрузки основной массы продукта, группы из шести циклонов ЦН-15 диаметром 500 мм для пылеочистки отработанного теплоносителя, выбрасываемого в атмосферу вентилятором ЦП7-40 № 8.

Исходный продукт подается в поток горячего воздуха, нагретого в теплообменнике до  $160^{\circ}\text{C}$ , вместе с которым поступает в один из измельчителей (второй резервный), представляющий собой специально разработанную конструкцию дисмембратора с лопатками для дезагрегации продукта в потоке горячего воздуха. Дезагрегированный и подсушенный продукт попадает в трубу, в которую из теплообменника поступает дополнительное количество свежего теплоносителя. Весь этот поток проходит через вентилятор ЦП7-40 № 8 и поступает в трубу-сушилку. Продукт из циклонов выгружается через секторные затворы.

Установка обеспечивает расход теплоносителя 15000 кг/ч и может испарять до 600 кг/ч. Так, при подсушке карбоксиметилцеллюлозы от влажности 47% до влажности 20% (что требуется по технологическим условиям процесса) производительность по исходному продукту составляет 1700 кг/ч, по испаренной влаге 580 кг/ч. Габаритные размеры установки 10300 x 7750 x 25000 мм. Масса 15000 кг. Установленная мощность электродвигателей 100 кВт.

Детали, соприкасающиеся с продуктом, изготовлены из стали ОХ13. Установка снабжена системой КИП и А.

В вихревой сушилке типа СВИ (рис. 14) осуществляется сушка с одновременной дезагрегацией или измельчением кусковых и агрегированных материалов. Поток горячего теплоносителя поступает в эжектор с горловиной диаметром 200 мм, подхватывает исходный продукт, подаваемый туда винтовым питателем со шнеком диаметром 200 мм, и образующаяся газовзвесь поступает в камеру измельчения и сушки.

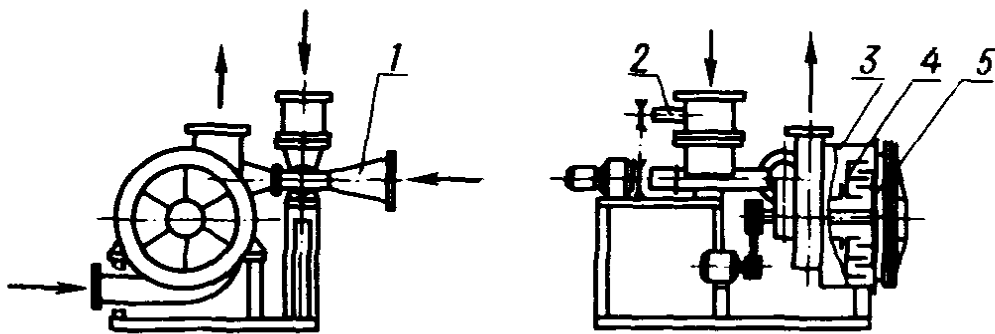


Рис. 14. Вихревая сушилка с измельчителем СВИ:

1 - эжектор; 2 - питатель; 3 - корпус сушилки; 4 - статор; 5 - ротор

Питатель оснащен бункером с ворошителем, обеспечивающим непрерывную подачу материала в шнек. Скорость вращения шнека 6–68 об/мин. Привод шнека и ворошителя в бункере от мотор-вариатора МВР1-10Щ мощностью 1,1 кВт.

Корпус сушилки по конструкции напоминает вихревую камеру ВС, имеющую наружный диаметр 1500 мм и ширину 320 мм. В нижнюю часть корпуса по тангенциальному патрубку размером 310 x 320 мм через поворотные лопатки вводится вторичный теплоноситель. В корпусе размещены статор и ротор дисмембратора. Диаметр ротора 1000 мм, скорость вращения 500 об/мин.

Продукт с потоком воздуха по центральной трубе, сквозь которую пропущен вал ротора, попадает в центр беличьего колеса измельчителя и, измельчаясь и подсыхая, поступает на его периферию в вихревую камеру, куда подается вторичный теплоноситель. Высушенный продукт потоком отработанного воздуха через улитку, примыкающую к торцовой стенке вихревой камеры, выносятся из сушилки.

Привод ротора от электродвигателя ВАО 71-4 мощностью 22 кВт. Масса сушилки 3300 кг. Габаритные размеры 3765 x 3400 x 2720 мм.

Детали, соприкасающиеся с продуктом, изготовлены из стали X18H10T.

Установка вихревой сушилки с измельчением (рис. 15), помимо сушилки, питателя и эжектора (см. рис. 14),

снабжена поворотной головкой для подачи продукта из вертикального участка трубы в группу из четырех циклонов ЦН-15 диаметром 600 мм, рукавными фильтрами для очистки воздуха от пыли, винтовым конвейером для сбора готового продукта из циклонов и фильтров, вентиляторами ВВД-9 для подачи свежего и выброса отработанного воздуха, калориферами КФБ-6 для нагрева первичного и вторичного теплоносителя.

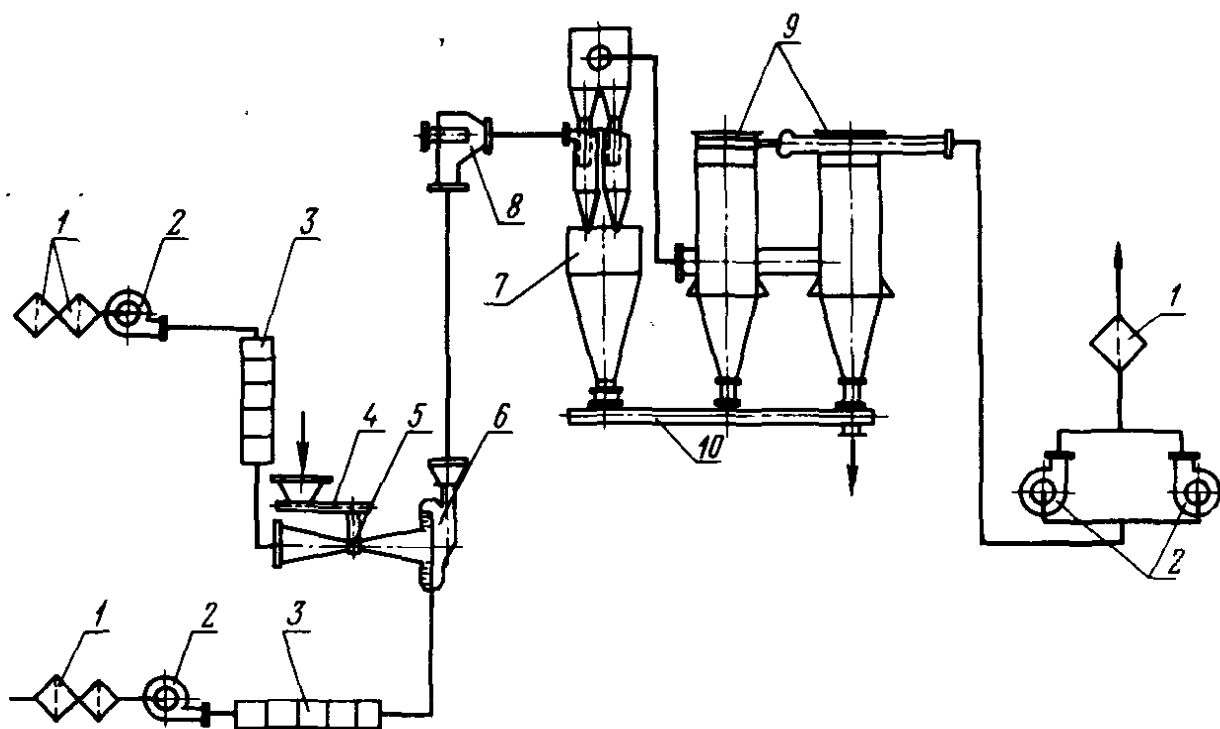


Рис. 15. Установка вихревой сушилки с измельчителем:

1 - фильтры; 2 - вентиляторы; 3 - калориферы; 4 - питатель; 5 - эжектор; 6 - вихревая сушилка; 7 - циклоны ЦН-15; 8 - поворотная головка; 9 - рукавный фильтр; 10 - конвейер

Так как первоначально установка была разработана для сушки культуры плесневых грибов, на подаче воздуха в установку и перед выбросом его в атмосферу предусмотрены фильтры грубой (ячейковой) и тонкой очистки (с тканью ФПП-15-3) воздуха, которые можно исключить из объема поставки при отсутствии специальных требований по бактериологической очистке воздуха.

Установка предназначена для помещений класса ВП-а, комплектуется системой КИП и А.

Температура теплоносителя на входе в сушилку до  $150^{\circ}\text{C}$ , расход до  $17000\text{ кг/ч}$ . Количество испаряемой влаги до  $400\text{ кг/ч}$ .

Кроме сушилок с механическим измельчением материала, в Советском Союзе и за рубежом применяют сушилки с пневматическим измельчением в высокоскоростных газовых струях. Все больше используются сушилки со встречными струями, в которых осуществляется сушка с одновременной дезагрегацией и измельчением в системе двух соударяющихся встречных струй газозвеси [6].

НИИхиммашем разработаны чертежи и изготовлен головной образец сушильной установки со встречными струями для сушки осадков сточных вод (рис. 16).

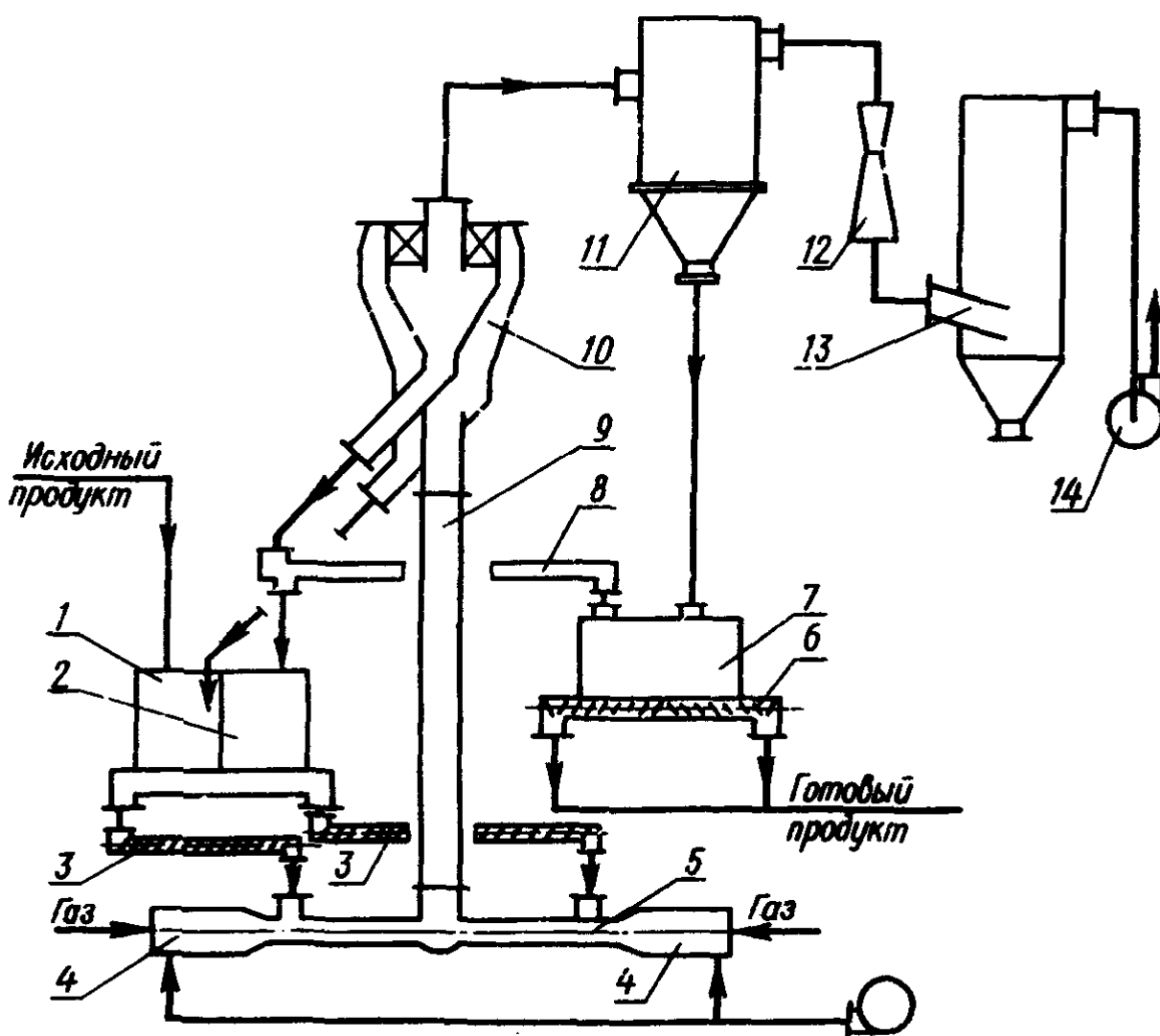


Рис. 16. Установка со встречными струями для сушки осадков сточных вод: 1 - бункер влажного осадка; 2 - бункер ретурта; 3 и 6 - шнековые питатели; 4 - газовая точка; 5 - сушилка со встречными струями; 7 - бункер сухого осадка; 8 - питатель сухого осадка; 9 - пневмотруба; 10 - классификатор; 11 - батарейный циклон; 12 - труба Вентури; 13 - скруббер; 14 - дымосос Д-13,5

Основной частью сушилки со встречными струями являются две разгонные трубы диаметром 350 мм, расположенные по одной оси. К наружным торцам труб примыкают две газовые топки. Внутренние торцы разгонных труб сушилки входят в смесительную камеру, над которой расположена пневмотруба диаметром 600 мм.

Разгонные трубы подсоединяются к шнековым питателям с помощью патрубков. Из бункера 1 влажный осадок двумя двухшнековыми питателями 3 вместе с ретуром, поступающим из бункера 2, подается в разгонные трубы сушилки. Сушильный агент – высокотемпературные дымовые газы температурой 600–800°С со скоростью 170–200 м/с – через сопловые отверстия на стыке топок с сушилкой поступает в разгонные трубы сушильной камеры и подхватывает влажный осадок. За счет ударного слияния двух встречных высокотемпературных высокоскоростных струй происходит диспергирование осадка и его интенсивная сушка.

Из сушильной камеры газозвесь по пневмотрубе поступает в классификатор, в котором частицы разделяются по фракциям и одновременно досушиваются. В наружном конусе классификатора выделяется крупная фракция осадка, которая возвращается в бункер 1 влажного осадка на досушку. Мелкая фракция осадка отделяется от газового потока в верхней части внутреннего конуса классификатора и транспортируется питателем 8 сухого осадка в бункер 7 сухого осадка и бункер 2 ретур. Готовый продукт из батарейного циклона БЦТ х 1 х 8 х 9 поступает в бункер 7 сухого осадка, откуда шнековым питателем 6 выгружается из установки.

Количество осадка, выгружаемого из классификатора в виде готового продукта или ретур, регулируется изменением угла поворота лопаток во внутреннем конусе классификатора. Для предотвращения вторичного загрязнения окружающей среды установка оборудована системой санитарной очистки, состоящей из трубы Вентури и центробежного скруббера диаметром 1700 мм.

Установка выполнена для помещений класса В11-а.

Оснащена необходимыми контрольно-измерительными приборами, средствами автоматического регулирования, блокировки, защиты и управления.

**Техническая характеристика установки  
для сушки осадков сточных вод**

Производительность, кг/ч:	
по испаренной влаге . . . . .	3500-5000
по сухому осадку . . . . .	1250-1900
Расход, м <sup>3</sup> /ч:	
природного газа . . . . .	550
воздуха . . . . .	16000
Установленная мощность электродвигателей, кВт . . . . .	69
Габаритные размеры, мм . . . . .	18000x7800x11300

При сушке с дезагрегацией, в основном, приходится иметь дело со сравнительно широкопористыми агрегированными дисперсными материалами, так как тонкопористые

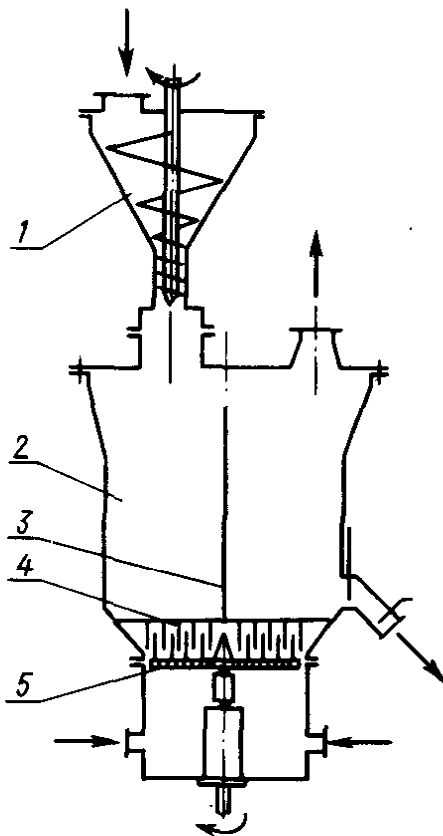


Рис. 17. Сушилка кипящего слоя с вращающейся решеткой конструкции МИТХТ им. Ломоносова: 1 - питатель; 2 - корпус сушилки; 3 - перегородка; 4 - неподвижная пластина с колками; 5 - вращающаяся беспровальная газораспределительная решетка с колками

материалы редко имеют повышенные когезионные свойства. Однако возможны случаи, когда после дезагрегации получают тонкопористые материалы, которые целесообразно досушивать в виброаэрокипящем или кипящем слое. В таких случаях рекомендуется разработанная МИТХТ им. Ломоносова сушилка кипящего слоя с вращающейся решеткой (рис. 17).

Отличительной особенностью этой сушилки является наличие вращающейся газораспределительной беспровальной перфорированной решетки с колками, которая в сочетании с укрепленной над ней неподвижной пластиной (также с колками) образует систему типа дисмембратора, способную дезагрегировать

влажные материалы, даже если они образуют довольно прочные комки. В пространство между двумя плитами газораспределительной решетки подается холодный воздух, предотвращающий перегрев поверхности верхней плиты выше температуры термодеструкции.

Воздух в сушилку подается через систему нагрева вентилятором высокого давления. Влажный продукт направляется на сушку шнековым питателем. Высушенный продукт выгружается в бункер, а уходящий из сушилки воздух обеспыливается в циклоне и выбрасывается в атмосферу хвостовым вентилятором. Пылеунос из сушилки сравнительно невелик. Температура в слое регулируется путем изменения подачи влажного материала посредством блокировки питателя с термопарой, измеряющей температуру слоя в непосредственной близости к распределительной решетке.

Данный аппарат целесообразно также применять при сушке волокнообразующих полимеров, близких по физико-механическим свойствам к пастообразным материалам. При этом вращающаяся решетка выполняет роль гранулятора.

НИИхиммашем разработана техническая документация и изготовлена сушильная установка такого типа для производства хлоркаучука.

## **ТИПОВЫЕ АППАРАТЫ И УСТАНОВКИ ДЛЯ СУШКИ ПАСТ, СУСПЕНЗИЙ И РАСТВОРОВ**

Сушка паст, суспензий и растворов в сушилках со взвешенным слоем связана с предварительным диспергированием этих материалов. Степень диспергирования может быть различной – от распыления до формования (в виде гранул или палочек). Диспергированный продукт подается в кипящий слой того же материала или в слой "инертного" материала (носителя), в качестве которого используются крошка фторопласта, стеклянные шарики и др.



Основные типовые аппараты для сушки пастообразных и жидких материалов – сушилки кипящего слоя периодического действия КСП, сушилки с инертным носителем СИН, а также сушилки кипящего или фонтанирующего слоя для обезвоживания и грануляции. Для формирующихся паст НИИхиммашем разработаны комбинированные вальцеленточные сушилки с повышенной герметичностью СВЛГ, а для специальных случаев (например, сушка каучуков типа "найрит" в ленте) – петлевые сушилки.

Сушилки типа КСП разработаны НИИхиммашем с учетом опыта эксплуатации аппаратов кипящего слоя периодического действия для сушки сыпучих материалов в многотоннажных производствах химической и химико-фармацевтической промышленности.

Сушилка (рис. 18) имеет камеру, которая установлена на тележке, что позволяет загружать и выгружать продукт вне корпуса сушилки. Камера с исходным продуктом вкатывается в нижнюю часть сушильной зоны, при помощи рычагов поднимается и соединяется с фильтром, расположенным в верхней части сушильной зоны. Фильтр представляет собой каркас из системы концентрических колец на штангах, на который натянут конус из стеклоткани ЧСФ (б) поверхностью  $20 \text{ м}^2$ . Фильтр периодически встряхивается. Частота вибраций 2800 кол/мин. Вибратор заключен в кожух с поддувом чистого воздуха или азота.

К сушильной зоне примыкает зона со вспомогательным оборудованием: вентилятором, паровыми калориферами и калориферами для ВОГ, позволяющими получать при необходимости воздух температурой до  $180-200^\circ \text{C}$ .

#### Техническая характеристика сушилки типа КСП

Загрузка, кг . . . . .	До 100
Объем камеры, $\text{м}^3$ . . . . .	0,286
Расход воздуха, кг/ч . . . . .	2650
Установленная мощность электродвигателей, кВт . . . . .	15,3
Диаметр решетки, мм . . . . .	700
Габаритные размеры, мм . . . . .	3900x2100x3850

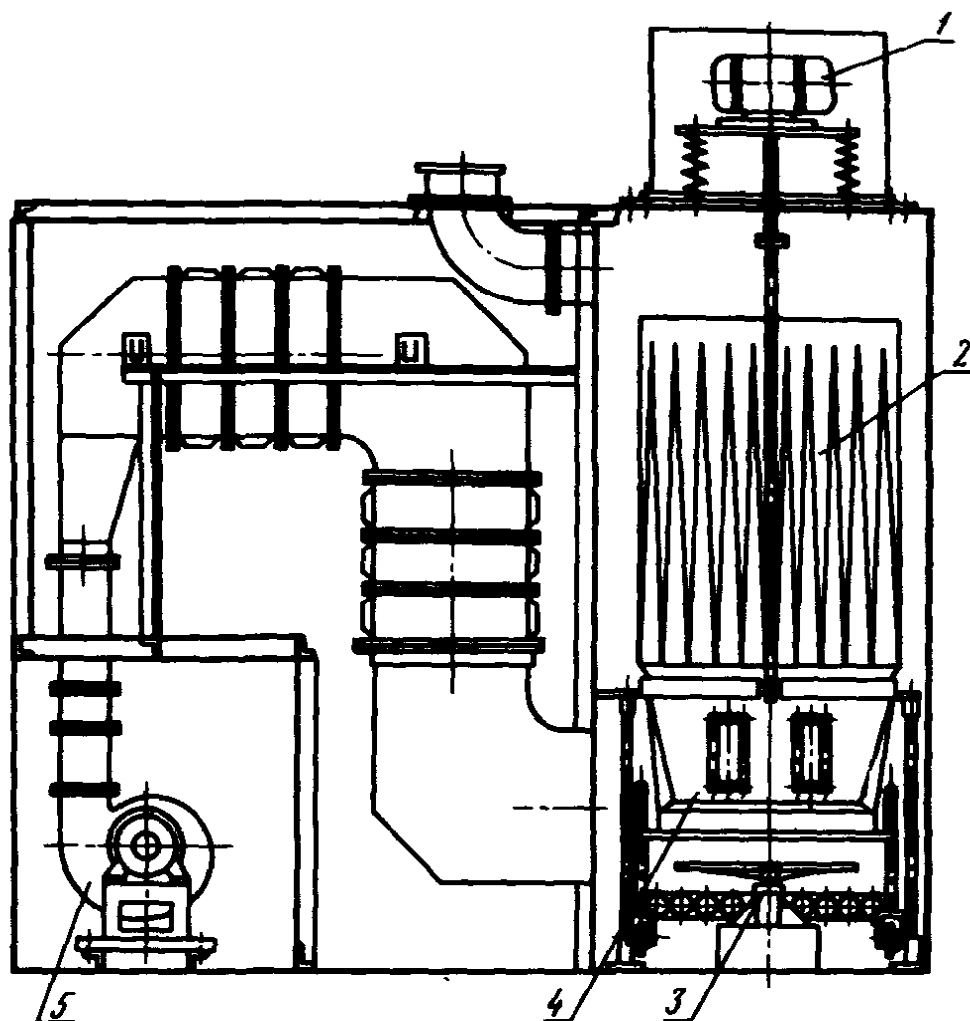


Рис. 18. Сушилка кипящего слоя периодического действия для сыпучих и пастообразных материалов:

1 - вибратор; 2 - фильтр; 3 - диск с отверстиями; 4 - камера на тележке; 5 - вентилятор

Установка предназначена для помещений класса ВIII-а, снабжена системой КИП и А.

Для возможности удаления органических растворителей или сушки от воды взрывоопасных продуктов сушилка комплектуется конденсатором для работы ее в замкнутом цикле азота или воздуха.

Сушилка КСП рекомендуется для анилино-красочной, лакокрасочной, химико-фармацевтической и других отраслей промышленности, имеющих дело с рассыпающимися в процессе сушки отформованными пастами.

Если пастообразные материалы при формовании дают прочные, не рассыпающиеся в процессе сушки гранулы

или палочки, их целесообразно сушить на вальцеленточных сушилках, являющихся практически безуносными аппаратами. На рис. 19 показана схема вальцеленточной сушилки с сопловым обдувом СВЛГ, характеризующейся повышенной герметичностью, необходимой в производстве пылящих тонкодисперсных красителей и аналогичных им формирующихся пастообразных материалов.

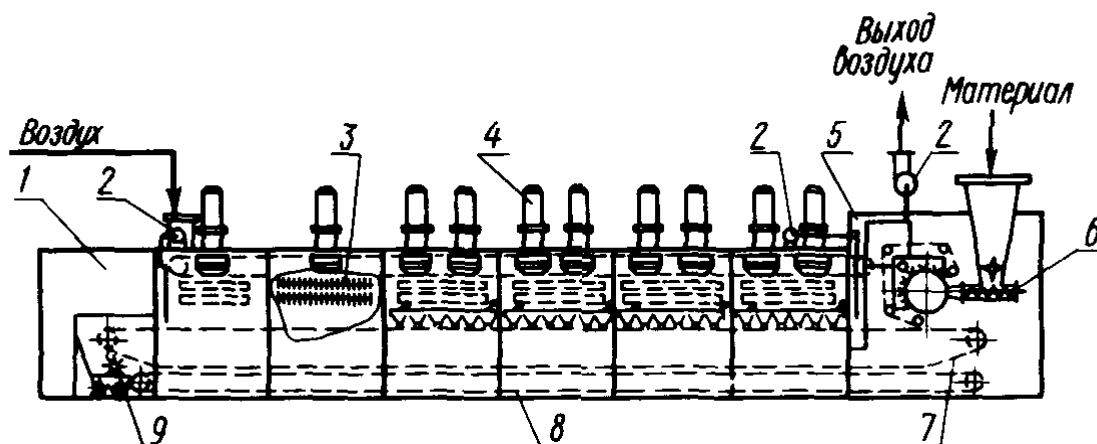


Рис. 19. Вальцеленточная герметизированная сушилка СВЛГ:  
 1 - корпус сушилки; 2 - вентиляторы; 3 - калориферы; 4 - рециркуляционный вентилятор; 5 - загрузочная камера с валом; 6 - шнековый питатель; 7 - пластинчатый конвейер; 8 - скребковый транспортер; 9 - разгрузочный шнек

Герметизированная сушилка СВЛГ состоит из ленточной части и загрузочной камеры с валом горячего формования.

Пастообразные материалы шнековым питателем вмазываются в канавки вращающегося вала диаметром 800 мм. Вал обогревается паром. В отличие от ранее выпускавшихся вальцеленточных сушилок вал в верхней части снабжен устройством соплового обдува для интенсификации сушки и лучшей отдувки испарившейся влаги. Специальными ножами, расположенными в нижней части вала, продукт вынимается из канавок и попадает непосредственно на пластинчатый конвейер ленточной части сушилки. Ширина конвейера 1200 мм.

Сушилка состоит из шести секций длиной по 2 м каждая, но, по желанию заказчика, может состоять из 3-8 секций.

Ленточная часть имеет рециркуляционные вентиляторы и встроенные калориферы. Под конвейером расположен скребковый транспортер для удаления просыпи. Над лентой в секциях (за исключением двух последних) расположены узлы соплового обдува. Предусмотрены узлы герметизации на входе и выходе конвейера из корпуса и повышенная надежность уплотнения щитов теплоизоляции.

Детали, соприкасающиеся с продуктом, изготовлены из стали X18H10T.

**Техническая характеристика вальцеленточной сушилки  
с сопловым обдувом СВЛГ**

Производительность по испаряемой влаге, кг/ч . . . . .	До 800
Скорость вращения вальца, об/мин . . . . .	0,125-0,333
Скорость движения конвейера, м/ч . . . . .	1,5-9
Температура в сушилке, °С . . . . .	120
Поверхность нагрена калориферов, м <sup>2</sup> . . . . .	590
Установленная мощность электродвигателей, кВт . . . . .	62

Сушилка комплектуется системой КИП и А и может быть укомплектована группой из шести циклонов ЦН-15 диаметром 500 мм.

Сушилка предназначена для помещений класса ВII-а.

Жидкие массы можно сушить и существенно отличным от описанного методом. Так, большая группа каучуков, полученных методом вымораживания (каучуки типа "найрит"), в процессе вымораживания на барабане образует непрерывную ленту и в таком виде подается на сушку. Для таких материалов НИИхиммашем разработана петлевая сушилка с сопловым обдувом (рис. 20).

В корпусе сушилки расположен петлевой конвейер, движущийся со скоростью 6,6-20 м/мин; на штангах конвейера находится лента высушиваемого продукта (применительно к каучуку "найрит" толщина ленты 0,2 мм) В петлях конвейера располагаются короба соплового обдува. Воздух нагревается в калориферах и рециркулирует в сушилке при помощи встроенных вентиляторов.

**Техническая характеристика петлевой сушилки  
с сопловым обдувом**

Производительность, кг/ч . . . . .	750
Влажность продукта, %:	
начальная . . . . .	22-25
конечная . . . . .	0,4-0,8

Общая поверхность нагрева калориферов, м <sup>2</sup> . . . . .	4730
Установленная мощность электродвигателей, кВт . . . . .	154
Габаритные размеры, мм . . . . .	27100x7510x5615
Масса, кг . . . . .	112700

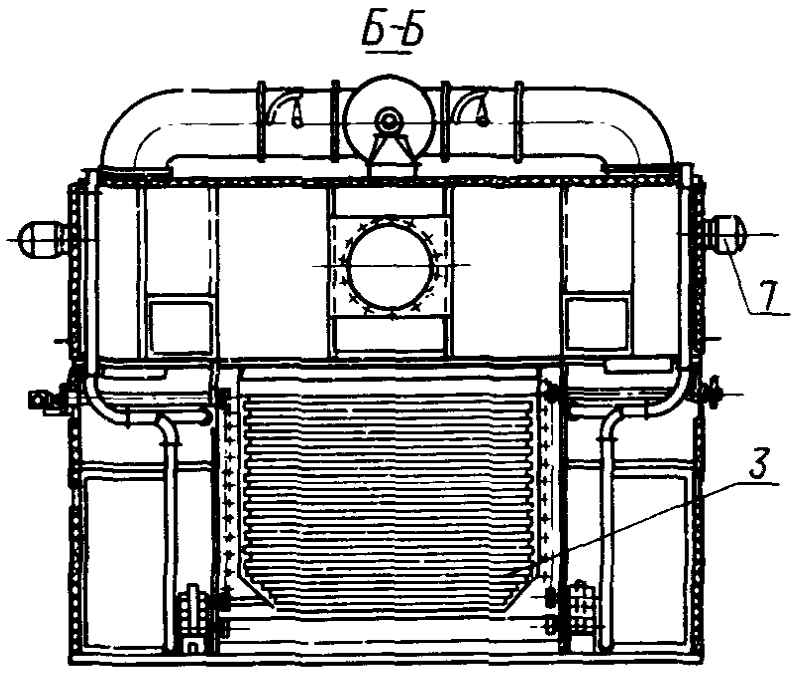
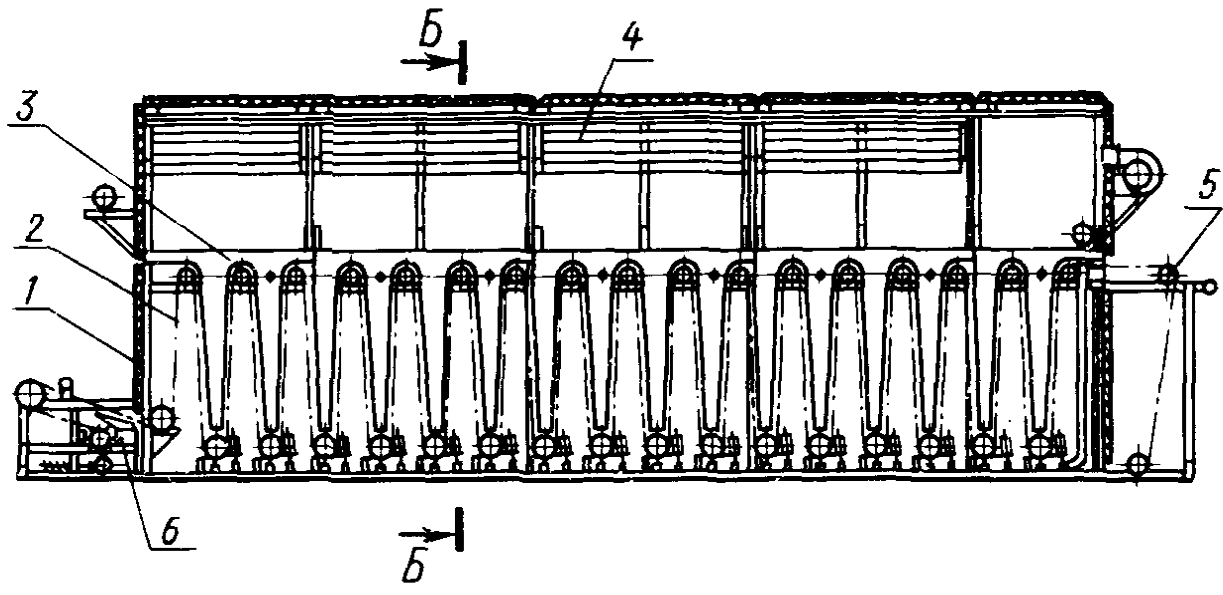


Рис. 20. Петлевая сушилка для сушки матернала в ленте:  
 1 - корпус; 2 - петлевой конвейер; 3 - короб соплового обдува; 4 - калориферы; 5 - приводная станция; 6 - станция натяжения; 7 - вентиляторы

Основным типом аппарата для сушки суспензий и растворов, а также некоторых пастообразных материалов в мало- и среднетоннажных производствах является сушилка с фонтанирующим слоем инертного носителя (СИИ), разработанная НИИхиммашем на базе исследований и конструктивных разработок ЛТИ им. Ленсовета<sup>\*</sup>, МИХМа<sup>\*\*</sup>, НИОПиКа<sup>\*\*\*</sup> и некоторых других организаций и предприятий химической промышленности.

Установка типа СИИ (рис. 21) включает в себя газовую топку с газомазутной горелкой. Диаметр камеры

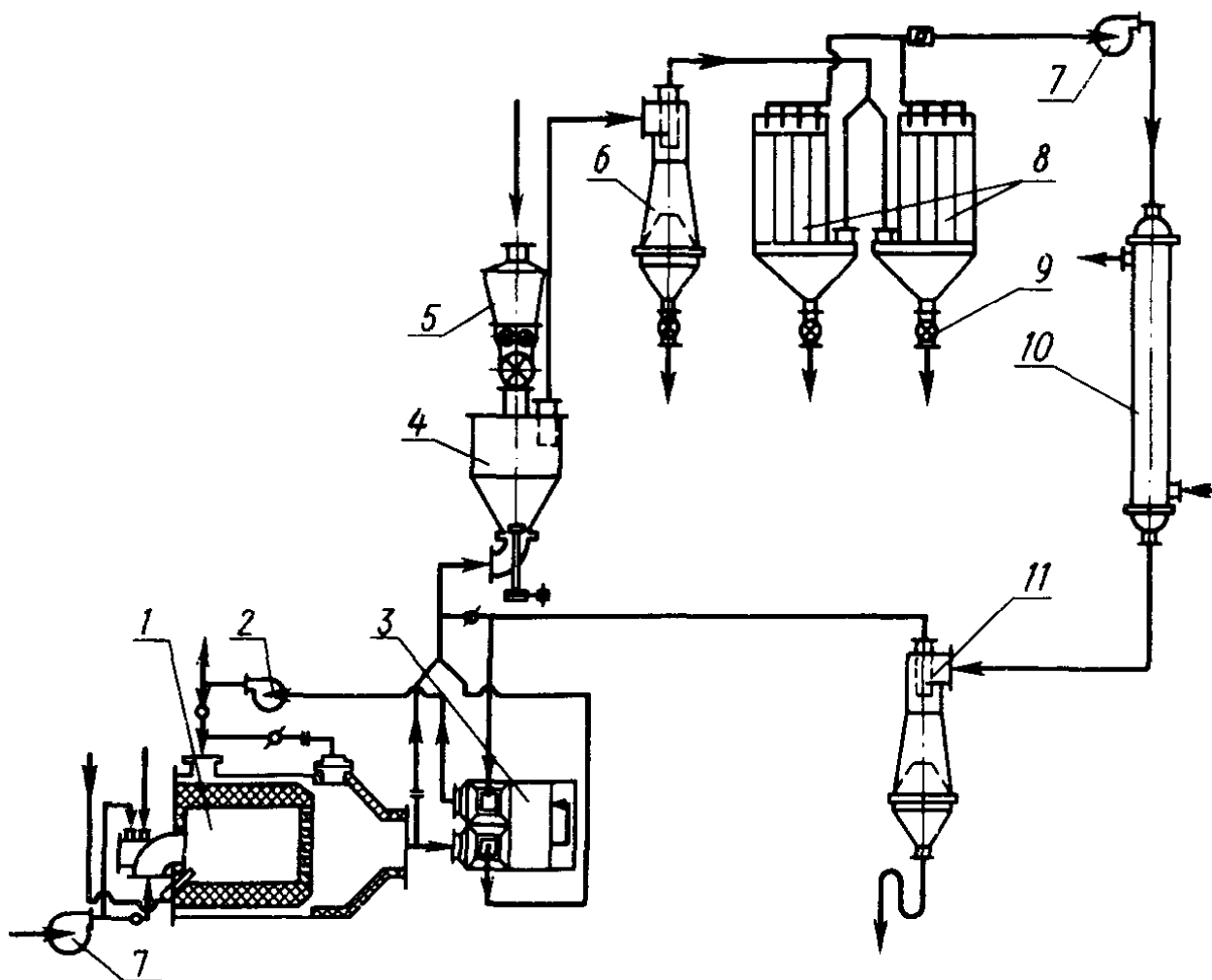


Рис. 21. Установка типа СИИ для сушки паст, суспензий и растворов на инертном носителе:

- 1 - газовая топка; 2 - дымосос; 3 - теплообменник; 4 - сушилка фонтанирующего слоя с мешалкой; 5 - питатель с бункером для паст; 6 и 11 - циклоны с обратным конусом; 7 - вентилятор; 8 - рукавный фильтр; 9 - секторный затвор; 10 - конденсатор

\* Авт. свид. № 139247.

\*\* Авт. свид. № 124366.

\*\*\* Авт. свид. № 222958.

сгорания 1000 мм, наружный диаметр корпуса топки 1620 мм, длина 5300 мм. Дымовые газы из топки поступают в газоседушный четырехсекционный теплообменник, либо непосредственно в сушилку. Сушилка фонтанирующего слоя цилиндро-коническая объемом 6 м<sup>3</sup> с цилиндрической частью диаметром 2000 мм и решеткой диаметром 500 мм. Над решеткой расположена горизонтальная двухлопастная мешалка с числом оборотов в минуту 100, 125 и 150.

На решетку насыпается инертный носитель, например фторопластовая крошка. Ввод газа через нижний газоподвод и решетку, вывод — через сетчатую корзину, предотвращающую вынос инертного носителя. Корзина установлена на крышке аппарата под штуцером выхода газа. Стратифицированный теплоноситель выносится в циклон 6 с обратным конусом и далее в рукавные фильтры типа ФРУ-50 поверхностью фильтрации 50 м<sup>2</sup> каждый. Фильтр имеет механизм для периодического встряхивания секций.

При работе установки в замкнутом цикле азота (или воздуха) последний направляется в конденсатор для охлаждения и конденсации паров воды или растворителя. Циклон 11 с обратным конусом, установленный после конденсатора, служит для улавливания сконденсировавшейся влаги. После него теплоноситель поступает в теплообменник.

Установка может быть оснащена питателем с бункером для паст или блоком пневматических форсунок для подачи суспензий и растворов.

Питатель для паст — лопастного типа с перфорированным дном. Бункер снабжен двумя Z-образными мешалками, предотвращающими залегание пасты и обеспечивающими ее непрерывную подачу к ротору питателя. Привод питателя снабжен цепным вариатором, позволяющим дозировать питание сушилки исходной пастой.

В комплект установки входят вентилятор Ц10-28 № 3 для подачи воздуха в топку, дымосос Д8 для отсоса дымовых газов из топки и подачи части их на рециркуляцию в топку и газодувка ТГ-150-1,12 для циркуляции теплоносителя в контуре установки либо для выброса его в атмосферу (при работе в разомкнутом контуре).

При сушке воздухом или дымовыми газами вместо газодувки можно устанавливать вентилятор ЦВ-18 № 8.

Все детали аппаратов и газоходов, соприкасающиеся с продуктом и циркулирующим теплоносителем, изготовлены из нержавеющей стали.

Техническая характеристика установки типа СИН

Производительность по испаренной влаге, кг/ч . . . . .	250-300
Влажность продукта, %:	
начальная:	
паст. . . . .	30-70
суспензий . . . . .	70-75
конечная . . . . .	1-3
Температура теплоносителя, °С:	
в сушилке:	
на входе . . . . .	160-250
на выходе . . . . .	70-110
после теплообменника (конденсатора) . . . . .	30
Расход:	
газообразного топлива, м <sup>3</sup> /ч. . . . .	40-80
воздуха (азота), кг/ч . . . . .	7000-8500
оборотной воды (температурой 25°С), м <sup>3</sup> /ч . . . . .	До 35

Топка с теплообменником должны быть расположены в отдельном помещении; здесь же помещается главный щит КИП и А. Остальное оборудование находится в помещении класса ВП-а. Имеется вспомогательный щит с приборами для текущего технологического контроля, который располагается вблизи сушилки. Установку можно размещать в здании высотой 18 м площадью около 150 м<sup>2</sup>.

В последние годы получила широкое распространение техника обезвоживания и грануляции в аппаратах с кипящим и фонтанирующим слоем. Рядом организаций (НИУИФ, МИХМ, ЛТИ им. Ленсовета и др.) разработаны интересные и перспективные конструкции таких аппаратов [7]. Обобщая опыт, накопленный отечественными организациями, НИИхиммаш разработал два типоразмера универсального типового аппарата\* для обезвоживания и грануляции материалов различных групп. Схема одной из разработанных установок показана на рис. 22.

\* Авт. свид. № 201233.



Основным аппаратом установки является сушилка-гранулятор, в которой раствор упаривается, кристаллизуется, образуются гранулы и досушиваются до заданной влажности. Суспензия или раствор с потоком высокотемпературного теплоносителя (температурой до  $700-800^{\circ}\text{C}$ ) подается в сушилку через 12 нижних и 8 верхних сопл.

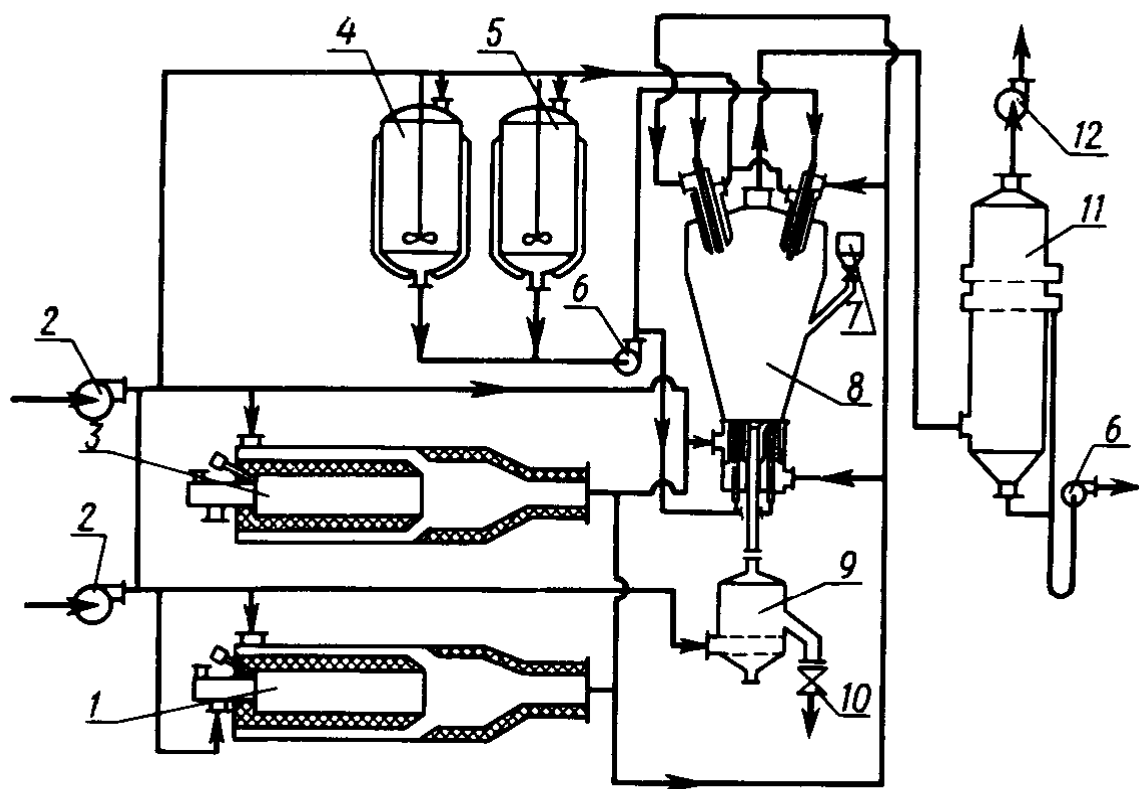


Рис. 22. Установка для сушки и грануляции суспензий и растворов:  
 1 и 3 - газовые топки; 2 - воздуходувка; 4 и 5 - емкости с мешалками; 6 - насос; 7 - бункер; 8 - сушилка-гранулятор; 9 - бункер-охладитель; 10 - секторный затвор; 11 - пейный газоочиститель; 12 - дымосос

Нижние сопла проходят сквозь газораспределительную и поддерживающую решетки, под которые поступает теплоноситель с температурой, допустимой для сушки гранул продукта в кипящем слое. Готовые гранулы выгружаются в бункер, охлаждаемый холодным воздухом.

Регулируя количество охлаждающего воздуха, поступающего затем в сушилку по выгрузному патрубку, путем сепарации можно получать в бункере гранулы определенного размера.

Воздух нагревается в топках и одна часть поступает без разбавления в форсунки; с частичным разбавлением в кипящий слой. Суспензия к форсункам подается насосом 1/2Х-6к из емкостей с мешалками объемом 4 м<sup>3</sup>, работающих попеременно.

Установка снабжена бункером для загрузки гранул в сушилку. Готовый продукт выгружается через секторный затвор. Отработанный теплоноситель очищается от пыли в пенном газоочистителе, в качестве которого использован двухполочный пенный газоочиститель ПГС-ЛТИ-П-16 производительностью 16000 м<sup>3</sup>/ч (конструкции института "Гипрогазоочистка"). Кроме того, установка имеет две воздуходувки В2М10/1250, дымосос Д12, систему КИП и А, запорную и регулируемую аппаратуру.

Опытно-промышленный образец установки для обезвоживания и грануляции производительностью по испаренной влаге 2 т/ч, изготовленный Бердичевским заводом химического машиностроения "Прогресс", находится в стадии внедрения. Однако в связи с относительной сложностью таких установок и повышенной стоимостью их производство будет рентабельно лишь при массовом выпуске. В настоящее время целесообразно для каждой группы материалов применять предназначенные для этой группы аппараты более простых конструкций: для гигроскопических материалов аппараты РКСГ конструкции НИУИФ, для термостойких материалов аппараты конструкции ВНИИГ, для расплавов аппараты конструкции МИХМ, для термочувствительных материалов аппарат упрощенной конструкции, показанный на рис. 22 (без верхних сопл), соответствующей конструкции, предложенной ранее одним из химических комбинатов [7].

Рассмотренные в данном разделе типовые аппараты и установки для сушки паст, суспензий и растворов предназначены для малотоннажных и среднетоннажных производств химической и смежных с ней отраслей промышленности. Для того чтобы применять их в более мощных производствах, необходимо решить проблему масштабного перехода, что связано с трудностью оценки реальной производительности и оптимальных режимов сушки, кроме того, при

этом наблюдается вырождение таких гидродинамических режимов, как кипящий и фонтанирующий слой в плотной фазе (появляются неустойчивость, гидродинамическая неоднородность, локальное выпадение твердой фазы и т. п.). Поэтому, когда необходима более высокая производительность, следует ориентироваться на сушилки других типов. В частности, для формирующихся пастообразных материалов рекомендуются ленточные сушилки с питателями для паст, например, СЛ-2850ВТ\*.

НИИхиммашем проводятся работы по увеличению производительности по испаренной влаге ленточных сушилок СЛ-2850ВТ с 1500 до 3000 кг/ч с применением соплового обдува. Для сушки в многотоннажных производствах суспензий и растворов НИИхиммашем рекомендуются распылительные сушилки большой единичной мощности (до 2.0 т/ч по испаренной влаге)\*.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТИПОВЫХ АППАРАТОВ СО ВЗВЕШЕННЫМ СЛОЕМ МАТЕРИАЛА**

Одна из основных целей при разработке новых сушилок — обеспечение эффективной и надежной работы сушильной установки. Надежность сушилки, как и любого оборудования, характеризуется временем непрерывной работы при сохранении всех технологических и эксплуатационных показателей, а также ресурсом времени между ремонтами (текущим, средним, капитальным). Эффективность определяется технико-экономическими показателями работы сушилки при успешном решении технологической задачи — получении требуемой остаточной влажности при сохранении или улучшении качества готового продукта. Все показатели на стадии сушки конкретного продукта зависят от правильности выбора метода и режима сушки, типа сушилки.

---

\* Каталог "Сушильные аппараты и установки", М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1972.

Сушка во взвешенном слое является одним из эффективных методов для дисперсных материалов с частицами размером до 2 мм при критическом диаметре пор не менее 20 А, а также для диспергируемых материалов, образующих в процессе сушки пористые структуры.

Учитывая состояние разработок по реализации типовых аппаратов со взвешенным слоем материала, следует констатировать, что для кусковых и гранулированных тонкопористых материалов применение взвешенного слоя нецелесообразно по экономическим соображениям; взрывоопасные, взрывчатые, пожароопасные, токсичные и т. п. продукты в большинстве случаев целесообразно высушивать в вакуумных сушилках, а суспензии и растворы при требуемой единичной мощности сушки более 1 т/ч – в распылительных сушилках.

Номенклатура сушилок, выпускаемых заводами химического машиностроения (кроме сушилок со взвешенным слоем), представлена в каталоге\*. При выборе сушилки со взвешенным слоем материала следует руководствоваться разработанными НИИхиммашем РТМ\*\*, а также данными настоящего обзора.

Учитывая важность определения структурно-сорбционных характеристик материалов для правильного определения группы продукта и выбора типового аппарата с активным гидродинамическим режимом, НИИхиммашем разработаны соответствующие методики.

Кроме технологической эффективности, важна целесообразность конструкции аппарата с учетом особенностей химического машиностроения. Основными критериями служат простота конструкции и ее технологичность, серийность, максимальная унификация узлов и деталей, отсутствие дефицитных материалов и покупных изделий, относительно

---

\* Каталог "Сушильные аппараты и установки", М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1972.

\*\* РТМ 2601-7207 "Применение сушилок взвешенного слоя. Классификация. Типы и основные размеры", 1967.

небольшие габариты, Кроме того, исходя из общих требований к продукции машиностроения, сушильные аппараты и соответствующие установки должны иметь низкую металлоемкость, высокий уровень автоматизации и занимать небольшие площади производственных помещений.

В ближайшие годы совершенствование типовых сушилок со взвешенным слоем материала должно идти по пути модернизации типовых аппаратов и разработки принципиально новых решений, позволяющих создать базу для второго "поколения" типовых сушилок со взвешенным слоем материала.

Модернизацию типовых аппаратов следует понимать не только как улучшение конструкции отдельных узлов, обеспечивающее повышение технологической эффективности аппарата и уровня унификации, но и как задачу дальнейшего сокращения числа типоразмеров типовых сушилок для увеличения серийности выпускаемого оборудования с учетом имеющихся мощностей машиностроительных заводов. При этом надо иметь в виду, что себестоимость оборудования также находится в прямой зависимости от его серийности.

Комбинированные аппараты, предназначенные для сушки продуктов второй группы (КЦС, КАС или их отдельные ступени), можно с достаточной технологической эффективностью применять для высоковлажных материалов первой группы, поэтому целесообразно сокращать число типоразмеров одноступенчатых и двухступенчатых труб-сушилок с тем, чтобы для сушки материалов первой группы по мере увеличения адгезионно-когезионных коэффициентов можно было применять циклонные сушилки типа ЦС (вторая ступень сушилок КЦС), аэрофонтанные сушилки типа АС (вторая ступень сушилок КАС) и, наконец, для наиболее высоковлажных и комкующихся материалов со свободной и слабосвязанной влагой - первую ступень аппаратов КЦС и КАС (подсушиватель). При этом необходимо иметь в виду, что подсушиватель (цилиндро-конический аппарат с мешалкой с полным выносом высушенного продукта) при перестановке сетки из цилиндрической части в конус, служащий в подсушивателе газоходом, может одновременно

являться малым типоразмером аппарата типа СИН для сушки паст, суспензий и растворов на инертном зернистом материале (носителе) при условии разработки типового решения узла мешалки и сменных узлов подачи продукта (форсунка для жидкостей, питатель для пастообразных или комкующихся материалов).

Можно также заниматься унификацией типоразмеров камер дисковых вихревых сушилок типа ВС и СВИ, т. е. без измельчителей (для дисперсных материалов третьей группы) и со встроенными измельчителями. При этом должен быть проработан вопрос выпуска аппаратов ВС и СВИ отдельно и в комбинации с ЦС, так как циклонные сушилки с вихревой камерой (подобные разработанной для сушки полиэтилена высокой плотности от бензина) наряду с увеличением интенсивности имеют значительно более широкую область применения, чем обычные циклонные сушилки.

При проведении всех работ по унификации аппаратов, их узлов и деталей необходимо исходить из вышеизложенных критериев целесообразности.

Типовой аппарат должен обладать большой маневренностью. При этом нужно учитывать не только возможную неоднородность свойств разных партий одного и того же продукта в одном или различных производствах, а весь спектр изменения свойств материалов как объектов сушки, входящих в большую технологическую группу (по крайней мере несколько сотен наименований), для которой разрабатывается типовой аппарат.

К типовому аппарату должны также предъявляться следующие основные технологические требования: стабильность гидродинамического режима, в том числе в аппаратах большой единичной мощности; возможность моделирования и масштабирования во всем диапазоне требуемых производительностей; безопасность работы, в том числе в отношении статического электричества; соответствие гидродинамической модели технологической задаче сушки в отношении среднего времени пребывания и спектра времени пребывания частиц в аппарате; возможность полной автоматизации сушильной установки; высокая интенсивность сушки.

Если новая конструкция отличается от типовой при всех прочих равных показателях, например, бóльшей интенсивностью процесса (даже в 2–3 раза), этого явно недостаточно, чтобы принять ее за новую типовую сушилку. Необходимо отметить, что если в течение последних 10–15 лет независимо от метода сушки главным вопросом была интенсивность процесса, то теперь это не имеет такого решающего значения, главным образом потому, что с появлением активных гидродинамических режимов проблему интенсивности процесса (в пределах области применения активных гидродинамических режимов), можно считать решенной, так же как и вопрос гидродинамической устойчивости работы сушилок со взвешенным слоем материала.

Однако, например, вопрос увеличения предельной единичной мощности сушильного аппарата является и сейчас почти столь же актуальным. На первый план выдвигается проблема создания безуносных аппаратов большой тепловой мощности с активными гидродинамическими режимами. Дело в том, что решение задачи повышения интенсивности процесса сушки привело к весьма значительному уменьшению габаритов сушильного аппарата и некоторому увеличению габаритов комплектующего оборудования (главным образом, системы улавливания). Создалось положение, при котором основная площадь производственного помещения, занимаемая установкой, приходится на комплектующее оборудование и, прежде всего, на систему улавливания. Упрощение или исключение системы улавливания даст весьма большие экономические выгоды как машиностроительным заводам, так и химическим предприятиям, эксплуатирующим сушильное оборудование.

Поэтому второе поколение типовых сушилок со взвешенным слоем материала принципиально должно отличаться от первого поколения типовых сушилок тем, что при равных или близких показателях это должны быть повышенной надежности безуносные аппараты большой тепловой мощности (или с весьма малым выносом пылевой фракции из аппарата). Из имеющихся типовых сушилок таким требованиям (но не в полной мере) удовлетворяют только аппараты ВКС, которые могут перейти во второе поколение типо-

вых аппаратов со взвешенным слоем материала только при условии дальнейшего снижения уноса пылевой фракции и, что самое главное, резкого повышения тепловой мощности сушилки.

Особое место в отношении перспектив развития занимают аппараты типа СИН для сушки паст, суспензий и растворов на инертном носителе. Учитывая, что их интенсивность в десятки раз превышает интенсивность распылительных сушилок, единичная производительность которых достигает 35 т/ч по исходному продукту (до 20 т/ч по сухому продукту), а концентрация подаваемой пульпы в пересчете на сухое вещество может быть значительно большей у сушилок типа СИН, чем у распылительных сушилок, основной задачей в развитии сушилок типа СИН является значительное повышение их единичной мощности. Если единичную мощность сушилок СИН удастся довести до 20 т/ч и более, они могут быть включены в число типовых сушилок со взвешенным слоем второго поколения. Идти по пути увеличения диаметра цилиндро-конического аппарата СИН для увеличения его единичной мощности нецелесообразно, ибо фонтанирующий слой при увеличении диаметра аппарата теряет гидродинамическую устойчивость. ЛТИ им. Ленсовета и другими организациями предложен ряд способов увеличения единичной мощности аппаратов типа СИН (применение батарей из цилиндрических и призматических элементов, значительное утяжеление инертной насадки за счет увеличения размеров частиц и выбора материалов с большой удельной плотностью с целью резкого увеличения количества подводимого газа и тепла и др.). Все эти предложения заслуживают развития.

ИТМО АН БССР и НИИхиммашем предложены новый способ и конструкция аппарата для сушки на инертном носителе, позволяющие реализовать сколь угодно большую единичную мощность сушилки. Способ заключается в использовании замкнутого кольцевого (или другой конфигурации) контура с направленно перемещающимся за счет пневмомеханического устройства фонтанирующим слоем инертного материала. Аппарат имеет зоны орошения и сушки, что позволяет исключить многократное увлажнение под-



сохшего продукта за счет напыления на него новых порций исходного продукта, имеющее место в типовой сушилке СИН и известных модификациях аппаратов такого типа. За счет рациональной гидродинамики (по гидродинамической модели сушилка близка к аппарату идеального вытеснения) создается возможность значительного увеличения удельной производительности по испаренной влаге, а за счет неограниченного увеличения площади решетки при новом способе организации процесса создается возможность создания аппарата сколь угодно большой единичной производительности.

Что касается проблемы значительного повышения тепловой мощности сушилок типа ВКС, это может быть достигнуто, например, с помощью погруженных в слой поверхностей нагрева. Среди новых разработок НИИхиммаша для сушки полиолефинов имеется сушилка взвешенного слоя с вибрирующими поверхностями нагрева, погруженными в слой (рис. 23). Эта сушилка имеет в 3–4 раза большую

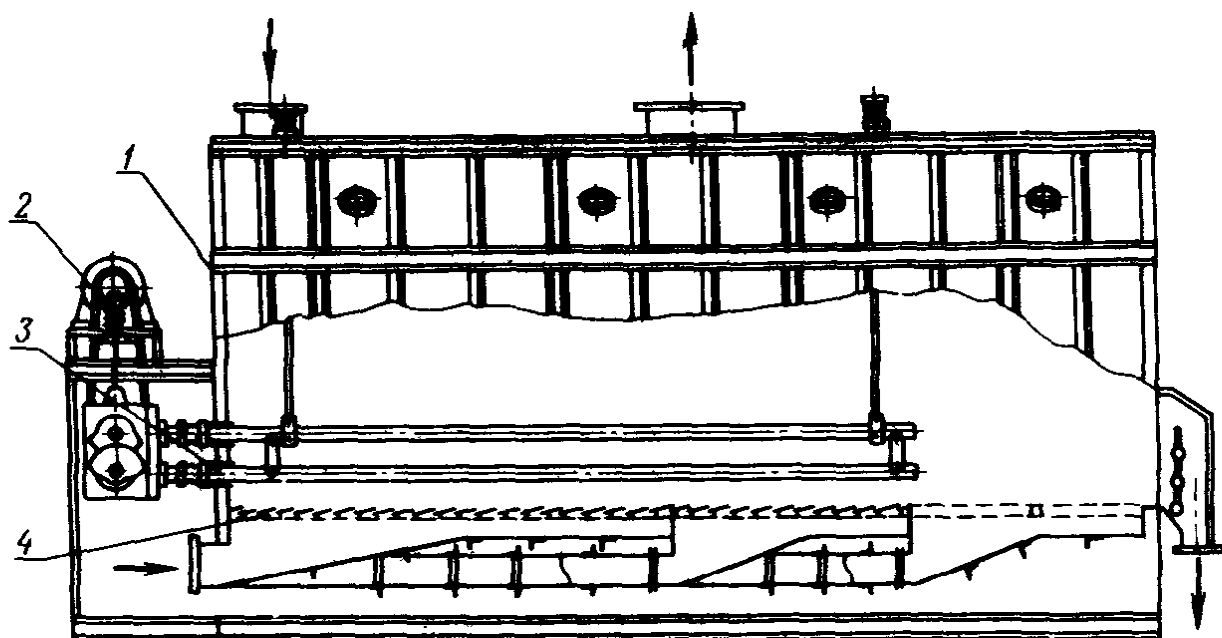


Рис. 23. Сушилка кипящего слоя с вибрирующими поверхностями нагрева:  
 1 - корпус сушилки; 2 - вибратор; 3 - теплообменные поверхности; 4 - распределительная решетка

тепловую мощность, чем аналогичная сушилка без поверхностей нагрева. Учитывая существенную роль вибрирующих поверхностей нагрева и газа в создании псевдооживленного слоя, данную сушилку можно отнести к числу аппаратов с виброаэрокипящим слоем.

Сушилка имеет решетку площадью  $1 \times 8 \text{ м}^2$ , разделенную на три зоны с индивидуальным подводом теплоносителя: первая зона —  $1 \times 4 \text{ м}^2$ , вторая зона —  $1 \times 2 \text{ м}^2$  и третья зона —  $1 \times 2 \text{ м}^2$ . Над первой и второй зонами на высоте 220 мм над решеткой расположены вибрирующие коллекторы с оребренными трубами общей поверхностью нагрева  $40 \text{ м}^2$ . Коллекторы укреплены в сушилке на подвесках, позволяющих совершать колебания коллекторов вдоль сушилки. Ввод поверхностей в сушилку герметизируется с помощью сильфонов. Горизонтальные колебания поверхностям нагрева сообщаются двухвальным вибратором направленного действия для увеличения интенсивности теплоотдачи и предотвращения налипания материала на теплообменные поверхности (при этом вблизи поверхностей создаются зоны локального псевдооживления).

Мощность привода вибратора 7,5 кВт, скорость вращения 3000 об/мин. Частота колебаний от 28 до 38 Гц обеспечивается сменными шкивами. Габаритные размеры сушилки 9130 x 2170 x 4000 мм. Тепловая мощность сушилки при температуре воздуха и поверхностей нагрева  $160^\circ\text{С}$  до 1 млн. ккал, причем до 80% этой мощности обеспечивается погруженными в слой вибрирующими поверхностями нагрева. Дальнейшее развитие этого направления с целью создания типовой сушилки второго поколения представляется весьма перспективным.

Основным требованием, предъявляемым к типовым сушилкам с активными гидродинамическими режимами второго поколения, как уже было указано, является отсутствие выноса высушенного продукта из аппарата. Примером безуносных сушилок с активными гидродинамическими режимами являются разработанные НИИхиммашем аппараты со встречными закрученными потоками СВЗП. Схема пилотного образца сушильной установки с аппаратом СВЗП представлена на рис. 24.

Установка состоит из сушилки диаметром 250 мм, винтового питателя с эжектором, бункера для готового продукта, фильтра, вентиляторов (для подачи первичного и вторичного воздуха, выброса отработанного воздуха и

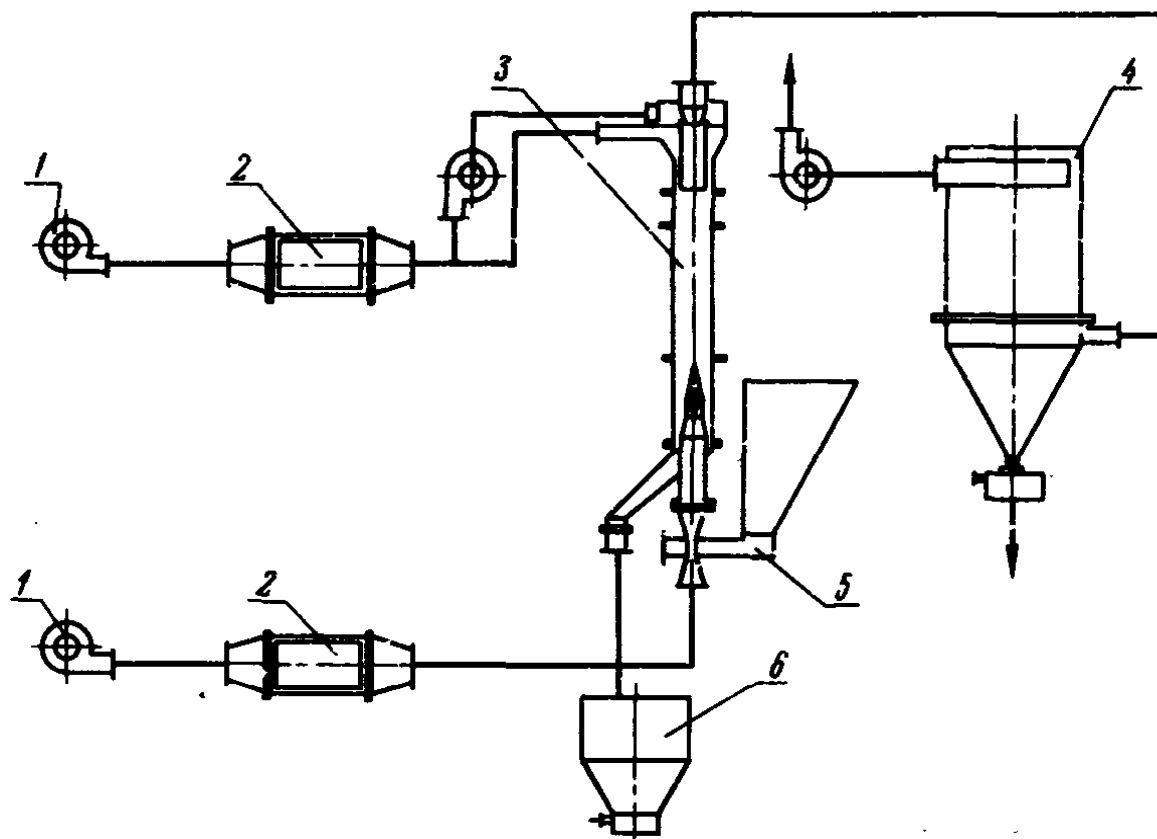


Рис. 24. Установка сушилки со встречными закрученными потоками:  
1 - вентиляторы; 2 - калориферы; 3 - сушилка; 4 - фильтр; 5 - питатель; 6 - бункер готового продукта

обеспечения частичной рециркуляции теплоносителя), а также электрокалориферов (выбор системы нагрева теплоносителя обусловлен экспериментальным назначением установки). В схему установки не включены аппараты сухого пылеулавливания первой и второй ступени, так как степень улавливания высушенного продукта самим сушильным аппаратом выше, чем тловыми циклонными пылеуловителями. Фильтр поставлен на период экспериментальных работ для фиксации степени улавливания материала при разных режимах сушки и санитарной очистки отходящего воздуха.

Расход воздуха (первичного и вторичного) в установке до  $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$  по каждому из каналов. Температура нагрева теплоносителя по каналам до  $200^\circ\text{C}$ . Производительность сушильной установки по испаренной влаге до  $100 \text{ кг}/\text{ч}$ .

Сушильный аппарат СВЗП-250 представляет собой цилиндрическую камеру диаметром 250 мм и высотой 1900 мм, к нижней части которой крепится воздуховод для первичного воздуха с завихрителем на выходе (материал подается в воздуховод первичного воздуха на участке до входа в сушильный аппарат). К верхней части цилиндрической камеры крепится завихритель вторичного воздуха. Высушенный продукт выгружается из нижней части сушильной камеры. Производительность сушилки при степени улавливания более высокой, чем у типовых циклонных пылеуловителей конструкции НИОГАЗа, не уступает производительности лучших образцов известных сушилок с активными гидродинамическими режимами.

В сушилках со встречными закрученными потоками, как показали экспериментальные исследования НИИхиммаша, можно успешно обрабатывать тонкодисперсные материалы первой и второй групп, а при установке на входе в центральный канал вихревой головки такие сушилки можно использовать и для сушки материалов первой подгруппы третьей группы.

Еще один вопрос, над которым целесообразно работать, — это пофракционная сушка полидисперсных материалов для тех случаев, когда методы сушки с измельчением по технологическим требованиям неприемлемы. При решении этого вопроса можно рекомендовать широко использовать технику закрученных потоков в сочетании с осциллирующими по скоростям и температурам режимами сушки и комбинированными методами подвода тепла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы успешно развивается техника во взвешенном слое материала. Первоначальную реализацию она получила в сушилках с кипящим слоем. Однако ряд недостатков кипящего слоя (гидродинамическая неустойчивость при сушке высоковлажных материалов, большой спектр времени пребывания частиц в аппарате, образование значительных зарядов статического электричества при сушке многих, например, полимерных материалов) обусловил появление различных модификаций кипящего слоя, а также разработку новых гидродинамических режимов взвешенного слоя. Сушилки с активными гидродинамическими режимами надежны в работе, маневренны, имеют высокие технико-экономические показатели.

Учитывая, что сушилки с активными гидродинамическими режимами наряду с бесспорными достоинствами имеют некоторые недостатки (высокий процент уноса высушенного продукта из аппарата и повышенный расход сушильного агента), перспективы дальнейшего развития техники сушки во взвешенном слое связаны не только с модернизацией и унификацией узлов разработанных типовых аппаратов, но и с разработкой типовых безуносных аппаратов и аппаратов с малыми удельными расходами газа.

Примерами таких сушилок могут служить аппараты со встречными закрученными потоками для сушки и одновременного улавливания высушенного продукта, а также аппараты с комбинированными методами подвода тепла (в частности, с вибрирующими поверхностями нагрева, погруженными в слой материала).

В 1975–1980 гг. номенклатура сушилок со взвешенным слоем, выпускаемых заводами химического машиностроения, будет состоять в основном из типовых сушилок, разработанных НИИхиммашем, представленных в данном обзоре, что позволит увеличить серийность и добиться максимального обеспечения на имеющихся машиностроительных мощностях потребностей химической и смежных с нею отраслей промышленности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сажин Б.С. и др. Пневматические сушилки. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1973.
2. Сажин Б.С. и др. Сушилки кипящего слоя с механическими побудителями. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1974.
3. Техника сушки во взвешенном слое. Вып. 1. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1965.
4. Техника сушки во взвешенном слое. Вып. 2-5. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1966.
5. Техника сушки во взвешенном слое. Вып. 6. М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1967.
6. Эльперин И.Т. и др. Процессы переноса во встречных струях. Изд. "Наука и техника", Минск, 1972.
7. Грошев Г.Л. Сб. "Техника сушки во взвешенном слое", М., ЦИНТИхимнефтемаш, 1967.