

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
**Бийский технологический институт (филиал)**  
государственного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова»

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова

## **УЛЬТРАЗВУКОВОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ**

*МОНОГРАФИЯ*

Бийск  
Издательство Алтайского государственного технического  
университета им. И.И. Ползунова  
2010

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, ГК №П2518.

УДК 66.069.832

**Рецензент:** д.т.н. профессор Дроков Виктор Григорьевич, ГОУ ВПО «Иркутский Государственный университет», ООО «Диагностические технологии»

**Хмелев, В.Н.**

Ультразвуковое распыление жидкостей: монография / **В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова**; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 250 с.

**ISBN 978-5-9257-0177-5**

В монографии представлены результаты исследований и разработок ультразвукового оборудования для распыления жидкостей, выполненных за последнее десятилетие в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института (филиала) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», в рамках создания ультразвуковых аппаратов и технологий различного назначения.

Основное внимание уделено способу автоматической оптимизации процесса ультразвукового распыления в зависимости от физических свойств распыляемой жидкости и требуемой производительности распыления; расчету геометрических параметров излучающих поверхностей распылителей, построению электронных генераторов и колебательных систем ультразвуковых распылителей. Приводятся практические конструкции разработанных ультразвуковых аппаратов для распыления жидкостей и примеры их использования в различных технологических процессах.

Монография предназначена для научных работников, инженеров-технологов химических предприятий, проектно-конструкторских и технологических организаций. Может быть использована в качестве учебного пособия для студентов специальностей: «Информационно-измерительная техника и технологии», «Технология машиностроения», «Биотехнология», «Химическая технология полимерных композиций, порохов и твердых ракетных топлив», «Химическая технология органических соединений азота».

УДК 66.069.832

**ISBN 978-5-9257-0177-5**

© **Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова А.В., 2010**

© **Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова, 2010**

**СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ	9
1.1 Распыление жидкостей в радиоэлектронной промышленности	9
1.2 Распыление жидкостей при производстве топливных элементов	12
1.3 Применение технологии распыления жидкостей в медицине	13
1.4 Применение распыления жидкостей в области нанотехнологий.	14
1.5 Распыление жидкостей в технологиях химической промышленности.	14
ГЛАВА 2 ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ.	22
2.1 Гидравлическое распыление.	25
2.2 Механическое распыление	27
2.3 Пневматическое распыление	31
2.4 Электростатическое распыление	33
2.5 Проблемы и перспективные способы распыления жидкостей	34
2.6 Принцип и физический механизм ультразвукового распыления жидкостей.	36
2.6.1 Классификация способов ультразвукового распыления жидкостей	36
2.6.2 Механизмы каплеобразования при распылении жидкости в слое	40
2.6.3 Анализ факторов, влияющих на эффективность ультразвукового распыления.	43
2.6.4 Структура ультразвукового оборудования для распыления жидкости.	45
ГЛАВА 3 ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ И РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ.	48
3.1 Определение оптимальной толщины слоя распыляемой жидкости и амплитуды ультразвукового воздействия	49
3.2 Определение параметров излучающей поверхности распылителя	71
3.2.1 Определение угла распылителя	71
3.2.2 Определение количества и месторасположения отверстий для подачи жидкости на поверхность распыления	76
3.3 Теоретические основы управления процессом ультразвукового распыления	86
3.3.1 Контроль толщины слоя распыляемой жидкости.	87
3.3.2 Определение вязкости распыляемой жидкости	91
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ	93
4.1 Подтверждение кавитационной природы распыления жидкостей.	93
4.2 Разработка экспериментального стенда для определения оптимальных условий распыления	99
4.2.1 Принцип электромеханических аналогий	102
4.2.2 Выбор материалов для проведения экспериментальных исследований.	104
4.2.3 Методика проведения экспериментальных исследований	104
4.2.4 Установление зависимостей между измеряемыми электрическими сигналами и характеристиками колебательной системы	106
4.3 Определение оптимальных условий ультразвукового распыления	112
4.4 Экспериментальное определение зависимости параметров формируемого факела от формы излучающей поверхности ультразвукового распылителя	123
4.4.1 Описание лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований	123
4.4.2 Полученные результаты и обсуждение	126
ГЛАВА 5 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К АППАРАТАМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И УПРАВЛЕНИЕ ИХ РАБОТОЙ	130
5.1 Общие требования к аппаратам ультразвукового распыления жидкостей	130
5.2 Разработка способа автоматического управления процессом ультразвукового распыления.	132
ГЛАВА 6 РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ	136
6.1 Обоснование выбора конструктивной схемы ультразвуковой колебательной системы для распылителей	137
6.2 Обоснование выбора ступенчато-экспоненциальной формы концентратора полуволновой колебательной системы для распылителей	138
6.3 Проектирование полуволновых пьезоэлектрических колебательных систем для распылителей	141
6.4 Разработанные конструкции ультразвуковых колебательных систем для распылителей	146

ГЛАВА 7 УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ ЭЛЕКТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ РАСПЫЛЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ	151
7.1 Системы контроля амплитуды механических колебаний и напряжения на колебательной системе для автоматической подстройки частоты	152
7.2 Система регулирования амплитуды механических колебаний ультразвукового распылителя	167
7.3 Практическая конструкция электронного генератора ультразвукового распылителя	172
ГЛАВА 8 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ ЖИДКОСТИ	173
8.1 Разработка ультразвуковых распылителей для нанесения фоточувствительного слоя на поверхность кремниевой пластины	173
8.2 Разработка ультразвуковых распылителей для химико-механического полирования полупроводниковых пластин	176
8.3 Разработка ультразвуковых распылителей для конвекционной распылительной сушки	180
8.4 Разработка ультразвуковых аппаратов тонкодисперсного распыления высоковязких жидкостей	191
8.4.1 Разработка ультразвуковых колебательных систем с частотами до 44 кГц	192
8.4.2 Конструкции УЗ преобразователей с резонансными частотами выше 44 кГц	194
8.4.3 Конструкции распылительных камер	196
8.4.4 Определение оптимальных параметров разработанных распылителей	200
8.4.5 Исследование эффективности разработанных распылителей	201
8.5 Разработка ультразвукового ингаляционного аппарата	205
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.	221
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	222
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Созданные конструкции ультразвуковых технологических аппаратов для распыления жидкостей	237



## ВВЕДЕНИЕ

Большинство технологических процессов реализуется в гетерогенных системах, в частности, в двухфазных системах жидкость–газ. Наиболее эффективным способом интенсификации рассматриваемых процессов является развитие поверхности контакта фаз между веществами, находящимися в жидкой и газообразной фазах, за счет увеличения свободной поверхности вещества, находящегося в жидкой фазе. Распыление представляет собой технически наиболее просто реализуемый способ увеличения свободной поверхности жидкости, а его совершенствование является одной из важнейших задач промышленности. Этот факт базируется на существовании широкого спектра технологических процессов, в которых используется распыление, или реализация которых невозможна без применения распыления жидкостей.

Примером таких технологических процессов могут служить: в области химической технологии – мокрая очистка газов от различных дисперсных примесей, абсорбция газовых примесей как для их очистки, так и для выделения целевых компонентов, сушка и одновременное гранулирование материалов; в области радиоэлектронной промышленности – нанесение паяльных флюсов при автоматическом изготовлении печатных плат, покрытие полупроводниковых пластин фоточувствительным слоем на стадии фотолитографии при производстве полупроводниковых схем и др. Все перечисленные технологические процессы являются базовыми в своих отраслях промышленности, поэтому эффективность их реализации определяет качество конечной продукции.

Наиболее широко используемые на практике способы распыления (так называемые традиционные способы): гидравлическое, механическое, пневматическое и электростатическое распыление обладают большим количеством недостатков, которые значительно снижают эффективность технологических процессов, осуществляемых на их основе.

В этой связи перспективным направлением совершенствования технологических процессов является применение новых способов распыления жидкостей. К таким способам относится распыление за счет использования энергии механических колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты высокой интенсивности – ультразвуковое распыление.

Ультразвуковое распыление имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными способами распыления:

- низкую энергоемкость;
- высокую производительность;
- обеспечение мелкодисперсного распыления;
- возможность получения монодисперсного распыления;
- возможность распыления высоковязких жидкостей без предварительного снижения их вязкостей при помощи различных растворителей.

Ультразвуковой способ пока не получил промышленного применения в широких масштабах. Это в первую очередь связано с сильной зависимостью производительности распыления от свойств распыляемой жидкости, приводящей к необходимости подбора нужной величины ультразвукового воздействия для каждой распыляемой жидкости в зависимости от ее свойств, площади распыляющей поверхности и требуемой производительности распыления. На сегодняшний день, ввиду недостаточности знаний о процессах, происходящих в распыляемой жидкости, их взаимном влиянии, подбор требуемой величины ультразвукового воздействия осуществляется вручную, на основании субъективных ощущений оператора или по косвенным признакам. Это приводит к практической невозможности определения оптимальных условий распыления, что вызывает ухудшение дисперсных характеристик образующихся капель жидкости, и невозможности обеспечения монодисперсного распыления (а в ряде случаев и к невозможности поддержания самого процесса распыления) жидкости при изменяющихся условиях течения технологического процесса (температура, вязкость жидкости, производительность распыления).

Несмотря на существенность обозначенной проблемы, в настоящее время существует крайне мало теоретических исследований и практических разработок, позволяющих ее решить. Таким образом, задача изучения степени влияния свойств жидкости на процесс ее распыления и определения необходимых параметров ультразвукового воздействия и оборудования является актуальной.

В работе представлены результаты исследований, проведенных в последнее десятилетие в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института (филиала) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И.Ползунова», в рамках создания ультразвуковых аппаратов и технологий различного назначения.

Коллектив авторов благодарит сотрудников лаборатории Барсукова Р.В., Цыганка С.Н., разработавших новые подходы к проектированию электронных генераторов и пьезоэлектрических колебательных систем, Генне Д.В., Сливина А.Н., Хмелева С.С., Левина С.В., Абраменко Д.С., создавших лабораторные стенды для проведения исследований и практические конструкции ультразвуковых распылителей различного назначения.

Авторы признательны сотрудникам фирмы SUDO PREMIUM ENGINEERING (Республика Корея) за предоставленные материалы, руководителю фирмы Zisser GMBH М. Циссеру за обсуждение идей применения

ультразвукового распыления для решения проблем медицинской техники, руководителям предприятий РФ ООО «Диагностические технологии» (г. Иркутск), ЗАО «Электронсервис» (г. Зеленоград), ЗАО «НПП «ЭСТО» (г. Зеленоград), ООО «Промтехкомплект» (г. Курск), ЗАО ПНФ «Термоксид» (г. Заречный Свердловской обл.) за формулировку проблемных заданий на создание новых технологий ультразвукового распыления жидкостей различной вязкости.

## 1 ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Внедрение новых технологических процессов в различных отраслях химической промышленности сопровождается заметным расширением области применения распылительных устройств. При этом важное, если не решающее, значение имеет использование наиболее эффективных распылителей, благодаря чему резко увеличивается эффективность процесса. На сегодняшний день распыление жидкостей находит наибольшее применение в отраслях промышленности, показанных на рисунке 1.1

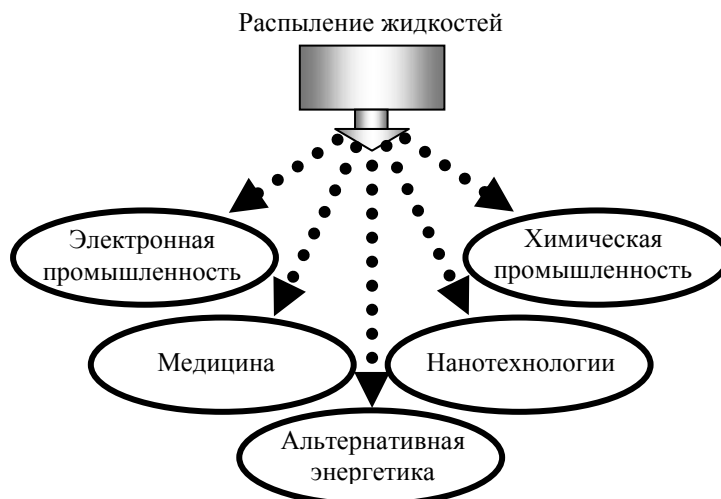


Рисунок 1.1 – Области применения технологии распыления жидкостей

Далее указанные области применения технологии распыления жидкостей рассмотрены более подробно.

### 1.1 Распыление жидкостей в радиоэлектронной промышленности

В радиоэлектронной промышленности технологии распыления жидкостей применяются для распыления паяльных флюсов, нанесения покрытий на печатные платы и др. В частности применение распыления обеспечивает значительные преимущества по сравнению с другими методами нанесения паяльного флюса, выражающиеся в точности и селективности нанесения флюса только на места пайки компонентов, а также в возможности флюсования сквозных отверстий на печатных платах [1].

При ультразвуковом распылении жидкость, проходящая через ультразвуковой распылитель, распыляется в мягкий низкоскоростной факел, в результате чего минимизируется излишнее напыление. Среди главных преимуществ ультразвукового распыления можно отметить следующие:

- при применении пайки волной исключается излишнее нанесение флюса;
- распыленный флюс легко формируется в вертикально ориентированный факел, создавая равномерное покрытие на печатной плате;
- широкий диапазон регулировки подачи флюса (т.е. плотности его нанесения на печатную плату);
- большое проходное сечение сопла ультразвукового распылителя предотвращающие его засорение;

В таблицах 1.1 и 1.2 приведены данные для сравнения различных технологий нанесения флюса, а также для выявления преимуществ и недостатков традиционных и ультразвуковых распылителей.

Таблица 1.1 – Сравнение различных технологий нанесения флюсов

Технологический параметр	Распыление ультразвуковой форсункой	Накатка валком	Нанесение пенного флюса
1	2	3	4
Расход флюса	На 75 % меньше, чем при пенном флюсе, на 50 % меньше, чем при накатке	На 50 % меньше, чем при пенном флюсе	Большой



Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
Проверка удельной массы (титрование)	Не нужно	Нужно нечасто	Нужно часто
Расход разбавителя (спирт)	Не нужно	Низкий	Высокий
Обслуживание	Ежемесячно	Ежедневно	Ежемесячно
Надежность	Высокая	Высокая	Высокая
Засоряемость	Отсутствует	Некоторая засоряемость при использовании флюсов с высоким содержанием твердых веществ и флюсов на нелетучих растворителях	Отсутствует
Возможность контролировать плотность нанесения флюса на печатную плату (микрограмм на кв. дюйм)	Полная возможность	Очень ограниченная возможность	Возможность отсутствует
Возможность использовать водорастворимые флюсы	Отличная – можно наносить очень тонкий слой флюса, шариков припоя не возникает	Средняя, толщина флюса средняя, но больше оптимальной, иногда возникают шарики припоя	Плохая – толстый слой флюса на плате приводит к образованию шариков припоя

Нанесение флюсов УЗ распылением позволяет добиться немалой экономии за счет сокращения расхода самого флюса (от 50 до 80 %), отказа от использования разбавителя, снижения расходов на обслуживание установки, а также уменьшения процента брака пайки (до 80 %).

Помимо нанесения паяльных флюсов, в радиоэлектронной промышленности существует еще ряд областей применения технологии распыления жидкостей:

- дозированное, равномерное распыления фотолитографических реагентов при производстве полупроводниковых пластин и плоских дисплеев;
- производство порошкового припоя;
- нанесение смазки на привода жестких дисков компьютера;
- осаждения защитных пленок на дисплеи с плоским экраном и сенсорным экраном;
- производство сверхпроводников;
- производство углеродных нанотрубок.

Таблица 1.2 – Сравнение различных технологий напыления флюсов

Оцениваемый параметр	Ультразвуковые форсунки		Форсунки под давлением	
	Стационарные	Совершающие возвратно-поступательное движение	Стационарные	Совершающие возвратно-поступательное движение
Обслуживание (даже при использовании канифоли)	Ежемесячно	Ежедневно	Ежедневно	Ежедневно
Сложность механической конструкции	Простая	Сложная	Простая	Сложная
Надежность	Высокая	Низкая	Высокая	Средняя
Излишнее напыление	Небольшое	Умеренное	Умеренное	Большое
Равномерность нанесения флюса	Хорошая	Достаточно хорошая (но с перекрытием)	Достаточно хорошая	Достаточно хорошая (но с перекрытием)
Подверженность засорению	Отсутствует	Умеренная	Низкая	Высокая

## **1.2 Распыление жидкостей при производстве топливных элементов**

Распыление идеально подходит для нанесения различных покрытий на подложки широкого круга топливных элементов, включая электроды, различные электролитические материалы, твердооксидные топливные элементы (SOFCs), проводящие материалы, основанные на платине, никеле, Ir, Ru или других ценных металлах.

Распыление позволяет наносить покрытия равномерным тонким слоем, сохраняет пористость электрода и не препятствуют транспорту реагентов. Кроме того, высока потребность в технологии напыления полимерных покрытий, основанных, например, на политетрафторэтилене, для повышения гидрофильных или гидрофобных свойств в электротических процессах и элементах [2].

### **1.3 Применение технологии распыления жидкостей в медицине**

Технологии, основанные на распылении жидкостей, применяются в медицинской практике уже сравнительно давно. К ним относятся, прежде всего, распыление лекарственных составов для ингаляций и физиопроцедур, распыление эфирных масел. Сравнительно новой областью применения распылителей является дезинфекция помещений, техники и инструмента.

В настоящее время один из основных методов дезинфекции помещений – протирание ветошью и орошение с использованием различных ручных распылителей. Недостатком данного метода является значительный расход дезинфицирующих средств и времени. В последнее время в медицинских учреждениях стали использовать дополнительный способ дезинфекции – аэрозольный. Существенный плюс этого способа – обеспечение 100 %-ной обработки всех поверхностей, в том числе труднодоступных мест. Кроме того, аэрозоль при распылении в помещении обеззараживает не только окружающие поверхности, но и воздух. Для этих целей необходимы компактные, переносные распылители, обеспечивающие получение аэрозолей с размеров распыляемых капель от 5 до 50 микрон, в зависимости от цели обработки (воздух, поверхности, насекомые).

Кроме того, технологии, основанные на мелкодисперсном распылении незаменимы для профилактики инфекционных заболеваний в детских садах, школах, гостиницах, общежитиях, в целях борьбы с особо опасными инфекциями в аэропортах, вокзалах, на железнодорожном транспорте, в местах массового скопления людей, проведения мероприятий по борьбе с синантропными насекомыми.

Производство современного медицинского оборудования и препаратов также невозможно без применения распыления. Сюда входят:

- нанесение покрытий на стенды и другие имплантируемые медицинские устройства;
- нанесение покрытий на шприцы и оборудование для сбора крови;
- изготовление микрокапсул, содержащих лекарственные препараты;
- нанесение специальных (дезинфицирующих) покрытий на хирургический шовный материал, бинты, марли и много другое [3].

#### **1.4 Применение распыления жидкостей в области нанотехнологий**

Мелкодисперсное распыление находит широкое применение при производстве современных наноматериалов. Наиболее востребованной областью его применения является распылительная сушка наноматериалов. Сушка обладает уникальными преимуществами, включая деагломерацию наночастиц из водных растворов, содержащих наноматериалы, таких как металлические оксиды и углеродные нанотрубки. При этом только ультразвуковое распыление способно обеспечить требуемую для nanoиндустрии производительность распыления и размеры частиц (в диапазоне 150–300 нм).

Помимо распылительной сушки наночастиц, существует еще целый спектр технологических процессов, основанных на распылении:

- изменения структуры наночастиц;
- изменения размера наночастиц;
- сушка суспензий;
- агломерации наночастиц;
- микро-инкапсуляция и нанесение покрытий на частицы [4, 5].

#### **1.5 Распыление жидкостей в технологиях химической промышленности**

Достаточно большое количество процессов химической технологии основано на использовании распыления. Сюда входят: нанесение самоочищающихся покрытий (например, на стекла); нанесение ароматических, вкусовых и смазочных покрытий; нанесение различных растворителей и клеев.

Известно, что распыление является одним из наиболее эффективных способов увеличения поверхности взаимодействия веществ [6]. В области химической промышленности это свойство распыления используется в таких процессах, как: мокрая очистка газов от дисперсных примесей; очистка и разделение газов, распылительная сушка, распыление в камерах для ускорения химических реакций; распыление топлив.

Мокрую очистку применяют для очистки газов от пыли или тумана. В качестве промывочной жидкости обычно используют воду, реже – водные растворы соды, серной кислоты и других веществ. Поверхностью контакта фаз между газом и жидкостью может являться поверхность стекающей жидкой пленки (насадочные и центробежные скрубберы), пузырьков газа (барботажные пылеуловители), поверхность капель (полюе скрубберы, скрубберы Вентури) [7, 8].

Соприкосновение дисперсных частиц с поверхностью жидкости происходит под действием силы, которая движет частицу. Такими силами могут быть сила тяжести, сила инерции, удары молекул (броуновское движение) и турбулентные пульсации.

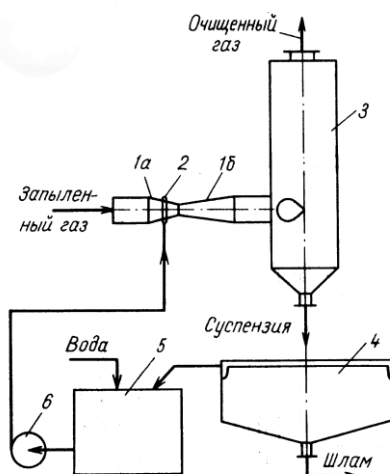
Мокрая очистка газов наиболее эффективна в случаях, когда допустимы увлажнение и охлаждение очищаемого газа. Охлаждение газа ниже температуры конденсации находящегося в нем паров жидкости способствует увеличению массы частиц, которые служат центрами конденсации, что облегчает их улавливание. Кроме того, водяные пары могут конденсироваться и на поверхности холодных капель. Возникающее при этом движение молекул пара способствует перемещению частиц пыли к каплям. Во многих случаях мокрую очистку применяют для выделения из газа частиц, имеющих большую ценность.

При мокром улавливании, в случае, когда поверхностью контакта фаз между газом и жидкостью является поверхность стекающей пленки жидкости или поверхности пузырьков газа, эффективно улавливаются частицы размером не менее 3–5 мкм.

Частицы меньшего размера улавливаются плохо, что обусловлено двумя причинами. Во-первых, мелкие частицы движутся совместно с газовым потоком и огибают мокрую поверхность, не соприкасаясь с ней. Во-вторых, вблизи мокрой поверхности имеется пограничный газовый слой, который мелкая частица далеко не всегда может преодолеть.

Для улавливания частиц с размерами менее 3 мкм применяются скрубберы Вентури. В скрубберах Вентури газ движется с высокой скоростью, силы инерции, возникающие при разрушении вихрей, позволяют частицам преодолевать пограничный ламинарный слой. Поэтому в аппаратах возможно улавливание 95–99 % твердых частиц размером 1 мкм и капелек тумана диаметром до 0,2 мкм. На рисунке 1.2 показана схема очистки газа, основным аппаратом которой является скруббер Вентури.

Запыленный газ вводится через конфузур в трубу Вентури 1. Через отверстия в стенке конфузора туда же впрыскивается вода с помощью распылительного устройства 2. В качестве распылительного устройства может использоваться гидравлическая или пневматическая форсунка. В горловине трубы скорость газа достигает порядка 100 м/с. Высокая степень турбулентности газового потока способствует коагуляции пылинок с каплями жидкости. Капли жидкости вместе с поглощенными частичками проходят через диффузор трубы Вентури, где их скорость снижается до 20–25 м/с, и попадают в циклонный сепаратор 3. Здесь капли под действием центробежной силы отделяются от газа и в виде суспензии удаляются из нижней конической части.



- 1а – диффузор трубы Вентури; 1б – конфузор трубы Вентури;  
2 – распылительное устройство для подачи воды;  
3 – циклонный сепаратор; 4 – отстойник для суспензии;  
5 – промежуточная емкость; 6 – насос

Рисунок 1.2 – Схема очистки газа с применением скруббера Вентури

Для того чтобы скруббер Вентури работал эффективно, необходимо очищенный газ предварительно охладить и насытить водяными парами в распылительном полом скруббера. В противном случае в трубе Вентури будет происходить испарение самых мелких капель жидкости, которые наиболее активно участвуют во взаимодействии с частицами пыли.

Полый скруббер представляет собой вертикальную колонну круглого или прямоугольного сечения, орошаемую водой, которая разбрызгивается через гидравлические форсунки. Запыленный газ может подаваться как снизу колонны, так и сверху. Последний вариант предпочтителен, если мокрая очистка используется для предварительной обработки газов перед очисткой их от пыли в сухих электрофильтрах, скрубберах Вентури и т.д. В этом случае достигается более равномерное распределение газа по сечению колонны и интенсифицируется процесс его охлаждения. Жидкость с уловленной пылью выводится снизу из конического днища.

Распылительные скрубберы позволяют производить очистку газов от взвешенных частиц, однако они имеют следующие недостатки:

- невысокий процент улавливания пыли в полых скрубберах, обусловленный неравномерностью факела и неполным заполнением факелом распыленной жидкости объема скруббера. В результате этого происходит значительное снижение объемного коэффициента массопередачи. Размещение нескольких гидравлических форсунок по объему скруббера незначительно исправляет ситуацию;

- высокий расход жидкости в скрубберах Вентури, обусловленный полидисперсным распределением диаметров капель распыла жидкости. Как было сказано ранее, только мелкие капли жидкости наиболее активно участвуют во взаимодействии с частицами пыли. Следовательно, образующиеся при распылении крупные капли представляют в общем случае непроизводительные потери жидкости.

Еще один распространенный процесс химической технологии – очистка газов от различных газовых примесей – осуществляется при помощи абсорбции. Абсорбцией называют процесс поглощения газов или паров из газовых или парогазовых смесей жидким поглотителем – абсорбентом [9, 10]. В промышленности абсорбцию применяют для решения следующих основных задач [11]:

- для получения готового продукта (например, абсорбция оксидов азота водой в производстве азотной кислоты);

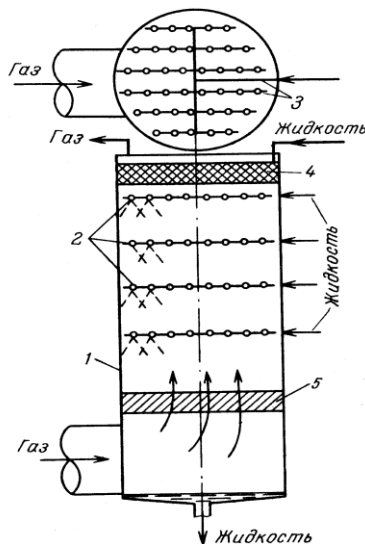
- для выделения ценных компонентов из газовых смесей (например, абсорбция ацетилена из газов крекинга природного газа);

- для очистки газовых выбросов от вредных примесей (например, очистка топочных газов от  $SO_2$ ).

Абсорбция, как и другие процессы массопередачи, протекает на поверхности раздела фаз. Поэтому абсорбционные аппараты – абсорберы – должны обеспечивать развитую поверхность контакта между жидкой и газовой фазами. По способу образования этой поверхности, что непосредственно связано с конструктивными особенностями абсорберов, их можно подразделить на четыре основные группы: пленочные, насадочные, тарельчатые, распыливающие.

В распыливающих абсорберах контакт между фазами достигается распыливанием или разбрызгиванием жидкости в газовом потоке. Эти абсорберы подразделяют на следующие группы:

- 1) полые (форсуночные) распыливающие абсорберы, в которых жидкость распыляется на капли форсунками;
  - 2) скоростные прямоточные распыливающие абсорберы, в которых распыление жидкости осуществляется за счет кинетической энергии газового потока;
  - 3) механические распыливающие абсорберы, в которых жидкость распыляется вращающимися деталями.
- Распыливающие абсорберы первой группы (рисунок 1.3) представляют собой полые колонны.



1 – корпус; 2 – форсунки; 3 – коллектор орошающей жидкости;  
4 – брызгоотбойник; 5 – газораспределительная решетка  
Рисунок 1.3 – Полая распыливающая абсорбер

В этих абсорберах газ движется снизу вверх, а жидкость подается через расположенные в верхней части колонны 1 гидравлические форсунки 2 с направлением факела распыла обычно сверху вниз. Эффективность таких абсорберов невысока, что обусловлено перемешиванием газа по высоте колонны и плохим заполнением ее сечения факелом распыленной жидкости. В результате объемный коэффициент массопередачи и число единиц переноса в этих аппаратах невелики [9]. Поэтому распылительные форсунки в полых абсорберах часто устанавливаются на нескольких уровнях.

Полые распыливающие абсорберы отличаются простотой устройства, низкой стоимостью, малым гидравлическим сопротивлением, их можно применять для обработки сильно загрязненных газов. Наиболее эффективно применение распыливающих полых абсорберов для улавливания хорошо растворимых газов.

К недостаткам полых распыливающих абсорберов относятся:

- невысокая эффективность работы, вызванная низкой эффективностью и однородностью гидравлического распыления жидкости;
- низкие скорости газа (до 1 м/с), используемые по причине необходимости избежания уноса очищаемым газом самых мелких капель жидкости (тумана), образующихся в результате полидисперсности распыла жидкости;
- неудовлетворительная работа при малых расходах жидкости, связанная с получающейся малой плотностью орошения объема абсорбера.

Для частичного устранения этих недостатков используются скоростные прямоточные распыливающие абсорберы. Эти абсорберы отличаются тем, что в случае прямотока процесс можно проводить при высоких скоростях газа (до 20–30 м/с и выше), причем вся жидкость уносится с газом и отделяется от него: в сепарационном пространстве. К этому типу аппаратов относится абсорбер Вентури, основной частью которого является труба Вентури.

Недостатки скоростных прямоточных распыливающих абсорберов фактически те же, что и у скрубберов Вентури.

Механические распыливающие абсорберы. В этих абсорберах разбрызгивание жидкости производится с помощью вращающихся устройств, т. е. с подводом внешней энергии для развития поверхности фазового контакта. Разбрызгивающие элементы устанавливаются так, что газ движется перпендикулярно или параллельно осям их валов.

По сравнению с абсорберами других типов механические абсорберы более эффективны, но они значительно сложнее по конструкции и требуют существенно больших затрат энергии для проведения процесса. Поэтому механические распыливающие абсорберы целесообразно применять только в тех случаях, когда распы-

ление с помощью форсунок или газом, взаимодействующим с жидкостью, по каким-либо причинам не представляется возможным.

Таким образом, в случае распылительных абсорберов основные недостатки также связаны с применяемыми (гидравлическим и механическим) способами распыления.

Сушкой называется процесс удаления влаги из веществ путем ее испарения и отвода образующихся паров. Во всех случаях при сушке в виде пара удаляется легколетучий компонент (вода, органический растворитель и т.д.). Этот процесс применяется обычно на конечной стадии технологического процесса с целью обеспечения высоких физико-механических характеристик получаемых продуктов, или на промежуточных стадиях, если удаление растворителя необходимо по технологическим соображениям [9, 12–14].

По способу подвода теплоты различают:

– конвективную сушку, проводимую путем непосредственного контакта материала и сушильного агента. Подвод теплоты осуществляется газовой фазой (воздух или смесь воздуха с продуктами сгорания топлива), которая в процессе сушки охлаждается с увеличением своего влагосодержания;

– контактную сушку, которая реализуется путем передачи теплоты от теплоносителя к материалу через разделяющую их стенку;

– радиационную сушку – путем передачи теплоты инфракрасным излучением;

– сублимационную сушку, при которой влага удаляется из материала в замороженном состоянии;

– диэлектрическую сушку, при которой материал высушивается в поле токов высокой частоты.

Распылительные сушилки (рисунок 1.4) получили широкое распространение благодаря следующим специфическим особенностям:

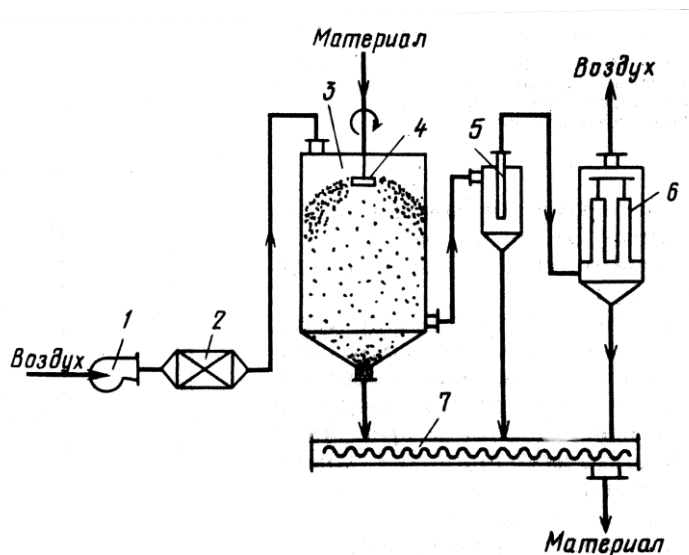
– этим методом можно высушивать зернистые, сыпучие, пастообразные и жидкие материалы;

– процесс протекает очень интенсивно в силу значительного увеличения поверхности контакта между частицами материала и сушильным агентом;

– возможность одновременного проведения нескольких процессов: сушки и обжига, сушки и гранулирования и т.д.

В распылительных сушилках материал диспергируют и высушивают в потоке газообразного теплоносителя. Время пребывания материала в зоне сушки весьма мало, а высокая степень диспергирования и, как следствие, большая интенсивность испарения влаги обеспечивают быстрое высушивание. Поэтому в распылительных сушилках можно использовать теплоноситель с высокой температурой. Высушенный продукт получается равномерного дисперсного состава, сыпучим и мелкодисперсным. Возможно совместное распыление и одновременное смешение двух и более компонентов.

Распыление материала обеспечивается механическими и пневматическими форсунками, а также с помощью центробежных дисков, частота вращения которых составляет  $4000\text{--}20000\text{ мин}^{-1}$ ; при этом окружная скорость на периферии диска находится в интервале  $100\text{--}160\text{ м/с}$ .



1 – вентилятор; 2 – калорифер; 3 – камера сушки; 4 – диск;

5 – циклон; 6 – рукавный фильтр;

7 – шнек для выгрузки высушенного материала

Рисунок 1.4 – Распылительная сушилка



Недостатками распылительных сушилок являются:

- повышенный расход энергии, связанный с низкой эффективностью применяемых способов распыления жидкости;
- при проведении одновременно процессов сушки и гранулирования – большой разброс размеров получаемых гранул, связанный с неоднородностью факела распыления;
- необходимость очистки отработанных газов от пыли, представляющей собой унесенные с потоком сушильного агента наиболее мелкие частицы высушиваемого материала, образующиеся вследствие высокого разброса диаметров капель распыла высушиваемого материала.

Таким образом, существует большое количество технологических процессов в различных областях промышленности, реализуемых при помощи распыления. Эффективность реализации этих процессов определяется используемым способом распыления и распылительным оборудованием, которые рассмотрены в следующем разделе.