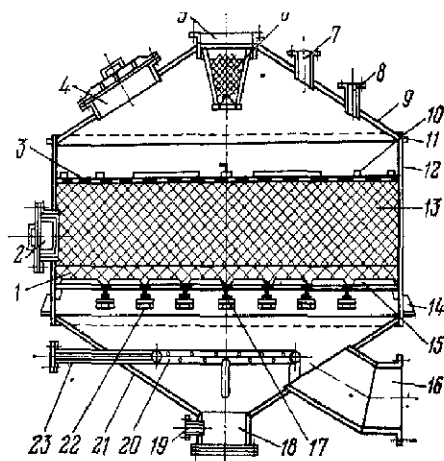


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОУВПО ЛУГАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ
СТАХАНОВСКИЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ИНСТИТУТ
ГОРНЫХ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ОХРАНЫ ТРУДА

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по дисциплине
**«ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА ЗАЩИТЫ АТМОСФЕРЫ
ОТ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ»**

для студентов направления подготовки
44.04.04 Профессиональное обучение (по отраслям)

В 2-х частях. Часть 2-я: Газоочистка



*Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом
ГОУ ВПО ЛНР «ЛНУ им. В.ДАЛЯ»
(протокол № от г.)*

Конспект лекций по дисциплине «Технология и техника защиты атмосферы от вредных выбросов» для студентов направления подготовки 44.04.04 (образовательно-квалификационный уровень магистр). В 2-х частях. Часть 2-я: Газоочистка. /Сост.: В.И. Сафонов. – Луганск: изд-во ЛНУ им. В.Даля, 2020. -89 с.

Рассмотрены основные процессы и аппараты технологии защиты атмосферы от выбросов вредных газов, паров, аэрозолей и пыли, основанные на использовании различных механизмов очистки газовых выбросов: абсорбции, адсорбции, каталитической конверсии, термической обработки, гравитационные, центробежные, мокрые, электрические.

Составитель: доц. Сафонов В.И.

Ответственный за выпуск: доц. Сафонов В.И.

Рецензент: доц. Петров А.Г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Лекция 7. Классификация процессов и аппаратов очистки газовых выбросов.....	5
7.1. Абсорбционная очистка газов.....	7
7.2. Технология абсорбционной очистки промышленных выбросов.....	10
7.3. Конструкции и принцип действия абсорберов.....	14
7.3.1. Насадочные абсорберы.....	16
7.3.2. Тарельчатые абсорберы.....	21
7.3.3. Распыливающие абсорберы.....	30
7.4. Десорбция загрязнителей из абсорбентов.....	32
7.5. Адсорбционная очистка газов.....	34
7.5.1. Технология адсорбционной очистки промышленных выбросов.....	35
7.5.2. Адсорбция паров органических растворителей.....	37
7.5.3. Очистка газов от оксидов азота.....	37
7.5.4. Очистка газов от диоксидов серы.....	38
7.5.5. Очистка от хлора и хлорида водорода.....	38
7.5.6. Очистка газов от сероводорода.....	39
7.5.7. Устройство и принцип действия адсорберов.....	39
7.5.8. Адсорберы периодического действия.....	39
7.5.9. Адсорберы непрерывного действия.....	47
7.6. Десорбция адсорбированных продуктов.....	51
7.7. Конденсационная очистка газов и паров.....	54
7.7.1. Принцип конденсационной очистки.....	55
7.7.2. Типы и конструкции конденсаторов.....	56
7.8. Термокаталитическая очистка газовых выбросов.....	58
7.9. Термическая обработка газовых выбросов.....	63
7.9.1. Установки термообезвреживания газовых выбросов.....	64
Контрольные вопросы.....	68
Задания для самостоятельной работы.....	68
Лекция 8. Очистка газовых выбросов автомобильного транспорта.....	68
8.1. Характеристика выбросов двигателей внутреннего сгорания.....	70
8.2. Снижение выбросов двигателей внутреннего сгорания.....	71
8.3. Нейтрализация выхлопов двигателей внутреннего сгорания.....	75
8.4. Улавливание аэрозолей, выбрасываемых дизельным двигателем.....	80
9. Оценка эффективности устройств для очистки газовых выбросов.....	82
10. Выбор вариантов газоочистки.....	84
Контрольные вопросы.....	87
Задания для самостоятельной работы.....	87
Список рекомендованной литературы.....	88

Введение

На современном этапе для большинства промышленных предприятий очистка вентиляционных выбросов от вредных веществ является одним из основных мероприятий по защите воздушного бассейна.

Обезвреживание выбросов предполагает либо удаление вредных примесей из инертного газа-носителя, либо превращение их в безвредные вещества. Оба принципа могут быть реализованы через различные физические и химические процессы, для осуществления которых требуются определенные условия. Расчеты процессов и аппаратов газоочистки при их проектировании должны быть направлены на создание условий, обеспечивающих максимально полное обезвреживание выбросов.

В настоящее время используются различные методы улавливания и обезвреживания паро- и газообразных веществ из воздуха. На практике применяют следующие способы очистки газа: абсорбционный, адсорбционный, каталитический, термический и др.

Методики расчета аппаратов для физико-химической очистки газов базируются на закономерностях массо- и теплообмена. При этом используются элементы теории подобия диффузионных процессов.

Цель настоящего учебного пособия – систематизировать сведения по массообменным, физикохимическим и термическим процессам, методические подходы к расчету оборудования по абсорбции и адсорбции, каталитическому и термическому обезвреживанию вредных примесей из промышленных, вентиляционных и транспортных выбросов. Приводятся необходимые сведения по устройству, работе и расчету типового оборудования, а также справочные материалы. Изложение материала сопровождается примерами расчета, которые облегчают усвоение теоретических вопросов.

Лекция 7.

Классификация процессов и аппаратов очистки газовых выбросов

План лекции.

Методы очистки воздуха от газообразных примесей.

Абсорбционная очистка газов.

Адсорбционная очистка газов.

Конденсационная очистка газов и паров.

Термокаталитическая очистка газовых выбросов.

Термическая обработка газовых выбросов.

Очистка выбросов в атмосферу складывается из двух принципиально различных процессов:

- *очистка от аэрозолей* – извлечение содержащихся в выбросах взвешенных твердых и жидких примесей (пыли, дыма, капелек тумана или брызг);

- *физико-химическая очистка* – извлечение или обезвреживание тех или иных газо- и парообразующих примесей.

Классификация средств обезвреживания газообразных загрязнителей заключается в разделении по применяемым процессам. В основном для газоочистки используются средства химической технологии. Поэтому классификация средств обезвреживания выбросов практически совпадает с классификацией процессов и аппаратов химической промышленности, вырабатывающих вредные выбросы как отходы основного производства.

Известно четыре основных метода очистки воздуха от газообразных примесей:

- метод абсорбции;
- метод хемосорбции;
- метод адсорбции;
- метод термической нейтрализации.

Удаление из технологических и дымовых выбросов содержащихся в них газообразных компонентов (сернистого ангидрида, сероводорода, хлора, хлористого водорода и др.) проводится химической очисткой газов методами абсорбции, адсорбции и хемосорбции.

Метод абсорбции заключается в поглощении отдельных компонентов газовой смеси абсорбентом (поглотителем), в качестве которого выступает жидкость. Абсорбент выбирают из условия растворимости в нем газа, подлежащего удалению из газовой смеси. Например, для очистки газов от аммиака, хлористого и фтористого водорода в качестве абсорбента применяют воду, для улавливания водяных паров – серную кислоту, для улавливания ароматических углеводородов – масла.

При абсорбции происходит конвективная диффузия паро- и газообразных компонентов очищаемого газа в жидкие поглотители. Для высокоэффективного изъятия загрязняющего вещества необходимо хорошее перемешивание очищаемого газа с абсорбентом. Это реализуется при очистке вентиляционного воздуха, отсасываемого из травильных и гальванических ванн, в колоннах с насадками, в форсуночных и барботажно-пенных аппаратах.

Регенерацию (восстановление) растворителя осуществляют снижением об-

щего (или парциального) давления примеси, повышением температуры либо тем и другим одновременно.

Метод хемосорбции основан на поглощении газов и паров твердыми или жидкими поглотителями, в результате чего образуются малолетучие и малорастворимые соединения. Хемосорбцию рационально применять при низких концентрациях загрязнителей, содержащихся в очищаемых газовых смесях. Хемосорбция заключается в промывке очищаемого газа растворами, вступающими в химические реакции с содержащимися в газе отдельными газообразными компонентами, что позволяет извлечь их или обезвредить. Например, очистка газов от оксидов азота проводится с помощью известкового раствора. Для очистки газов от сероводорода применяют мышьяково-щелочной раствор. Очистку высоксернистых газообразных продуктов сгорания энергетического топлива проводят путем пропуска дыма через морскую воду. Степень очистки газа достигает при этом 95%.

Метод адсорбции основан на улавливании вредных газовых примесей поверхностью твердых тел. Адсорбция применяется при незначительном содержании паро- и газообразных загрязняющих компонентов в очищаемом газе (пары растворителей, эфира, ацетона, различных углеводородов). Наиболее широко известен и распространен в качестве адсорбента активированный уголь. Его применяют для очистки газов от органических паров и некоторых других примесей. Применяют также активированный глинозем, силикагель, активированный оксид алюминия и др. Очистку газов осуществляют через неподвижные слои адсорбента и движущиеся слои.

Для превращения загрязнителей в безвредные вещества необходимо сочетание химических и физических процессов. С этой целью чаще всего используются процессы *термического окисления* и *термической деструкции*. При способности горючих газов и паров, входящих в состав вентиляционных и технологических выбросов, сгорать с образованием менее токсичных веществ используется *термическая нейтрализация*. Она проводится по трем схемам – каталитическое дожигание, термическое окисление, прямое сжигание.

Каталитическое дожигание (термокатализ) используется для превращения токсичных компонентов, содержащихся в отходящих газах в нетоксичные или менее токсичные путем их контакта с катализатором. Действие катализаторов проявляется в промежуточном химическом взаимодействии катализатора с реагирующими веществами, в результате чего образуются промежуточные соединения. В качестве катализаторов используют металлы или их соединения *Pt*, *Pd*, *Cu* и др. Катализаторы имеют вид шаров, колец или другую форму. Для каталитического дожигания необходима достаточная температура и скорость движения газов. Например, оксид углерода дожигается при температуре 316... 343 °С, пропан – 293... 332 °С, толуол – 200... 250 °С, ацетилен – 207... 241 °С, альдегиды – 173... 234 °С и т.д.

Каталитические нейтрализаторы применяются для обезвреживания CO, летучих углеводородов, растворителей, отработавших автомобильных газов. Эти способы применимы для загрязнителей всех агрегатных состояний, но ограничены составом обрабатываемого вещества. Термической обработке с целью обезвреживания могут быть подвергнуты лишь вещества, молекулы которых состоят

из атомов углерода, водорода и кислорода. В противном случае установки термообезвреживания переходят в разряд источников загрязнения атмосферы, и нередко – крайне опасных.

Термическое окисление используется в случае, когда сжигаемые газы имеют высокую температуру, но не содержат достаточно кислорода или когда концентрация горючих веществ незначительна и недостаточна для поддержания пламени. В первом случае процесс термического окисления проводят в камере с подачей свежего воздуха (дожигание CO , C_mH_n), а во втором – при подаче дополнительного природного газа. При этом происходит доокисление соединений при высокой температуре и достаточном количестве кислорода (например, доокисление оксида углерода в диоксид углерода, оксида серы в диоксид серы и т. д.).

Прямое сжигание используется в тех случаях, когда очищаемые газы обладают энергией горения, факельного сжигания горючих отходов. Так нейтрализуются HCN в факелах нефтехимических заводов.

Соответствующие аппараты для обезвреживания газовых выбросов называются абсорберами, адсорберами, установками (печами) термодеструкции (пиролиза, крекинга, риформинга), термоокисления (дожигания), термокаталитическими установками (печами, реакторами), химическими реакторами. В пределах групп аппараты различают по конструкциям, типоразмерам и частным отличительным признакам.

Методы очистки выбирают в зависимости от физико-химических свойств загрязняющего вещества, его агрегатного состояния, концентрации в очищаемой среде и др.

7.1. Абсорбционная очистка газов

Некоторые жидкости и твердые вещества при контакте с многокомпонентной газовой средой способны избирательно извлекать из нее отдельные ингредиенты и поглощать (сорбировать) их.

Абсорбция – поглощение газов или паров из газовых или парогазовых смесей жидкими поглотителями, называемыми абсорбентами. Возможность осуществления процесса абсорбции основывается на растворимости газов в жидкостях. Процесс абсорбции является избирательным и обратимым, что дает возможность применять его не только с целью получения растворов газов в жидкостях, но также и для разделения газовых или паровых смесей.

В последнем случае после избирательной абсорбции одного или не-скольких компонентов из газовой или паровой смеси проводят *десорбцию* – выделение этих компонентов из жидкости – и таким образом осуществляют разделение. Регенерированный абсорбент вновь возвращается на абсорбцию (круговой процесс).

Поглощение газа может происходить либо за счет его растворения в абсорбенте, либо в результате его химического взаимодействия с абсорбентом. В первом случае процесс называют *физической абсорбцией*, а во втором случае – *хемосорбцией*. Возможно также сочетание обоих механизмов процесса. Абсорбируемые компоненты газовой смеси называют *абсорбтивом*, а не абсорбируемые – *инертном*.

Абсорбентами служат индивидуальные жидкости или растворы активного

компонента в жидком растворителе. Во всех случаях к абсорбентам предъявляют ряд требований, среди которых наиболее существенными являются: высокая абсорбционная способность, селективность, низкое давление пара, химическая инертность по отношению к распространенным конструкционным материалам (при физической абсорбции – также к компонентам газовой смеси), не токсичность, огне- и взрывобезопасность, доступность и не высокая стоимость.

При проведении абсорбции в качестве абсорбентов применяют воду, органические растворители, не вступающие в реакцию с извлекаемым газом, и водные растворы этих веществ. При хемосорбции в качестве абсорбента используют водные растворы солей, органические вещества и водные суспензии различных веществ.

Если растворимость газов при 0°С и парциальном давлении 101,3 кПа составляет сотни грамм на 1кг абсорбента, то такие пары называют хорошо растворимыми. Для удаления из технических выбросов таких газов, как NH₃, HCl и HF, целесообразно применять в качестве абсорбента воду.

Нецелесообразно использовать воду для очистки выбросов с нерастворимыми в ней органическими примесями. Подобные загрязнители как правило хорошо поглощаются органическими жидкостями, среди которых могут использоваться как абсорбенты высококипящие вещества, такие как этаноламины и тяжелые предельные углеводороды (минеральные масла).

Абсорбенты, применяемые для очистки отходящих газов, приведены в табл. 7.1.

До обработки органическим абсорбентом из отбросных газов необходимо удалить дисперсные примеси. Иначе абсорбент быстро загрязняется и становится отходом, практически не поддающимся очистке.

Таблица 7.1. Абсорбенты, применяемые для очистки отходящих газов

Поглощаемые компоненты	Абсорбенты
Оксиды азота N ₂ O ₃ , NO	Вода, водные растворы и суспензии: NaOH, NO ₂ , N ₂ O ₅ , Na ₂ CO ₃ , NaHCO ₃ , KOH, K ₂ CO ₃ , KHCO ₃ , Ca(OH) ₂ , CaCO ₃ , Mg(OH) ₂ , MgCO ₃ , Ba(OH) ₂ , BaCO ₃ , NH ₄ HCO ₃
Оксид азота NO	Растворы FeCl ₂ , FeSO ₄ , Na ₂ S ₂ O ₃ , NaHCO ₃ , Na ₂ SO ₃ , NaHSO ₃
Диоксид серы SO ₂	Вода, водные растворы: Na ₂ SO ₃ (18–25%-ные), NH ₄ OH (5–15%-ные), Ca(OH) ₂ , Na ₂ CO ₃ (15– 20%- ные), NaOH (15–25%-ные), KOH, (NH ₄) ₂ SO ₃ (20–25%-ные), ZnSO ₃ , K ₂ CO ₃ ; суспензии CaO, MgO, CaCO ₃ , ZnO, золы; ксилидин–вода в соот-ношении 1 : 1, диметиланилин C ₆ H ₃ (CH ₃) ₂ NH ₂
Сероводород H ₂ S	Водный раствор Na ₂ CO ₃ + Na ₃ AsO ₄ (Na ₂ HasO ₃); водный раствор As ₂ O ₃ (8–10 г/л) + NH ₃ (1,2–1,5 г/л) + (NH ₄) ₃ AsO ₃ (3,5–6 г/л); моноэтаноламин (10–15%-ный раствор); растворы K ₃ PO ₄

	(40– 50%-ные), NH_4OH , K_2CO_3 , Na_2CO_3 , CaCN_2 , натриевая соль антрахинондисульфокислоты
Оксид углерода CO	Жидкий азот; медно-аммиачные растворы $[\text{Cu}(\text{NH}_3)]_n \times \text{COCN}$
Диоксид углерода	Водные растворы Na_2CO_3 , K_2CO_3 , NaOH , KOH , CO_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NH_4OH , этаноламины RNH_2 , R_2NH
Хлор Cl_2	Растворы NaOH , KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3 , K_2CO_3 , MgCO_3 , CaCO_3 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$; тетрахлоридметан CCl_4
Хлористый водород HCl	Вода, растворы NaOH , KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3 , K_2CO_3
Соединения фтора HF , SiF_4	Вода, растворы Na_2CO_3 , NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Органические абсорбенты должны иметь низкое давление насыщенных паров при температуре процесса. Растворители с недостаточно низкой упругостью паров будут интенсивно испаряться и загрязнять обрабатываемые газы. Кроме того, низкокипящий абсорбент сложно регенерировать, так как извлечь (десорбировать из него) уловленное вещество нагреванием невозможно.

На интенсивность перехода загрязнителя из газовой фазы в жидкую большое влияние оказывают температура и давление процесса, а также способ организации контакта фаз.

С ростом давления и снижением температуры скорость абсорбции увеличивается. Абсорбенты, работающие при отрицательных (по Цельсию) температурах, принято называть *хладоносителями*, а процесс абсорбции, протекающий в таких условиях – *контактной конденсацией*.

Абсорбционную очистку выбросов в атмосферу применяют как для извлечения ценного компонента из газа, так и для санитарной очистки газа. Считают, что целесообразно применять абсорбцию, если концентрация данного компонента в газовом потоке составляет свыше 1 %.

Сочетая абсорбцию с десорбцией, можно многократно использовать почти без потерь жидкий поглотитель (абсорбент) в замкнутом контуре аппаратов: абсорбер-десорбер-абсорбер (круговой процесс), выделяя поглощенный компонент в чистом виде.

Различают физическую абсорбцию и хемосорбцию. При физической абсорбции растворение газа в жидкости не сопровождается химической реакцией или, по крайней мере, влиянием этой реакции на скорость процесса можно пренебречь. Вследствие этого физическая абсорбция не сопровождается тепловым эффектом. Если в этом случае начальные потоки газа и жидкости незначительно различаются по температуре, то такую абсорбцию можно рассматривать как изотермическую.

На рис. 7.1. представлена принципиальная схема установки для абсорбции определенного компонента из газовой среды и последующего его выделения из абсорбента (десорбции).

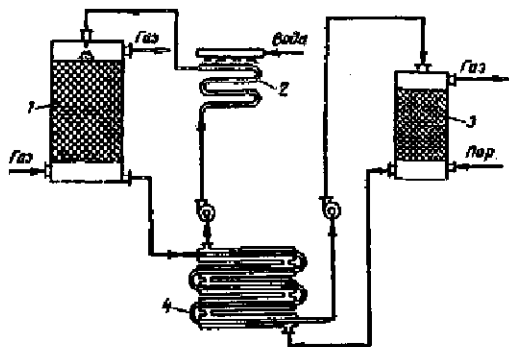


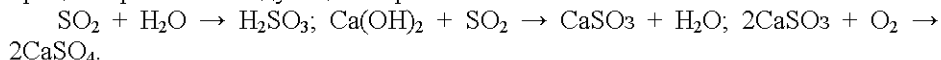
Рис. 7.1. Принципиальная схема установки для абсорбционно-десорбционного улавливания определенного компонента из газовой смеси: 1 – абсорбер; 2 – холодильник; 3 – десорбер; 4 – теплообменник

Газовая смесь, содержащая извлекаемый из нее компонент, поступает в абсорбер, где происходит контакт с абсорбентом, который поглощает данный компонент. Газ, очищенный от компонента, удаляется (очищенный воздух может быть выброшен в атмосферу), а раствор поглотителя, содержащий абсорбированный компонент, поступает в теплообменник, где нагревается. Нагретый раствор насосом подается в десорбер, где из него выделяется (десорбируется) поглощенный компонент путем испарения в результате нагревания поглотителя паром. Поглотитель, освобожденный от компонента, поступает в теплообменник, где отдает тепло абсорбенту при его противоточном движении в десорбер, а затем направляется в холодильник, пройдя который, снова поступает в абсорбер. Круг замкнулся. По такому циклу работает установка для абсорбционно-десорбционного улавливания определенных паров и газов из газовой смеси (из воздуха).

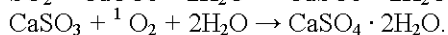
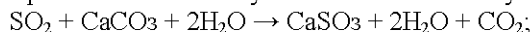
7.2. Технология абсорбционной очистки промышленных выбросов

Одной из основных областей применения абсорбции является удаление водорастворимых газообразных загрязнений из отходящих газов различных процессов. Примерами таких загрязнений являются HCl , SO_2 , NO_2 , HF , SiF_4 , NH_3 и H_2S . Из-за ограниченной растворимости SO_2 в воде обычно применяют щелочную абсорбирующую жидкость, что позволяет нейтрализовать SO_2 в абсорбирующей жидкой пленке, снизить давление паров SO_2 и увеличить движущую силу.

Очистка газов от SO_2 ведется преимущественно хемосорбционными методами на основе извести или известняка. При абсорбции известковым молоком процесс протекает следующим образом:

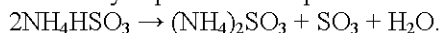


При использовании суспензий известняка суммарные реакции имеют вид:



Высокая степень улавливания SO_2 достигается при использовании аммиачного способа:

$\text{SO}_2 + \text{NH}_4\text{OH} \rightarrow \text{NH}_4\text{HSO}_3$; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_4\text{HSO}_3$. При нагревании бисульфат аммония разлагается:



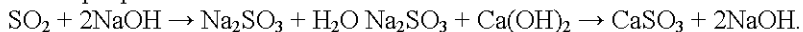
Недостаток метода – большой расход NH_3 , сложность схем улавливания и регенерации полученных растворов.

Однако поскольку продукты сгорания содержат CO_2 , в случае сильно щелочных растворов ($\text{pH} > 9$) будут абсорбироваться большие количества CO_2 , что приведет к повышенному расходу щелочи и твердых реагентов для удаления отходов. Обычно величину pH абсорбирующей жидкости на выходе газового потока поддерживают равной 8,0... 8,5. Для поддержания в отработанной жидкости $\text{pH} > 7$ соответствующим образом регулируют отношение скоростей жидкого и газового потоков. Чтобы движущая сила была максимальной, жидкость и газ направляют противотоком.

Насадочные и тарельчатые колонны, обеспечивающие наиболее эффективный контакт газа с жидкостью, являются оптимальными аппаратами для абсорбции в отсутствие твердых частиц (как присутствующих в газовом потоке, так и образующихся в результате реакции осаждения). Известь (а также известняк) – доступные и недорогие щелочные агенты – часто применяются для достижения требуемого pH абсорбирующей жидкости. В то же время многие соли кальция, такие как сульфаты, сульфиты и фториды, имеют ограниченную растворимость. При использовании их растворов возможна забивка трубопроводов, форсунок, насадки и т. п., что представляет серьезную проблему в системах обессеривания топочных газов. Для абсорбции HF часто используют открытые распыливающие камеры, однако при обессеривании в этих аппаратах также возможны указанные трудности. Успешно был проведен процесс очистки в скрубберах Вентури и в турбулентных контактных аппаратах.

Другим возможным решением проблемы забивки оборудования является использование в абсорберах хорошо растворимых щелочных агентов, например NaOH . Жидкость после стадии абсорбции обрабатывается известью в специальном реакторе, и смесь подается в отстойник; в результате такой обработки регенерируется NaOH , который возвращается в абсорбер. В системе протекают следующие химические реакции.

В абсорбере:



Иногда раствор продувают воздухом для окисления сульфита в сульфат.

Если образующийся при обработке продукт находит полезное применение, то необходимость в стадии регенерации отпадает. Так, процесс абсорбции SO_2 гидроксидом или карбонатом натрия может оказаться экономически выгодным в тех случаях, когда образующиеся бисульфит или сульфит натрия находят применение на расположенных неподалеку бумагоделательных фабриках.

Для абсорбции SO_2 используют щелочной раствор соли аммония. При этом по мере необходимости могут быть получены бисульфит, сульфит, бисульфат или сульфат аммония. Газы, поступающие на промывку, на первой стадии контактируют с раствором, имеющим явно щелочную реакцию, в результате чего достигается полное удаление SO_2 . На второй стадии, газ проходит через скруббер с нейтральным или слабокислым раствором, чтобы предотвратить унос NH_3 в атмосферу.

В другой абсорбционной системе, разработанной для удаления SO_2 и прошедшей опытную проверку, используют MgO и промывку фосфатными, карбо-

натными или лимоннокислыми растворами.

При абсорбционной обработке, когда на начальных стадиях контакта используется вода, содержащая летучий нейтрализующий агент, необходимо учитывать, что он может взаимодействовать с газообразными загрязнителями в газовой фазе с образованием твердых продуктов реакции. В качестве примера можно упомянуть абсорбцию NH_3 водой, подкисленной HCl или HNO_3 , или абсорбцию HCl водой, содержащей NH_3 . Газофазные реакции протекают в начале контактирования, они приводят к образованию дыма с частицами субмикронных размеров, которые плохо смачиваются и могут проходить через абсорбер, практически не улавливаясь. Для предотвращения этого явления необходимо соответствующим образом регулировать концентрации (давление пара) нейтрализующего агента в точках, где происходит первичный контакт. Можно рекомендовать использование чистой воды или очень малых концентраций нейтрализующего агента с последующим его добавлением к абсорбирующей жидкости по мере снижения парциального давления загрязняющего вещества в газовом потоке. Подобные проблемы становятся еще более серьезными в тех случаях, когда на очистку подаются горячие газы, что может привести в начальный момент к испарению нейтрализующего агента. В этом случае поступающий газ желательно предварительно охладить.

Хотя изменение pH водной фазы является наиболее распространенным методом при абсорбции газообразных загрязнений, возможно также использование других вспомогательных химических реагентов, природа которых определяется конкретными химическими свойствами системы. Для удаления следов органических соединений, в том числе в таких количествах, которые определяются только по запаху, к водному раствору добавляют окислители. Типичные промывные растворы могут содержать KmnO_4 , NaClO_4 , HNO_3 и H_2O_2 . В тех случаях, когда необходимо использование восстановителей, можно рекомендовать Na_2SO_3 . В некоторых случаях очень эффективны концентрированные растворы неорганических соединений; примером может служить удаление олефинов с использованием H_2SO_4 .

При абсорбции NO_2 серьезные проблемы связаны с тем, что из каждых 3 молей диоксида, поглощенных водой, образуется, наряду с азотной кислотой, 1 моль NO . Последний необходимо вновь окислять до NO_2 (реакция протекает с малой скоростью) и снова подавать на абсорбцию. При уменьшении концентраций оксида азота общая скорость процесса снижается. При практическом осуществлении абсорбции в насадочных и в тарельчатых колоннах полное удаление никогда не достигается и выбрасываемые в атмосферу газы часто имеют коричневую окраску. Полной очистки можно достичь путем дополнительного промывания щелочью, однако удаление образующихся при этом продуктов связано с очень большими трудностями. Серная кислота хорошо поглощает NO_x , однако и в этом случае возникает проблема утилизации или удаления отработанных растворов. Также проводят абсорбцию NO_2 отогнанной азотной кислотой с использованием каталитической насадки, на которой происходит окисление образующегося NO .

Пары органических соединений, не растворимых в воде, обычно абсорбируют органическими малолетучими жидкостями. На практике используют про-

цессы удаления H_2S и кислых продуктов для очистки углеводородных газов, основанные на абсорбции органическими аминами.

На рис. 7.2. показана схема абсорбции CO_2 раствором моноэтаноламина с рециркуляцией жидкости и десорбцией, применяемая в производстве жидкой углекислоты и сухого льда.

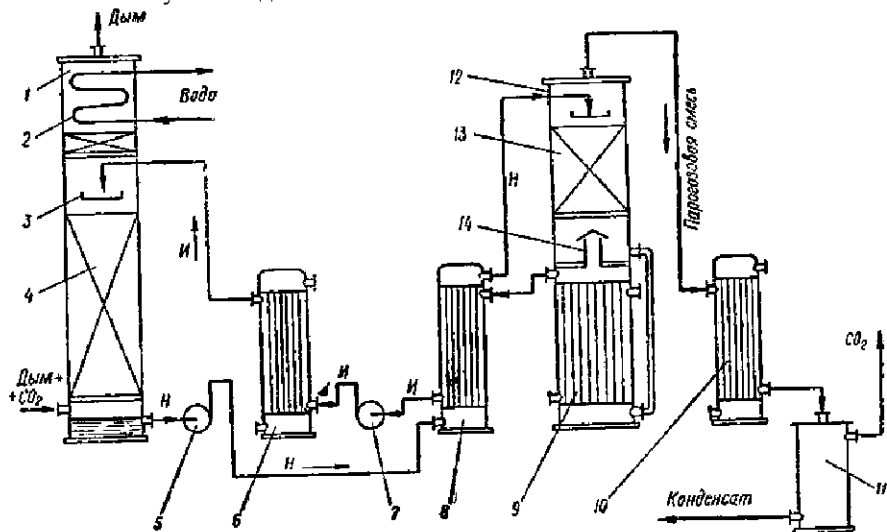


Рис. 7.2. Схема абсорбционной установки для извлечения углекислого газа из дымовых газов водным раствором моноэтаноламина

Охлажденные до температуры $30...40^{\circ}C$ и отмытые от механических примесей и сернистых соединений дымовые газы, содержащие CO_2 , подаются снизу в абсорбер 1, заполненный нерегулярной насадкой 4 из колец Рашига. Насадка орошается $10...30\%$ – м раствором моноэтаноламина, по-даваемым через распределитель 3. Стекающий по насадке раствор контактирует с поднимающимися вверх дымовыми газами, насыщается углекислотой и собирается в нижней части абсорбера.

Вследствие выделения теплоты абсорбции температура раствора и отходящих газов повышается. Проходя через установленный в верхней части абсорбера трубчатый водяной холодильник 2, газы охлаждаются до температуры, которую они имели на входе.

Насыщенный раствор из абсорбера насосом 5 через рекуперативный теплообменник 8 направляется в десорбер 12. В теплообменнике раствор нагревается за счет охлаждения истощенного раствора, отводимого из десорбера. Десорбер 12 состоит из двух частей: нижняя представляет собой кипятыльник 9, выполненный в виде вертикального кожухотрубного теплообменника, верхняя 13 заполнена насадкой и работает как ректификактор. Насыщенный раствор распределяется по насадке ректификактора и стекает по ней, контактируя с поднимающейся вверх парогазовой смесью. Из ректификактора по наружному трубопроводу раствор перетекает в нижнюю часть трубного пространства кипятыльника 9.

Здесь он нагревается за счет теплоты конденсации водяного пара, подаваемого в межтрубное пространство, и закипает. Выделяющаяся при кипении раствора парогазовая смесь через трубу 14 направляется в ректификатор 13 десорбера, а истощенный раствор моноэтаноламина отводится на охлаждение в рекуперативный теплообменник 8, а затем насосом 7 через холодильник 6 направляется на орошение насадки 4 абсорбера. Таким образом абсорбционно-десорбционный цикл замыкается.

Выходящая из верхней части десорбера парогазовая смесь, состоящая из углекислого газа, паров моноэтаноламина и воды, поступает в холодильник 10, где пары моноэтаноламина и воды конденсируются. Конденсат отделяется в сборнике конденсата 11, а углекислый газ направляется на отмывку от следов моноэтаноламина, а затем на сжижение.

Газообразные загрязнения могут быть удалены с помощью твердых абсорбентов, так, например, удаляется H_2S при прохождении через слой гранулированного оксида железа Fe_2O_3 . В процессе обработки оксид сульфидируется, и через некоторое время его регенерируют, обрабатывая воздухом. Оксид цинка также был использован для удаления серы. Проводилось также гидрирование органических серусодержащих соединений на твердых катализаторах, содержащих сульфиды кобальта, никеля и молибдена. В результате чего достигалось выделение серы из органической молекулы. Обычно используются неподвижные слои материала, хотя описано и применение оживленного слоя оксида железа. Эффективность реакций, как правило, невелика, что связано с недостаточно большими площадями поверхности твердых материалов. В настоящее время специалисты технологи рассматривают подобные методы как устаревшие и малоэффективные. Однако при интенсивной разработке процессов газификации и оживления угля эти методы снова могут приобрести практическое значение, поскольку следует ожидать, что будут разработаны твердые абсорбенты с большой площадью поверхности, пригодные для использования в ожиженных и в движущихся слоях.

В последнее время были предприняты попытки использовать твердую извесь и известняк для обессеривания топочных газов. Однако в этих экспериментах степень удаления SO_2 редко превышала 50...60 %. Намного более эффективное удаление SO_2 было достигнуто при использовании жидких суспензий, что привело к прекращению работ с твердыми материалами.

7.3. Конструкции и принцип действия абсорберов

Процессы абсорбции проводят в специальных аппаратах – *абсорберах*.

Абсорбция, как и другие процессы массопередачи, протекает на развитой поверхности раздела фаз. Для интенсификации процесса абсорбции необходимы аппараты с развитой поверхностью контакта между жидкой и газовой фазами (абсорбента с газом-носителем). По способу образования этой поверхности и диспергации абсорбента, их можно подразделить на четыре основные группы: 1) пленочные; 2) насадочные; 3) барботажные (тарельчатые); 4) распыливающие или распылительные (брызгальные).

В пленочных абсорберах поверхностью контакта фаз является поверхность жидкости, текущей по твердой, обычно вертикальной стенке. К этому виду ап-

паратов относятся: 1) трубчатые абсорберы; 2) абсорберы с плоскопараллельной или листовой насадкой; 3) абсорберы с восходящим движением пленки жидкости.

Насадочные абсорберы представляют собой колонны, заполненные насадкой – твердыми телами различной формы, которая служит для увеличения поверхности контакта соприкасающихся фаз – газа и жидкости.

Многочисленные типы барботажных абсорберов можно разделить на три основные группы:

- абсорберы со сплошным барботажным слоем, в которых осуществляется непрерывный контакт между фазами;
- абсорберы тарельчатого типа со ступенчатым контактом между фазами, причем ступени (тарелки) размещены в одном аппарате;
- абсорберы с механическим перемешиванием жидкости.

Барботажные абсорберы тарельчатого типа, имеющие наибольшее применение, выполняют в виде колонн круглого (иногда прямоугольного) сечения, по высоте которых расположены той или иной конструкции тарелки, причем на каждой тарелке осуществляется одна ступень контакта. Таким образом, в рассматриваемых абсорберах происходит ступенчатый контакт с соединением ступеней противотоком: газ поступает в нижнюю часть колонны и выходит сверху; жидкость подводится сверху и выходит снизу. На каждой тарелке, в зависимости от ее конструкции, может осуществляться тот или иной вид движения фаз, обычно перекрестный ток или полное перемешивание жидкости.

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

- 1) 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.

По способу организации массообмена абсорбционные устройства принято делить на аппараты с непрерывным и ступенчатым контактом фаз. К устройствам с непрерывным контактом можно отнести насадочные колонны, распылительные аппараты (полые скрубберы, скрубберы Вентури, ротоклоны и др.), однополочные барботажные и пенные устройства, а к устройствам со ступенчатым контактом – тарельчатые колонны, многополочные барботажные и пенные устройства.

Часть подобных устройств применяются для мокрой пылеочистки. В принципе их можно было бы использовать и для совместного улавливания дисперсных и газовых загрязнителей, однако осуществить это на практике удается редко. Очистные устройства создавались и совершенствовались либо для поглощения газообразных примесей, либо для пылезолоулавливания. Поэтому современные абсорберы для улавливания газообразных примесей не приспособлены для обработки потоков с дисперсными загрязнителями, а высокоэффективные пылезолоуловители, как правило, непригодны для сколько-нибудь существенного

извлечения газообразных вредностей. Серийные мокрые пылеуловители могут быть использованы только для предварительной обработки с целью освобождения газового потока от дисперсных примесей перед абсорбционной обработкой.

Для абсорбции газовых загрязнителей наиболее часто используются насадочные и тарельчатые колонны.

7.3.1. Насадочные абсорберы

Насадочные абсорберы получили наибольшее применение в промышленности. Эти абсорберы (рис. 7.3) представляют собой колонны, заполненные насадкой – твердыми телами различной формы. В насадочных колоннах обеспечивается лучший контакт обрабатываемых газов с абсорбентом, чем в полых распылителях, благодаря чему интенсифицируется процесс массопереноса и уменьшаются габариты очистных устройств.

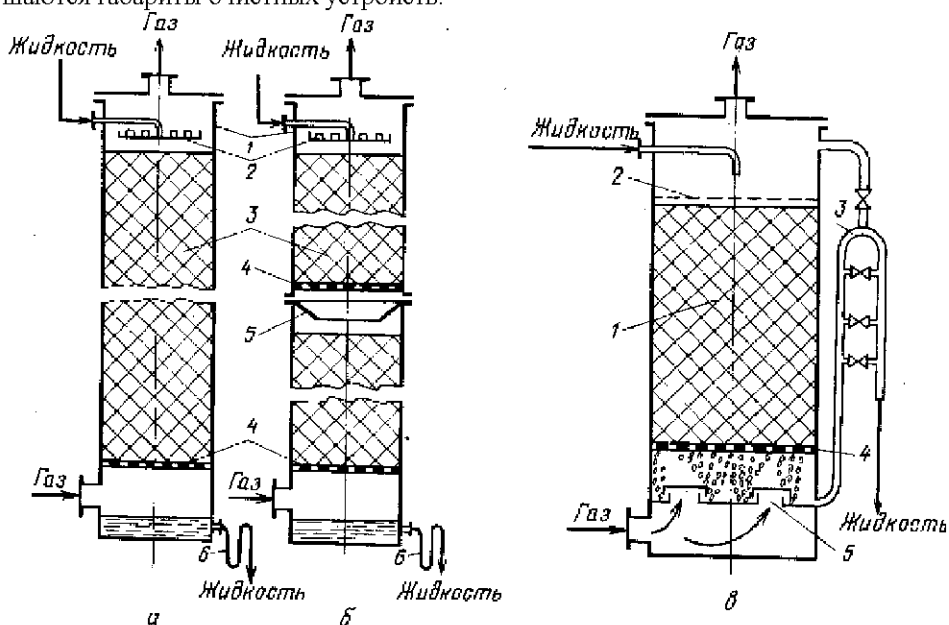


Рис. 7.3. Схемы насадочных абсорберов: а – со сплошным слоем насадки; б – с секционной загрузкой насадки; 1 – корпус; 2 – распределитель жидкости; 3 – насадка; 4 – опорные решетки; 5 – перераспределитель жидкости; 6 – гидравлические затворы; в – эмульгационная насадочная колонна; 1 – насадка; 2 – сетка, фиксирующая насадку; 3 – гидравлический затвор; 4 – опорная решетка; 5 – распределитель газа.

В насадочной колонне 1 (рис. 8.3, а, б) насадка 3 укладывается на опорные решетки 4, имеющие отверстия или щели для прохождения газа и стока жидкости, которая достаточно равномерно орошает насадку 3 с помощью распределителя 2 и стекает по поверхности насадочных тел в виде тонкой пленки вниз. Однако равномерное распределение жидкости по всей высоте насадки по сечению

колонны обычно не достигается, что объясняется пристеночным эффектом. Вследствие этого жидкость имеет тенденцию растекаться от центральной части колонны к ее стенкам и практически полностью оттесняется от места ввода абсорбента к периферии колонны на расстоянии, равном четырем-пяти ее диаметрам. Поэтому часто насадку в колонну загружают секциями высотой в четыре-пять диаметров (но не более 3...4 метров в каждой секции), а между секциями (слоями насадки) устанавливают перераспределители жидкости 5 (рис. 7.3, б), назначение которых состоит в направлении жидкости от периферии колонны к ее оси.

Устройство насадочной колонны и расположение ее конструктивных элементов показано на рис. 7.4.

Соотношение расходов жидкости и газа, поступающих в колонну, должно соответствовать оптимальному гидравлическому режиму работы насадочного слоя.

Рассмотрим гидродинамические режимы в противоточных насадочных колоннах, используя графическую зависимость гидравлического сопротивления орошаемой насадки от скорости газа в колонне (рис. 7.5).

Первый режим – *пленочный* – наблюдается при небольших плотностях орошения на малых скоростях газа. В этом режиме отсутствует влияние газового потока на скорость стекания по насадке жидкой пленки и, следовательно, на количество задерживаемой в насадке жидкости. Пленочный режим заканчивается в первой переходной точке *A* на рис. 7.5, называемой точкой подвисяния.

Второй режим – *режим подвисяния* (или торможения}. После точки *A* повышение скорости газа приводит к заметному увеличению сил трения о жидкость на поверхности контакта фаз и подтормаживанию жидкости газовым потоком. Вследствие этого скорость течения пленки жидкости уменьшается, а ее толщина и количество удерживаемой жидкости в насадке увеличиваются. В режиме подвисяния с повышением скорости газа на-рушается спокойное течение пленки жидкости, появляются завихрения, брызги, увеличивается смоченная поверхность насадки и соответственно -интенсивность процесса массопередачи. Этот режим заканчивается в точке *B*.

Третий режим – *режим эмульгирования* – возникает при превышении скорости, соответствующей точке *B*. В результате происходит накопление жидкости в свободном объеме насадки до тех пор, пока сила трения между стекающей жидкостью и поднимающимся по колонне газом не уравнивает силу тяжести жидкости, находящейся в насадке. При этом наступает обращение, или инверсия, фаз (жидкость становится сплошной фазой, а газ – дисперсной). Образуется газожидкостная дисперсная система, по внешнему виду напоминающая барботажный слой (пену) или газожидкостную эмульсию. Режим эмульгирования начинается в самом узком сечении насадки, плотность засыпки которой неравномерна по сечению колонны. Путем тщательного регулирования подачи газа режим эмульгирования может быть установлен по всей высоте насадки (отрезок *BC* на рис. 7.5).

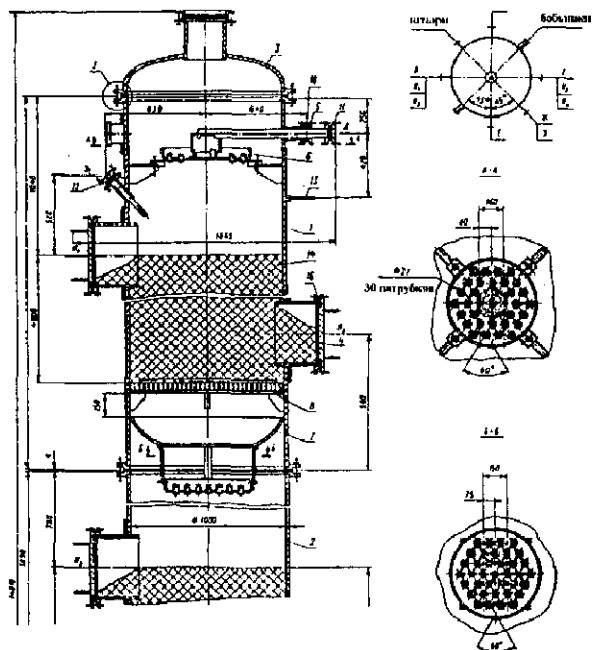
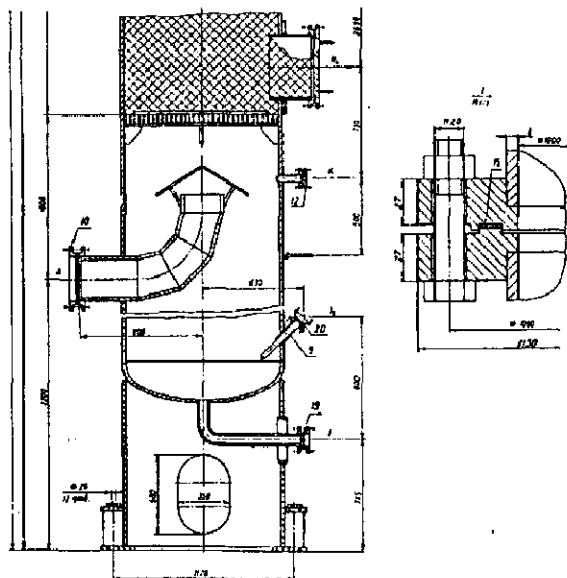


Рис. 7.4. Конструкция насадочного абсорбера.



Режим эмульгирования соответствует максимальной эффективности насадочных колонн преимущественно вследствие увеличения контакта фаз, который в этом режиме определяется не столько поверхностью насадочных тел, сколько поверхностью образующейся газожидкостной эмульсии, заполняющей весь свободный объем насадки. Следует отметить, что это повышение эффективности насадочной колонны сопровождается резким увеличением ее гидравлического

сопротивления (отрезок BC). В насадочных колоннах без специальных устройств поддерживать режим эмульгирования очень трудно, так как мал интервал изменения скоростей газа, при котором насадочная колонна работает в этом режиме (между точками B и C). Поэтому разработана специальная конструкция эмульгационной колонны (см. рис. 7.3, δ).

$\cdot g \Delta P$

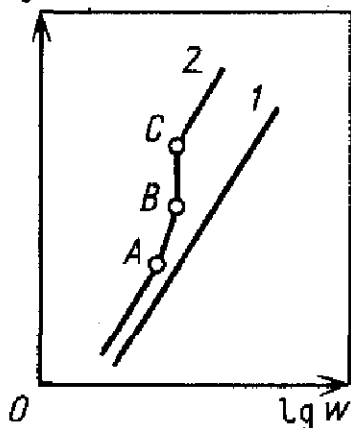


Рис. 7.5. Зависимость гидравлического сопротивления насадки от скорости газа в колонне: 1 – сухая насадка; 2 – орошаемая насадка.

Как правило, работа в режиме подвисяния и эмульгирования целесообразна только в случае, если повышение гидравлического сопротивления аппарата не имеет существенного значения (например, если абсорбер работает при повышенных давлениях). Поэтому большинство насадочных адсорберов работает в пленочном режиме (т.е. при скоростях газа до точки A). Пределом устойчивой работы насадочных колонн является скорость газа, соответствующая точке инверсии (или захлебывания).

Четвертый режим (от точки C на рис. 7.5 и выше) – режим уноса, или обращенного движения жидкости, выносимой из аппарата газом. Этот режим в технике не используется.

Некоторые распространенные типы насадок показаны на рис. 7.6, а характеристики насадок приведены в табл. 7.2.

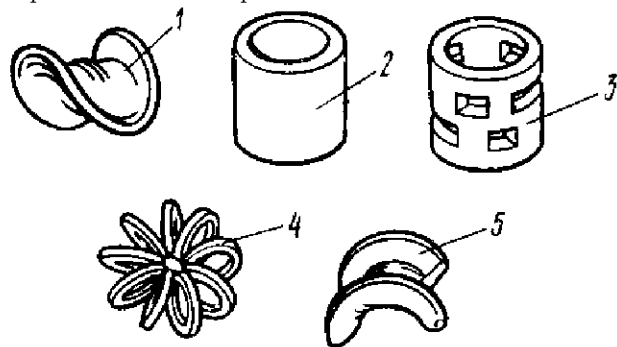


Рис. 7.6. Формы элементов насадки: 1 – седло Берля; 2 – кольцо Рашига; 3 – кольцо Палля; 4 – розетка Теллера; 5 – седло «Инталокс».

Таблица 7.2 Характеристика насадок

Насадка	Размер, мм	Геометрическая поверхность a_0 , $\text{м}^2/\text{м}^3$	Свободный объем ε_0 , $\text{м}^3/\text{м}^3$	Эквивалентный диаметр d_3 , м	Число элементов в 1 м^3	Насыпная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$
Кольца Рашига	25	190	0,605	0,01275	50600	890
	50	93	0,74	0,0318	5530	580
Седла типа «Инталокс»	25	230	0,77	0,0134	76600	575
	44	130	0,77	0,0237	14000	550
	50	100	0,81	0,0324	3400	505
Седла Берля	25	235	0,74	0,0126	70000	840
Кольца Палля: из пропилена стальные	50	112	0,86	0,0307	6800	100
	35	170	0,9	0,021	19200	455
	50	108	0,9	0,033	6400	415

К основным характеристикам насадки относят ее удельную поверхность a ($\text{м}^2/\text{м}^3$) и свободный объем ε ($\text{м}^3/\text{м}^3$). Обычно величину ε определяют путем заполнения объема насадки водой. Отношение объема воды к объему, занимаемому насадкой, дает величину ε . Еще одной характеристикой насадки является ее свободное сечение s ($\text{м}^2/\text{м}^2$). Принимают, что свободное сечение насадки s равно по величине ее свободному объему, т.е. $s = \varepsilon$.

Поскольку в насадочных колоннах поверхностью контакта фаз является смоченная поверхность насадки, поэтому насадка должна иметь возможно большую поверхность в единице объема. Вместе с тем для того, чтобы насадка работала эффективно, она должна удовлетворять следующим требованиям: 1) хорошо смачиваться орошающей жидкостью, т.е. материал насадки по отношению к орошающей жидкости должен быть лиофильным; 2) оказывать малое гидравлическое сопротивление газовому потоку, т.е. иметь возможно большее значение свободного объема или сечения насадки; 3) создавать возможность для высоких нагрузок аппарата по жидкости и газу; для этого насадка должна также иметь большие значения ε или d_3 ; 4) иметь малую плотность; 5) равномерно распределять орошающую жидкость; 6) быть стойкой к агрессивным средам; 7) обладать высокой механической прочностью; 8) иметь невысокую стоимость.

Максимальную поверхность контакта на единицу объема образуют седлообразные насадки "Инталокс" и Берля. Они имеют и минимальное гидравлическое сопротивление, но стоимость их выше, чем колец. Из кольцевых насадок наилучший контакт создают кольца Палля, но они сложны в изготовлении и дороже колец Рашига.

В качестве насадки наиболее широко применяют тонкостенные кольца Рашига, имеющие высоту, равную диаметру, который изменяется в пределах 15...150 мм. Кольца малых размеров засыпают в колонну навалом. Большие кольца (от 50×50 мм и выше) укладывают правильными рядами, сдвинутыми друг относительно друга. Такой способ заполнения аппарата насадкой называют загрузкой в укладку, а загруженную таким способом насадку – регулярной. Регулярная насадка имеет ряд преимуществ перед нерегулярной, навалом засыпанной в колонну: обладает меньшим гидравлическим сопротивлением, допускает

большие скорости газа. Однако регулярная насадка требует более сложных по устройству оросителей, чем насадка, засыпанная навалом.

При выборе размеров насадки необходимо учитывать, что с увеличением размеров ее элементов увеличивается допустимая скорость газа, а гидравлическое сопротивление насадочного абсорбера снижается. Общая стоимость колонны с крупной насадкой будет ниже за счет снижения диаметра абсорбера, несмотря на то, что высота насадки несколько увеличится по сравнению с таковой в абсорбере, заполненном насадкой меньших размеров. Это особенно относится к абсорбции хорошо растворимых газов. При абсорбции плохо растворимых газов более подходящей может быть и сравнительно мелкая насадка.

Если необходимо провести глубокое разделение газовой смеси, требующее большого числа единиц переноса, то в этом случае рациональнее использовать мелкую насадку. Мелкая насадка предпочтительнее при проведении абсорбции под повышенным давлением, так как при этом потеря напора в абсорбере составит малую долю от общего давления газовой смеси.

Насадочные абсорберы должны работать с максимально возможными скоростями газового потока, при которых насадка не захлебывается. Обычно эта скорость превышает половину *скорости захлебывания*. Для колец Рашига ее можно принимать до 60...80%, для седлообразных насадок – до 60...85%, для насадок Теллера – до 75...90% от скорости захлебывания. Параметры начала захлебывания определяют по эмпирическим соотношениям.

В случае загрязненных сред целесообразно применять регулярные насадки, в том числе при работе под повышенным давлением. Для этих сред можно использовать также так называемые абсорберы с плавающей насадкой. В качестве насадки в таких абсорберах обычно применяют легкие полые шары из пластмассы, которые при достаточно высоких скоростях газа переходят во взвешенное состояние. Вследствие их интенсивного взаимодействия такая насадка практически не загрязняется.

В абсорберах с плавающей насадкой возможно создание более высоких скоростей, чем в колоннах с неподвижной насадкой. При этом увеличение скорости газа приводит к расширению слоя шаров, что способствует снижению скорости газа в слое насадки. Поэтому существенное увеличение скорости газового потока в таких аппаратах (до 3...5 м/с) не приводит к значительному возрастанию их гидравлического сопротивления.

К основным достоинствам насадочных колонн следует прежде всего отнести простоту устройства и низкое гидравлическое сопротивление, а к недостаткам – сложность отвода теплоты, плохую смачиваемость насадки при низких плотностях орошения, большие объемы насадки вследствие недостаточно высокой ее эффективности (по сравнению с тарельчатыми аппаратами).

7.3.2. Тарельчатые абсорберы

Тарельчатые абсорберы обычно представляют собой вертикальные цилиндры – колонны, внутри которых на определенном расстоянии друг от друга по высоте колонны размещаются горизонтальные перегородки-тарелки. Тарелки служат для развития поверхности контакта фаз при направленном движении этих фаз (жидкость течет сверху вниз, а газ проходит снизу вверх) и многократ-

ном взаимодействии жидкости и газа.

На каждой тарелке, в зависимости от ее конструкции, можно поддерживать тот или иной вид движения фаз, обычно перекрестный ток или полное перемешивание жидкости.

Тарелки можно подразделить на три основные группы:

1) Тарелки перекрестного типа, в которых движение газа и жидкости осуществляется перекрестным током. Эти тарелки имеют специальные переливные устройства для перетока жидкости с одной тарелки на другую, причем газ по переливам не проходит.

2) Тарелки провального (беспереливного) типа, в которых переливные устройства отсутствуют, так что газ и жидкость проходят через одни и те же отверстия. На этих тарелках контакт газа и жидкости осуществляется по схеме полного перемешивания жидкости.

3) Тарелки с однонаправленным движением газа и жидкости (прямоточные). В данном случае газ выходит из отверстий в направлении движения жидкости по тарелке; это вызывает снижение продольного перемешивания жидкости и способствует движению жидкости, что приводит к уменьшению гидравлического градиента.

По способу слива жидкости с тарелки абсорберы этого типа подразделяют на колонны с тарелками со сливными устройствами и с тарелками без сливных устройств (с неорганизованным сливом жидкости).

К тарельчатым аппаратам со сливными устройствами относятся колонны с колпачковыми, ситчатыми, клапанными и другими тарелками. Эти тарелки имеют специальные устройства для перетока жидкости с одной тарелки на другую – сливные трубки, карманы и др. Нижние концы сливных устройств погружены в жидкость на нижерасположенных тарелках для создания гидрозатвора, предотвращающего прохождение газа через сливное устройство.

Принцип работы абсорберов такого типа показан на рис. 7.7,а на примере колонны с колпачковыми тарелками. Жидкость подается на верхнюю тарелку, движется вдоль тарелки от одного сливного устройства к другому, перетекает с тарелки на тарелку и удаляется из нижней части абсорбера. Переливные устройства на тарелках располагают таким образом, чтобы жидкость на соседних по высоте аппарата тарелках протекала во взаимно противоположных направлениях. Газ поступает в нижнюю часть абсорбера, проходит через прорезы колпачков (в других абсорберах через отверстия, щели и т.д.) рис. 7.7,б и затем попадает в слой жидкости на тарелке, высота которого регулируется в основном высотой сливного порога. При этом газ в жидкости распределяется в виде пузырьков и струй, образуя в ней слой пены, в которой происходят основные процессы массо- и теплопереноса. Эта пена нестабильна, и при подходе ее к сливному устройству жидкость осветляется. Пройдя через все тарелки, газ уходит из верхней части аппарата.

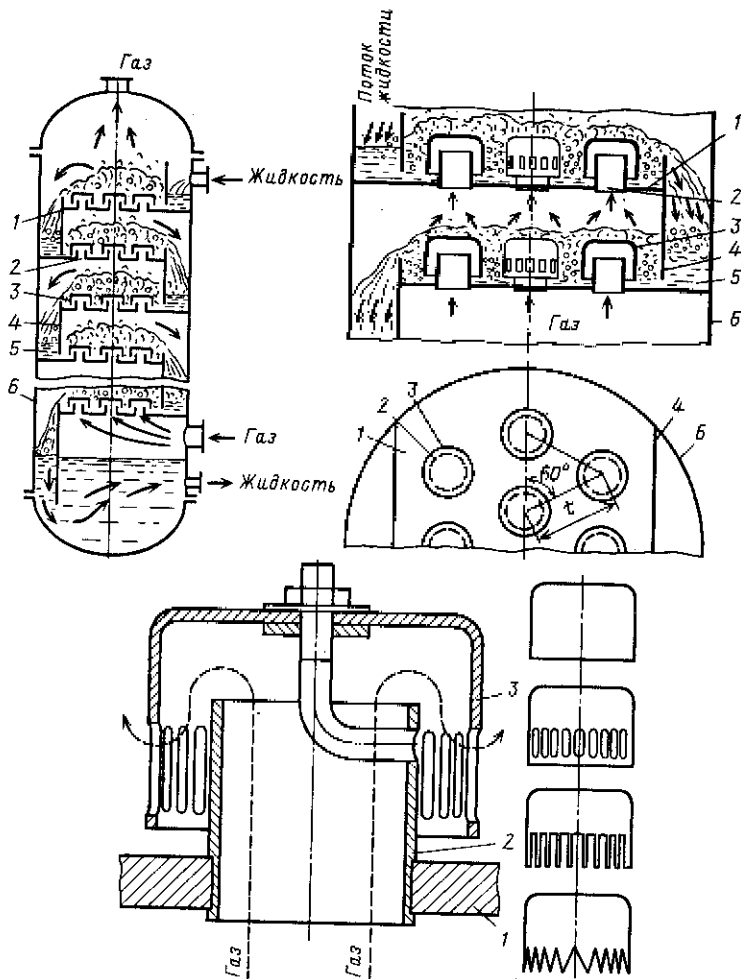


Рис. 7.7. Устройство колонны и колпачковых тарелок с капсульными колпачками: а – колонна с тарелками; б – две соседние тарелки; в – капсульный колпачок; г – формы капсульных колпачков; 1 – тарелки; 2 – газовые (паровые) патрубki; 3 – круглые колпачки; 4 – переточные перегородки (или трубы) с порогами; 5 – гидравлические затворы; 6 – корпус колонны

Для тарельчатых колонн со сливными устройствами характерна гидродинамическая неравномерность по длине тарелки, которая является следствием гидравлического сопротивления движению жидкости по длине тарелки. Эта неравномерность объясняется тем, что при движении жидкости по тарелке ее уровень повышается (например, из-за наличия колпачков или под действием перпендикулярного потока проходящего через жидкость газа), и по длине пути движения жидкости возникает гидравлический градиент. Такое явление приводит к нерав-

номерному распределению газа по площади тарелки: большая часть газа движется через часть тарелки, прилегающую к сливному порогу, где уровень жидкости ниже, что становится особенно заметным на тарелках больших диаметров, когда величина гидравлического градиента значительна. Для снижения гидравлического градиента в аппаратах большого диаметра (от 1...2 м и выше) уменьшают путь прохождения жидкости (рис. 7.8, б, в).

Основное влияние на эффективность тарелок любых конструкций оказывают гидродинамические условия их работы. В зависимости от скорости газа различают три основных гидродинамических режима работы тарельчатых аппаратов: *пузырьковый*, *пенный* и *струйный* (или *инжекционный*). Эти режимы различаются структурой газожидкостного слоя на тарелке, которая в основном определяет его гидравлическое сопротивление, высоту и поверхность контакта на тарелке.

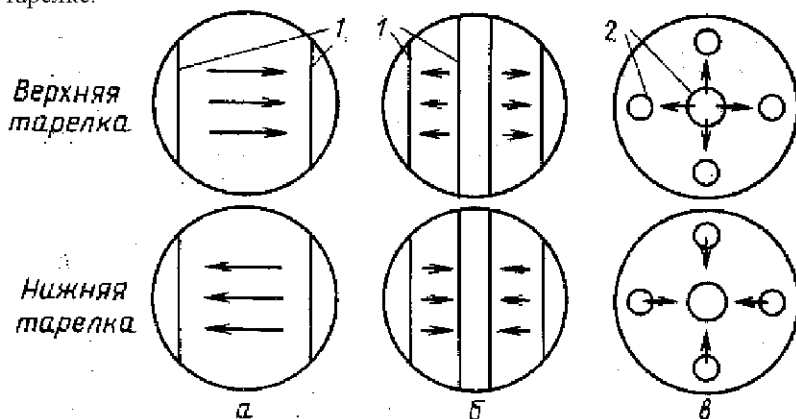


Рис. 7.8. Некоторые типы сливных устройств тарельчатых колонн: а – одноточное устройство со сливными перегородками 1; б – двухточное устройство со сливными перегородками 1; в – устройство для радиального направления жидкости с переливными трубами 2

Выбрать оптимальное контактное устройство из большого разнообразия типов тарелок довольно сложно. Приведенные ниже конструкции тарелок (рис. 7.9) характеризуются следующими показателями.

Колпачковые тарелки устойчиво работают при значительных изменениях нагрузок по газу и жидкости. Этот показатель очень важен при организации процесса в производственных условиях. Но недостатки колпачковых тарелок довольно существенны – они сложны по устройству, для их изготовления требуются большие затраты металла, они отличаются большим гидравлическим сопротивлением и малой предельно допустимой скоростью газа. Поэтому колонны с колпачковыми тарелками вытесняются более эффективными конструкциями тарельчатых аппаратов.

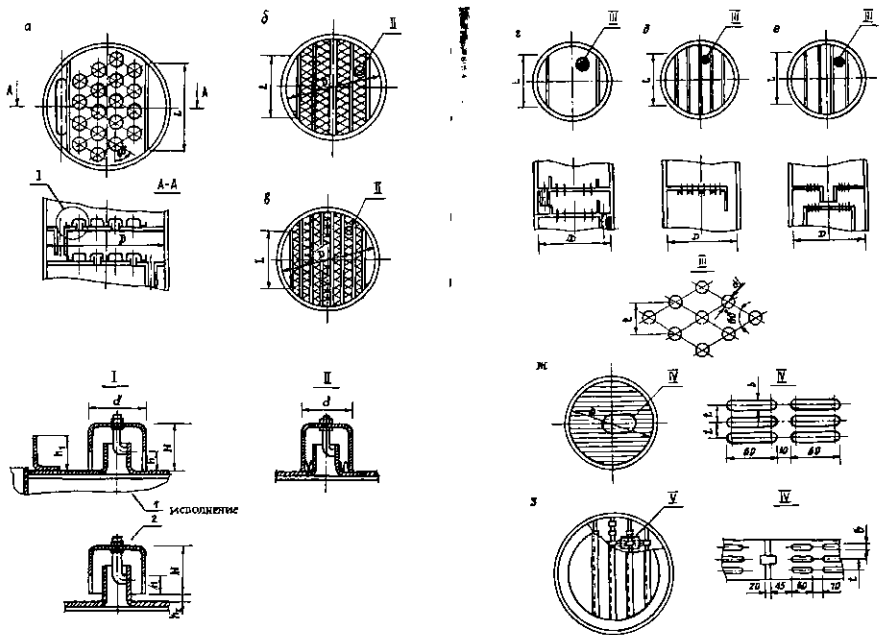


Рис. 7.9. Конструкции тарелок: а, б, в – колпачковая; г, д, е – ситчатая; ж, з – решетчатая (провальная)

Устройство тарельчатой колонны с колпачковыми тарелками и расположение ее конструктивных элементов показаны на рис. 7.10.

Ситчатые тарелки. Эти тарелки (рис. 7.11) имеют большое число отверстий диаметром 2... 8 мм, через которые проходит газ в слой жидкости на тарелке. Уровень жидкости на тарелке поддерживается переливным устройством 2.

При слишком малой скорости газа его давление не может удержать слой жидкости, соответствующий высоте перелива, и жидкость может просачиваться (или «проваливаться») через отверстия тарелки на нижерасположенную тарелку, что приводит к существенному снижению движущей силы процесса абсорбции. Поэтому газ должен двигаться с определенной скоростью и иметь давление, достаточное для того, чтобы преодолеть давление слоя жидкости на тарелке и предотвратить отекание жидкости через отверстия тарелки. Таким образом, ситчатые тарелки обладают более узким диапазоном работы по сравнению с колпачковыми.

К достоинствам ситчатых тарелок относятся простота их устройства, легкость монтажа и ремонта, сравнительно низкое гидравлическое сопротивление, достаточно высокая эффективность. Однако эти тарелки чувствительны к загрязнениям и осадкам, которые забивают их отверстия. Если происходит внезапное прекращение подачи газа или существенное снижение его давления, то с ситчатых тарелок сливается вся жидкость, и для возобновления нормальной работы аппарата необходимо вновь запускать колонну.

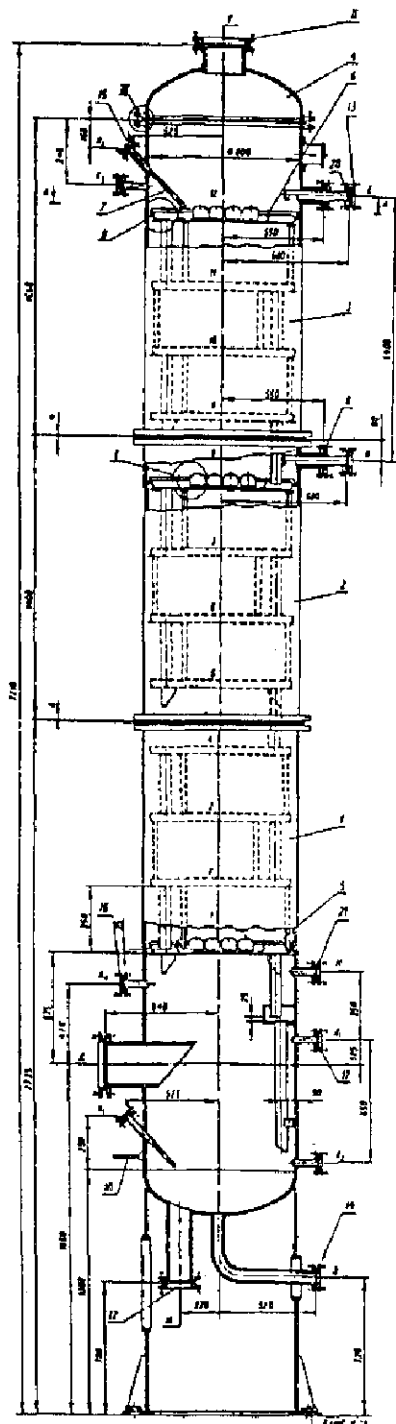


Схема расположения штуцеров, штуцер

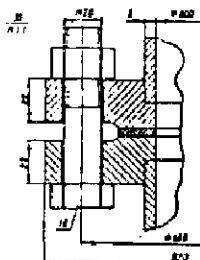
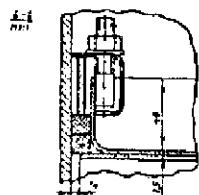
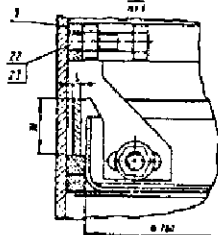
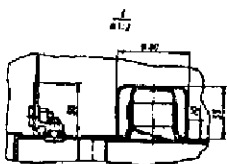
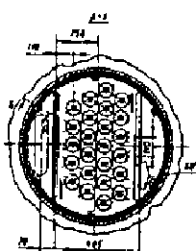
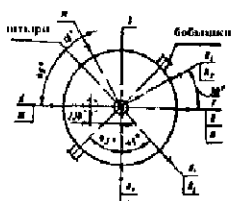


Рис. 7.10.
Абсорбер с кол-
пачковыми та-
релками

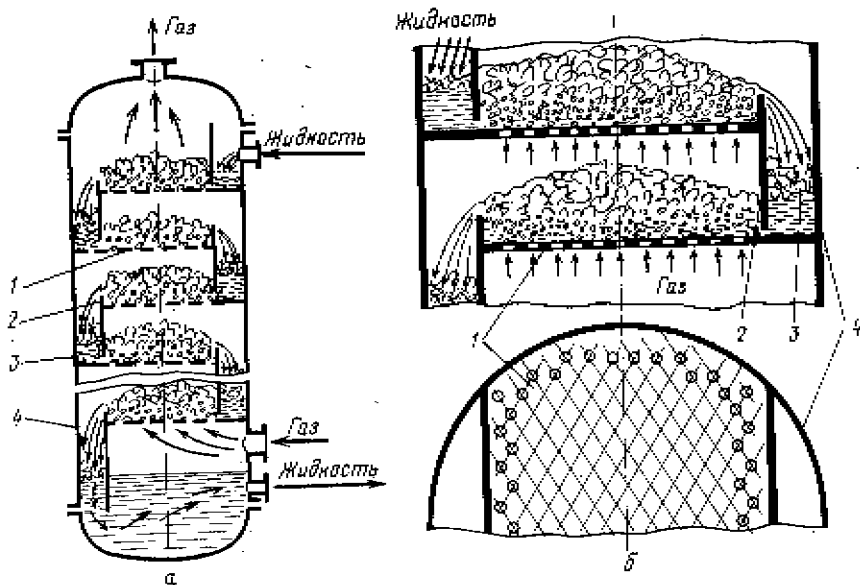


Рис. 7.11. Устройство колонны с ситчатыми переточными тарелками: а – колонна с тарелками; б – две соседние тарелки; 1 – тарелки; 2 – переточные перегородки или трубы с порогами; 3 – гидравлические затворы; 4 – корпус колонны

Клапанные тарелки. Принцип действия этих тарелок (рис. 7.12,а) состоит в том, что клапан 2, свободно лежащий над отверстием в тарелке 1, с изменением расхода газа увеличивает подъем и соответственно площадь зазора между клапаном и плоскостью тарелки для прохода газа. Поэтому скорость газа в этом зазоре, а значит и во входе в слой жидкости на тарелке, остается приблизительно постоянной, что обеспечивает неизменно эффективную работу тарелки. Гидравлическое сопротивление тарелки при этом увеличивается незначительно. Высота подъема клапана определяется высотой ограничителя 7 (рис. 7.12,б). Диаметр отверстий под клапаном составляет 35... 40 мм, а диаметр самого клапана 45... 50 мм.

Колонны с тарелками без сливных устройств. В тарелке без сливных устройств (рис. 7.13) газ и жидкость проходят через одни и те же отверстия или щели. При этом одновременно с взаимодействием фаз на тарелке происходит сток жидкости на нижерасположенную тарелку – «проваливание» жидкости. Поэтому тарелки такого типа часто называют провальными. Конструкции (типы) провальных тарелок представлены на рис. 7.14.

Гидродинамические режимы работы провальных тарелок специфичны тем, что нормальная их работа возможна только после достижения определенной скорости газа.

Диаметр отверстий в этих тарелках обычно 10 мм, иногда до 15... 20 мм, что позволяет существенно увеличить нагрузки по жидкости и газу при незначи-

тельном гидравлическом сопротивлении. Суммарная площадь свободного сечения 10... 15 %.

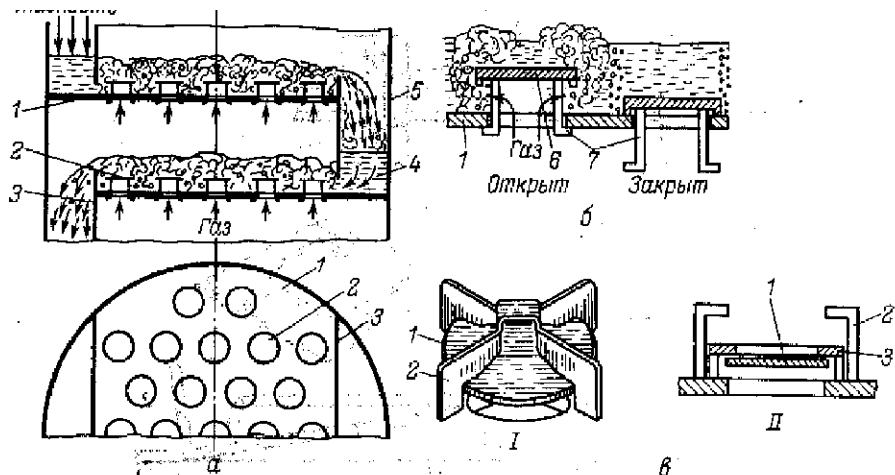


Рис. 7.12. Устройство клапанных тарелок: а – две соседние тарелки с круглыми клапанами; б – принцип работы клапана; 1 – тарелка; 2 – клапан; 3 – переточная перегородка с порогом; 4 – гидравлический затвор; 5 – корпус колонны; 6 – диск клапана; 7 – ограничители подъема клапана; в – круглые клапаны с верхним ограничителем (I) и с балластом (II): 1 – дисковый клапан; 2 – ограничитель; 3 – балласт

Решетчатые тарелки имеют, как правило, выштампованные щели шириной 3... 8 мм (см. рис. 7.14, б).

Волнистые тарелки изготавливают гофрированием металлических листов с отверстиями (см. рис. 7.14, в). В этих тарелках слив жидкости в основном происходит через отверстия в нижних изгибах тарелки, а газ проходит в основном через ее верхние изгибы. Такое устройство провальных тарелок увеличивает интервал их устойчивой работы, однако они сложнее в изготовлении и монтаже, чем дырчатые и решетчатые тарелки.

Трубчатые тарелки обычно изготавливают в виде решетки из ряда параллельных труб (см. рис. 8.14, з), присоединенных к коллектору. Эти тарелки целесообразно применять при необходимости подвода теплоты к жидкости или, ее отвода. К недостаткам трубчатых тарелок следует отнести сложность изготовления и монтажа, большой расход металла.

Поскольку дырчатые и решетчатые тарелки, просты по устройству и монтажу, обладают низким гидравлическим сопротивлением и другими достоинствами, то они более широко применяются в промышленности по сравнению с другими провальными тарелками.

По степени очистки выбросов от газообразных загрязнителей все конструкции тарелок примерно равнозначны.

Тарельчатые колонны имеют стандартизированный ряд диаметров от 400 до

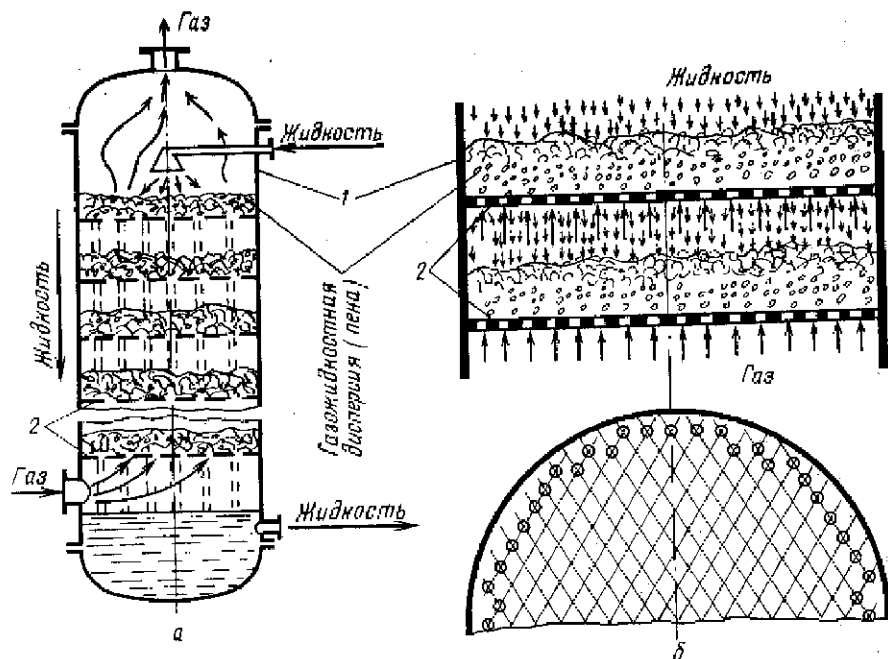


Рис. 7.13. Устройство колонны и провальных тарелок: а – колонна с провальными тарелками; б – две соседние дырчатые провальные тарелки; 1 – колонна; 2 – тарелки

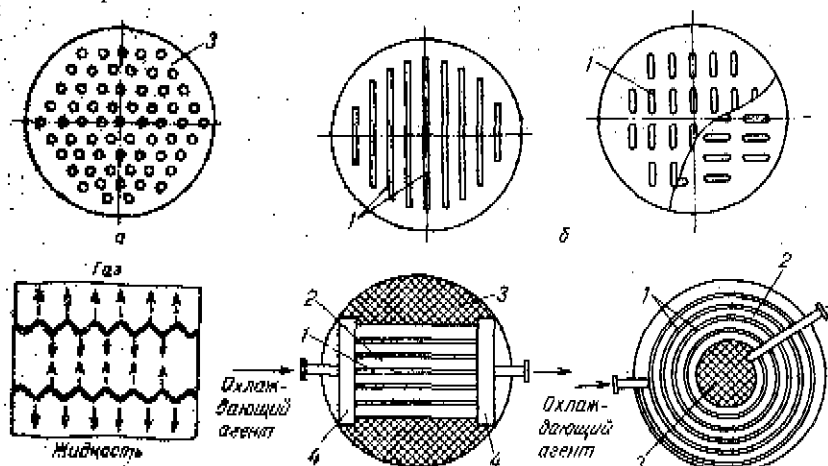


Рис. 7.14. Типы провальных тарелок: а – дырчатая (в плане); б – решетчатые (в плане); в – волнистая (в продольном сечении); г – трубчатая (в плане); 1 – листы; 2 – трубы; 3 – перфорированный лист; 4 – коллекторы

7.3.3. Распыливающие абсорберы

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

- 1) 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.

Полые распыливающие абсорберы (рис. 7.15) представляют собой полые колонны. В этих абсорберах газ движется снизу вверх, а жидкость подается через расположенные в верхней части колонны 1 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. Поэтому распылительные форсунки в полых абсорберах часто устанавливают на нескольких уровнях.

Полые распыливающие абсорберы отличаются простотой устройства, низкой стоимостью, малым гидравлическим сопротивлением, их можно применять для обработки сильно загрязненных газов.

К недостаткам полых распыливающих абсорберов, помимо их низкой эффективности, относятся также низкие скорости газа (до 1 м/с) во избежание уноса, неудовлетворительная их работа при малых плотностях орошения, достаточно высокий расход энергии на распыление жидкости. Распыливающие полые абсорберы целесообразно применять для улавливания хорошо растворимых газов.

Скоростные прямоточные распыливающие 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 4. К этому типу аппаратов относится абсорбер Вентури (рис. 7.16), основной частью которого является труба Вентури. Жидкость поступает в конфузور 1, течет в виде пленки и в горловине 2 распыляется газовым потоком. Затем жидкость газовым потоком выносится в диффузор 3, в котором скорость газа снижается и его кинетическая энергия переходит в энергию давления с минимальными потерями. Отделение капель от газа происходит в сепараторе 4.

Механические распыливающие абсорберы. В этих абсорберах разбрызгивание жидкости производится с помощью вращающихся устройств, т.е. с подводом внешней энергии для развития поверхности фазового контакта. На рис. 7.17 представлен такой абсорбер, в котором разбрызгивание жидкости осуществляется с помощью лопастей (рис. 7.17,а) или дисков (рис. 7.17,б), закрепленных на горизонтальных валах 1. Разбрызгивающие элементы 2 устанавливают так, что газ движется перпендикулярно или параллельно осям их валов.

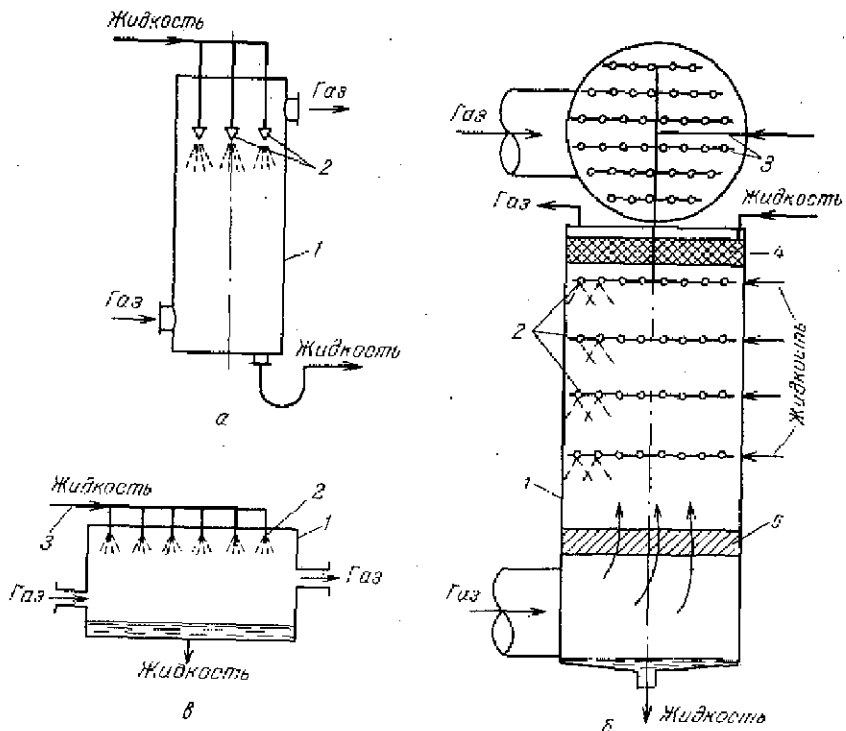


Рис. 7.15. Устройство полых распыливающих абсорберов: а – вертикального с верхним распылом жидкости; б – вертикального с распылом жидкости по высоте аппарата; в – горизонтального с перекрестным током; 1 – корпус; 2 – форсуночный коллектор орошающей жидкости; 4 – брызготбойник; 5 – газораспределитель

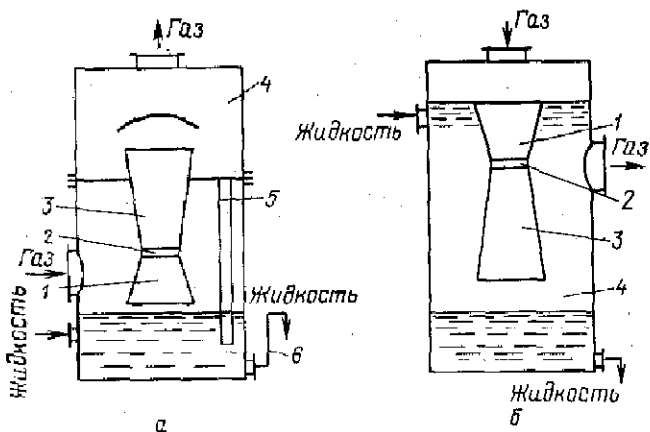


Рис. 7.16. Устройство бесфорсуночного абсорбера Вентури: а – с эжекцией жидкости; б – с пленочным орошением; 1 – конфузоры; 2 – горловины; 3 – диффузоры; 4 – сепараторы; 5 – циркуляционная труба; 6 – гидравлический затвор

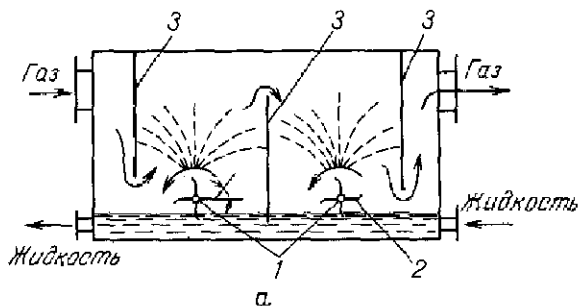
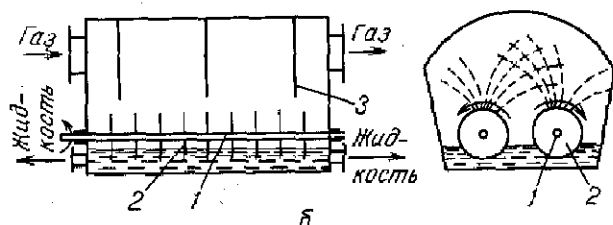


Рис. 7.17. Механические распыляющие абсорберы: а – с разбрызгиванием жидкости валками лопастного типа; б – с разбрызгиванием жидкости дисками; 1 – валы; 2 – разбрызгиватели; 3 – перегородки



По сравнению с абсорберами других типов механические абсорберы более компактны и эффективны, но они значительно сложнее по конструкции и требуют больших затрат энергии для проведения процесса. Поэтому механические распыляющие абсорберы целесообразно применять в тех случаях, когда распыление с помощью форсунок или газом, взаимодействующим с жидкостью, по каким-либо причинам не представляется возможным.

Большинство рассмотренных выше аппаратов используется и для проведения других процессов массопереноса, прежде всего для ректификации и жидкостной экстракции.

7.4. Десорбция загрязнителей из абсорбентов

В результате удаления газообразных загрязнителей путем абсорбции происходит переход этих загрязнителей в раствор, как правило, весьма разбавленный. Чтобы избежать проблем, связанных с удалением таких растворов, желательно их каким-либо образом утилизировать. Если загрязняющее вещество абсорбируется в чистом виде (не реагируя с другими химическими веществами), его практически всегда можно получить в концентрированной форме путем отгонки абсорбирующей жидкости. Полученное таким образом вещество в принципе может быть использовано в том же самом производственном процессе или в других процессах. Иногда в результате перевода в другую форму этот материал может служить исходным сырьем для промышленных предприятий или использоваться жителями близлежащих районов. После нейтрализации уловленного вещества возможны его осаждение или концентрирование в растворе, а также сушка с получением продукта, имеющего определенную товарную ценность, пусть даже достаточную только для того, чтобы покрыть расходы на транспортировку. Выделенные сульфат и сульфит натрия (в жидком и в твердом виде) могут найти применение на бумажных фабриках. В результате их реакции с аммиаком можно

получить удобрения.

При обработке известью или другими реагентами загрязняющие вещества могут быть выделены из абсорбционного раствора в виде нерастворимого осадка. Этот осадок концентрируют путем отстаивания, а затем из него удаляют воду фильтрацией или центрифугированием. Однако во многих случаях осадки после обезвоживания содержат не более 30... 50 % твердых веществ, что создает серьезные проблемы при их удалении. Сброс в водоемы, как правило, запрещен или трудно осуществим. Для сброса отходов можно использовать свободные земельные участки, однако при этом следует учитывать возможность вредных последствий для окружающей среды, к которым приведет такой метод в будущем. Кроме того, после закапывания осадков в землю данные участки могут оказаться непригодными для строительства, поскольку сопротивление грунта нагрузке снижается.

Серьезную проблему представляет выделение хлоридов, нитратов и нитритов, поскольку их осаждение – дорогостоящий процесс. В случае хлоридов необходимо учитывать возможность их очистки и использования в качестве сырья для получения хлора. Нитрит можно окислить в нитраты и после концентрирования использовать в качестве компонента удобрений.

В случае органических загрязнителей наиболее эффективной, повидимому, является отгонка и выделение вещества в концентрированном виде, даже в тех случаях, когда выделяемый материал может быть использован только в качестве топлива. Если органическое соединение растворимо в воде и способно подвергаться биологическому разрушению, то более экономичной может оказаться однократная абсорбция водой с последующим биологическим разложением, особенно в тех случаях, когда образующиеся растворы сильно разбавлены и отгонка малоэффективна. Граничное значение концентрации загрязнителя в обрабатываемом газе, при котором целесообразно переходить от отгонки к биологическому разрушению, обычно составляет $100... 300 \text{ млн}^{-1}$ (по объему).

Помимо отгонки, существуют и другие методы регенерации отработанного абсорбционного раствора. К ним относятся обработка озоном и другими окислителями (H_2O_2 , HClO , KClO_4 , KMnO_4 , HNO_3 и др.), гидролиз (возможен при высоких температурах и давлениях), обработка другими реагентами, в результате которой получают:

- а) нетоксичные отходы;
- б) несмешивающиеся продукты, которые можно отделить отстаиванием;
- в) нерастворимые осадки.

Можно использовать также адсорбцию органических веществ глинами, древесным углем, опилками и смолами; экстракцию растворителями; обработку твердыми или жидкими ионообменными материалами; охлаждение абсорбционного раствора, приводящее к кристаллизации загрязнения.

Для однократной абсорбции иногда применяют воду, однако использование для этой цели органических жидкостей возможно только в очень редких, специальных случаях. Если такая возможность представляется, ею пренебрегать не следует. Примером может служить использование в качестве абсорбента органического сырья или топливных нефтей, которые после абсорбции непосредственно направляются на переработку или на сжигание.

7.5. Адсорбционная очистка газов

Адсорбция позволяет почти полностью извлечь из газовой смеси загрязняющие компоненты, она дает возможность осуществлять глубокую очистку газов. Этим объясняется все большее применение в защите окружающей среды адсорбционных методов разделения и очистки там, где другие методы оказываются недостаточно эффективными.

Процесс адсорбции происходит на поверхности твердого пористого тела – адсорбента, где ненасыщенные поверхностные силы вступают во взаимодействие с силовыми полями адсорбируемых молекул.

Адсорбенты, используемые в системах очистки отходящих газов, должны удовлетворять следующим требованиям: иметь большую адсорбционную способность при поглощении компонентов при небольших концентрациях их в газовых смесях, обладать высокой селективностью, иметь высокую механическую прочность, обладать способностью к регенерации и иметь низкую стоимость.

На практике нашли применение следующие адсорбенты: активные угли, силикагели, алюмогели и цеолиты. Характеристика и области применения некоторых *активных углей* представлены в табл. 7.3.

Таблица 7.3. Характеристика и области применения активных углей

Марка адсорбента	Размер гранул, мм	Насыпная плотность, кг/м ³	Время защитного действия, мин	Предельный адсорбционный объем микропор, см ³ /г	Область применения
БАУ	1-5	350	-	0,26	Адсорбция газов и паров
СКТ	1-3,5	380-500	70	0,45-0,59	То же
АГ-3	1,5-2,7	450	38	0,3	То же
АГ-5	1-1,5	450	45	0,3	То же
САУ	1-5	450	-	0,36	То же
КАУ	1-5	400	-	0,33	То же
АР-3	1-5,5	550	-	0,33	Для рекуперации
АРТ	1-6	550-600	-	0,33	То же
СКТ-3	1-3,5	420-450	-	0,46	То же

Силикагели используют для осушки газов и поглощения паров полярных органических веществ (например, метилового спирта). Промышленность выпускает кусковые и гранулированные силикагели с зёрнами размером 0,2... 7 мм, насыпной плотностью 400... 900 кг/м³.

По сравнению с углями силикагели негорючи и имеют низкую температуру

регенерации (100... 200°C), низкую стоимость и относительно высокую механическую прочность к истиранию.

Алюмогели (активный оксид алюминия) используются для осушки газов и поглощения полярных органических веществ из газовых смесей. Промышленность выпускает гранулированные алюмогели цилиндрической формы (диаметр гранул 2,5... 5,0 мм и высота 3... 7 мм, насыпная плотность 500... 700 кг/м³, средний радиус пор $6 \cdot 10^{-9}$... 10^{-8} м), а также шарообразной формы (диаметр частиц 3... 4 мм, насыпная плотность 600... 900 кг/м³, средний радиус пор $3 \cdot 10^{-9}$... $4 \cdot 10^{-9}$ м).

Цеолиты – алюмосиликаты, содержащие оксиды щелочных и щелочноземельных металлов. Они подразделяются на природные и синтетические. Из природных цеолитов практически используются клиноптило-лит, морденит, шабазит, эрионит. Клиноптилолит имеет размер пор до $(3,5... 4) \cdot 10^{-10}$, а объем микропор 0,15 см³/г.

Используются синтетические цеолиты следующих марок: Цеолит КА NaA CaA CaX NaX

Размер входных $3 \cdot 10^{-10}$ $4 \cdot 10^{-10}$ $5 \cdot 10^{-10}$ $8 \cdot 10^{-10}$ 10^{-9}

«окон», м Примечание. Первый индекс марки соответствует форме катионов, а второй обозначает тип кристаллической решетки.

Синтетические цеолиты выпускаются в виде гранул шарообразной формы (диаметр 2... 5 мм) и цилиндрической формы ($d = 2... 4$ мм и длина 2... 4 мм).

Цеолит КА используется только для осушки газов; цеолит NaA адсорбирует газы, критический размер молекул которых не превышает $4 \cdot 10^{-10}$ м (сероводород, сероуглерод, аммиак, этан, пропилен, метан, оксид углерода и др.), цеолит CaA поглощает углеводороды и спирты только нормального строения. Цеолиты CaX и NaX имеют большие входные «окна» и сорбируют все молекулы, адсорбируемые цеолитами NaA и CaA, а также нафтеновые и ароматические углеводороды, органические сернистые, азотистые и кислородные соединения, галогензамещенные углеводороды с открытой цепью и др.

Для очистки газовых выбросов от вредных примесей в последнее время используются активированные углеродные волокна. Достоинства их по сравнению с активными углями следующие: они обладают фильтрующими и адсорбционными свойствами, высокой скоростью процессов адсорбции – десорбции, а также высокой химической, термической и радиационной стойкостью.

7.5.1. Технология адсорбционной очистки промышленных выбросов

Наиболее широкое применение методы адсорбции находят в тех случаях, когда необходимо снизить содержание загрязняющих веществ до очень низких, следовых значений (от миллиардных долей до нескольких миллионных долей). Многие загрязнители с сильным запахом обнаруживаются уже при содержаниях порядка 100 млрд^{-1} ; для полного удаления запаха концентрация загрязняющего вещества должна быть снижена до более низких значений, чего невозможно достичь, применяя большинство других методов обработки. Подобные задачи возникают в пищевой промышленности (удаление запахов при консервировании, обжиге кофе, переработке рыбы, вытапливании сала, ферментации, жарении и выпечке), в химической и перерабатывающей промышленности (в частности, в

производстве клея и при переработке природных материалов, таких как кровь и железы, при дублении в производстве бумаги), а также при осуществлении других процессов, например, в литейном производстве, при нанесении лакокрасочных и других покрытий, и в лабораториях, где проводятся эксперименты на животных.

Адсорбция менее эффективна при необходимости удаления больших концентраций загрязняющих веществ, поскольку при этом необходима большая адсорбционная емкость или большое количество адсорбента. В тех случаях, когда концентрации загрязнений невелики и обработке подвергается большое количество воздуха, адсорбция может оказаться очень эффективной для удаления летучих углеводородов и органических растворителей. Наиболее целесообразно использовать этот метод для удаления паров ядовитых веществ и предполагаемых канцерогенов в тех случаях, когда содержание примесей должно быть снижено до нескольких миллионных долей или ниже.

Широкое применение находит адсорбция для удаления паров растворителя из отработанного воздуха при окраске автомобилей, органических смол и паров растворителя в системе вентиляции предприятий по производству стекловолокна и стеклоткани, а также паров эфира, ацетона и других растворителей в производстве нитроцеллюлозы и бездымного пороха. Адсорбенты используются для очистки выхлопных газов автомобилей и для удаления ядовитых компонентов, например H_2S из газовых потоков, выбрасываемых в атмосферу через лабораторные вытяжные шкафы. Адсорбция применяется и для удаления радиоактивных газов при эксплуатации ядерных реакторов, в частности, радона и радиоактивного иода.

Адсорбция находит применение и в тех случаях, когда необходимо более или менее избирательное удаление определенных газообразных компонентов из смеси. Помимо использования для осушки газов, импрегнированные адсорбенты имеют и другие области применения, связанные с их селективностью, например, для удаления этилена из отходящих газов. Молекулярные сита использовались для удаления паров ртути на предприятиях по производству хлора и щелочи, где применяются электролизеры с ртутным электродом. Проведены эксперименты по удалению SO_2 на молекулярных ситах. Адсорбция применяется для удаления неорганических загрязнений из топочных газов.

В некоторых случаях, в частности при обработке горючих газов, для разрушения токсичных органических веществ может быть использовано дожигание, однако применение этого метода затруднено тем, что концентрации органических примесей, распределенных в большом объеме воздуха, очень низки. Для того чтобы нагреть такие большие количества воздуха до температур, при которых проводится дожигание, расходуется очень большое количество энергии, даже при использовании специальной аппаратуры, обеспечивающей усиленный теплообмен в газовой фазе. Экономичность процесса дожигания может быть значительно повышена благодаря адсорбционному концентрированию загрязнений перед дожиганием. Наибольший экономический эффект достигается в тех случаях, когда объемная концентрация загрязнителей составляет $20 \dots 100 \text{ млн}^{-1}$, хотя метод остается эффективным и при концентрациях до 300 млн^{-1} . Обработываемые газы пропускают через слой адсорбента обычным образом, а насыщен-

ный адсорбент продувают воздухом, который затем поступает на дожигание. Такой метод позволяет повысить концентрацию загрязнителя в 40 раз. Адсорбционное концентрирование оказалось целесообразным при объемных концентрациях загрязнителя до 300 млн^{-1} , причем эффективность адсорбционной обработки резко возрастает с увеличением объема обрабатываемого газа.

7.5.2. Адсорбция паров органических растворителей

Выбросы паров растворителей происходят при их хранении и при использовании в технологических процессах. Для их рекуперации используют мелкопористые адсорбенты: активные угли, силикагели, алюмогели, цеолиты, пористые стекла. Наиболее предпочтительны для решения этой задачи активные угли, поскольку эти гидрофобные адсорбенты хорошо сорбируют пары органических растворителей при относительной влажности очищаемых парогазовых смесей до 50%. Рентабельность рекуперационных установок зависит от концентрации паров летучих растворителей: наименьшая концентрация для бутилацетата равна $1,5 \text{ г/м}^3$; толуола – 2 г/м^3 ; ацетона – 3 г/м^3 ; бензола – 2 г/м^3 ; бензина – 2 г/м^3 ; сероуглерода – 6 г/м^3 .

Поглощение паров летучих растворителей производится в рекуперационных установках со стационарным слоем адсорбента, размещаемых в вертикальных, горизонтальных или кольцевых адсорберах. Адсорберы вертикального типа используют при небольших потоках очищаемых парогазовых смесей, горизонтальные и кольцевые аппараты применяют для обработки смесей при высоких скоростях потока. Рекуперационные установки периодического действия работают по четырех-, трех-, и двухфазному циклам. Четырехфазный цикл включает последовательно фазы адсорбции, десорбции, сушки и охлаждения. В трехфазном цикле исключается одна из фаз сушки или охлаждения. Двухфазный цикл включает две операции: адсорбцию и десорбцию, при этом процесс адсорбции совмещают с сушкой и охлаждением поглотителя. Для непрерывности рекуперационного процесса установка улавливания паров летучих растворителей должна включать как минимум два адсорбера периодического действия.

В последнее время большое развитие получили непрерывнодействующие установки с движущимся плотным или псевдооживленным слоем адсорбента, к преимуществам которых относятся высокие скорости обрабатываемых потоков, компактность оборудования, высокая степень использования адсорбентов, низкие энергозатраты, возможность автоматизации процесса. Совершенствуются также углеродные материалы – поглотители в виде углеродных волокон, обеспечивающие высокую степень (более 99%) рекуперации растворителей, пониженную пожаро- и взрывоопасность, снижение потерь растворителей из-за термического разложения. Для более глубокой очистки парогазовых потоков от паров летучих растворителей используют комбинированные методы, сочетающие различные процессы очистки. Например, при рекуперации смеси фенола и этанола из отходящих газов для улавливания паров фенола используют абсорбционный метод, а для улавливания паров этанола – адсорбционный.

7.5.3. Очистка газов от оксидов азота

Как абсорбционные, так и адсорбционные приемы поглощения слабоокислительных нитрозных газов малоэффективны вследствие значительной инертности NO.

В промышленной практике очистка отходящих газов от оксидов азота при использовании адсорбентов – поглотителей ограничена. Хемосорбционная очистка газов от оксидов азота применима на основе использования твердых веществ, способных вступать в химическое взаимодействие с NO_x.

С целью улавливания NO_x из отходящих газов разработан метод адсорбции оксидов азота торфошелочными сорбентами в аппаратах кипящего слоя. Степень очистки газов, содержащих 0,1...2% NO_x при времени контакта фаз 1,6...3 с, достигает 96...99%.

Еще больший эффект достигается при использовании торфа, обработанного аммиаком. Недостатком этого метода является возможность самовозгорания торфа.

Для денитрификации отходящих газов возможно использование бурых углей, фосфатного сырья, лигнина. Твердые отходы – продукты газоочистки не подлежат регенерации и могут использоваться как органоминеральные удобрения и промышленные реагенты. В качестве других доступных и дешевых поглотителей NO_x могут использоваться известь, известняк, сланцевая зола. Отработанные хемосорбенты можно использовать для нейтрализации кислых стоков и в качестве азотосодержащих удобрений.

7.5.4. Очистка газов от диоксидов серы

Для очистки дымовых газов от диоксида серы используют твердые хемосорбенты путем их введения в пылевидном состоянии в топки или газоходы теплоэнергетических агрегатов. В качестве хемосорбентов могут быть использованы известняк, доломит или известь.

Для увеличения активности хемосорбентов вводят специальные добавки в виде неорганических солей, оксихлорида меди, оксида магния. К сухим способам относится поглощение диоксида серы углеродными поглотителями (активные угли и полукокс) при температуре 110...150 °С. Эффективность углеадсорбционной очистки достигает 90...95 %. Для регенерации насыщенных поглотителей могут быть использованы термический (до 400...450 °С) и экстракционный (подогретой водой) способы.

Разработан процесс для адсорбции SO₂ из отходящих газов, в котором происходит адсорбция и каталитическое окисление SO₂ в движущемся слое активированного угля, а также процесс с использованием щелочного оксида алюминия, гранулы которого содержат 56% Al₂O₃ и 37% Na₂O.

7.5.5. Очистка от хлора и хлорида водорода

Газообразный хлор хорошо поглощается твердыми органическими соединениями, такими как: лигнин, лигносульфонат кальция, представляющие собой отходы процессов химической переработки древесины и растительного сырья. В качестве твердых поглотителей хлорида водорода из отходящих газов могут быть использованы хлороксид железа, хлорид закисной меди, сульфаты и фосфаты меди, свинца, кадмия, а также цеолиты. Эти поглотители используются для

обработки низкоконцентрированных по HCl газов (до 1 об.%) в широком интервале их температур. Для удаления HCl из отходящих газов возможно использовать порошок негашеной извести. Контакт ее с газами осуществляют в реакторе кипящего слоя или непосредственно в газоходе. Отделенный от газа поглотитель после регенерации можно вернуть в процесс.

7.5.6. Очистка газов от сероводорода

Глубокую очистку газов от H₂S обеспечивают адсорбционные методы с использованием гидроксида железа, активного угля, цеолитов и других поглотителей.

Эффективным поглотителем H₂S является активный уголь. Высокая экзотермичность процессов окисления H₂S в адсорбенте приводит к интенсивному разогреву слоя поглотителя и к риску возгорания угля. В этой связи очистку газов активными углями от H₂S проводят при концентрации загрязнителя до 5 г/м³. Сероемкость используемых для очистки газов от H₂S активных углей составляет 200... 520 кг/м³. При высоте слоя угля более 1 м достигаемая степень насыщения поглотителя превосходит 90%.

Регенерацию насыщенных углей проводят раствором сульфида аммония (NH₄)₂S.

Экстрагированный уголь освобождают от сульфидной серы промывкой его водой, отпаривают для удаления аммонийных солей и сушат.

Эффективным средством очистки газов от H₂S являются синтетические цеолиты при обработке газов с содержанием серы ≤ 2 %. Концентрация серы в очищаемых ими газах может быть снижена до 1 мг/м³ и ниже.

В практике очистки от H₂S технологических газов находят применение поглотители, получаемые на основе оксида цинка, оксидов цинка и меди.

Процессы очистки с использованием этих хемосорбентов требуют предварительного нагрева обрабатываемых газов. Отработанные поглотители обычно не регенерируют в связи со сложностью процесса десорбции.

7.5.7. Устройство и принцип действия адсорберов

Для очистки газов используют адсорберы периодического и непрерывного действия. Существуют различные конструкции адсорберов: периодического и непрерывного действия, горизонтальные и вертикальные и т.д.

7.5.8. Адсорберы периодического действия

К аппаратам периодического действия относятся вертикальные, горизонтальные, кольцевые адсорберы, а также выполненные в виде трубчатого теплообменника. Единичная производительность вертикальных однослойных адсорберов обычно не превышает 10000 м³/ч.

Адсорберы периодического действия могут быть с неподвижным слоем и с кипящим слоем адсорбента.

Основным положительным фактором адсорбционных установок периодического действия с неподвижным слоем адсорбента является отсутствие в них истирания частиц сорбента в результате трения одна о другую и о стенки аппарата, трубопровода и т.п. В адсорберах периодического действия достигается доста-

точно высокая степень очистки и осушки га-зов, подаваемых в аппарат.

Основными недостатками адсорберов периодического действия являются небольшие скорости газового потока в шихте и относительно малая доля сорбента, активно участвующего в процессе (зона массопередачи, как правило, значительно меньше общей толщины слоя). Кроме того, большое сечение горизонтальных адсорберов не обеспечивает равномерности распределения парогазовых потоков по сечению и, следовательно, и полноты использования адсорбционной емкости сорбента. Поэтому вертикальные адсорберы по сравнению с горизонтальными более рациональны в использовании. Адсорберы горизонтальной конструкции целесообразно применять при очистке больших количеств газа от хорошо сорбирующихся примесей.

В адсорбционных установках периодического действия предусматривают несколько адсорберов для различных технологических стадий – адсорбции, десорбции, сушки или охлаждения.

Адсорберы с неподвижным слоем представляют собой цилиндрические вертикальные или горизонтальные емкости, заполненные слоем адсорбента. В таких аппаратах адсорбцию проводят по стадиям: 1) адсорбция; 2) десорбция; 3) сушка адсорбента и 4) охлаждение адсорбента. Новые конструкции адсорберов периодического действия позволяют более эффективно провести процесс. К ним относят адсорбер полочного многосекционного типа (рис. 7.18).

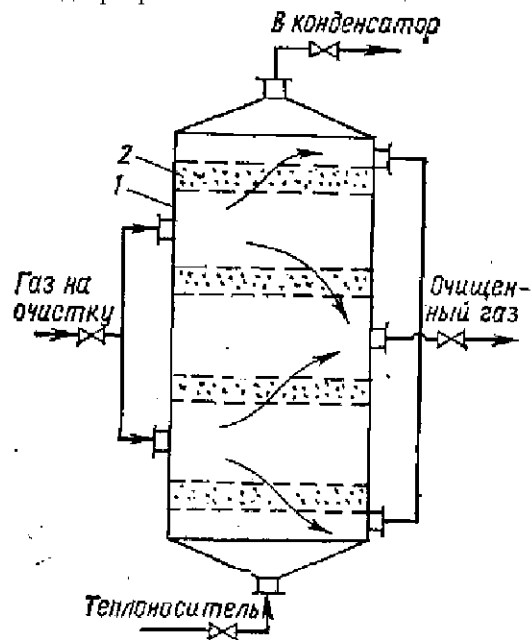


Рис. 7.18. Адсорбер полочного типа с неподвижными слоями адсорбента.

Размещая адсорбент в аппарате горизонтально высоким слоем, можно практически устранить влияние неравномерности слоя на степень очистки газов, но при этом возрастает аэродинамическое сопротивление адсорбера. Кроме того частицы адсорбента в высоком слое интенсивно прогреваются из-за слабого теплоотвода из зоны конденсации, что уменьшает сорбционную емкость адсорбента

и нежелательно вследствие возможности возгорания. Если концентрация загрязнителя высока, то может стать необходимым и искусственное охлаждение слоя адсорбента.

Однократное использование адсорбентов в аппаратах периодического действия может предусматриваться при необходимости эпизодической обработки или очистки малых количеств загрязненных газов; при низких концентрациях загрязнителей; при очистке газов, содержащих бактериологические, радиоактивные загрязнения или высокие дозы сильнодействующих ядовитых веществ. В таких случаях удобнее всего упаковывать адсорбент в кассеты совместно с фильтрами или помещать в контейнеры с присоединительными элементами.

Продолжительность работы периодических адсорберов на стадии адсорбции определяется полнотой поглощения загрязняющего компонента.

Для нестационарного адсорбера с закрепленным слоем необходимо определить момент проскока. Проскок происходит, когда изменяющаяся концентрация загрязнителя в выходящем газовом потоке достигает определенного заданного значения, которое может быть, например, равно величине, допускаемой стандартами для данного выброса. Время, необходимое для достижения проскока, определяется из уравнений массопереноса и условий равновесия; оно, в свою очередь, позволяет определить необходимое количество адсорбента. Диаметр адсорбционного слоя рассчитывают, как и в случае абсорбции, исходя из допустимой величины гидравлического сопротивления.

В адсорберах с неподвижным слоем газ непрерывно проходит через адсорбент, который в начальный момент времени не содержит адсорбата (рис. 7.19).

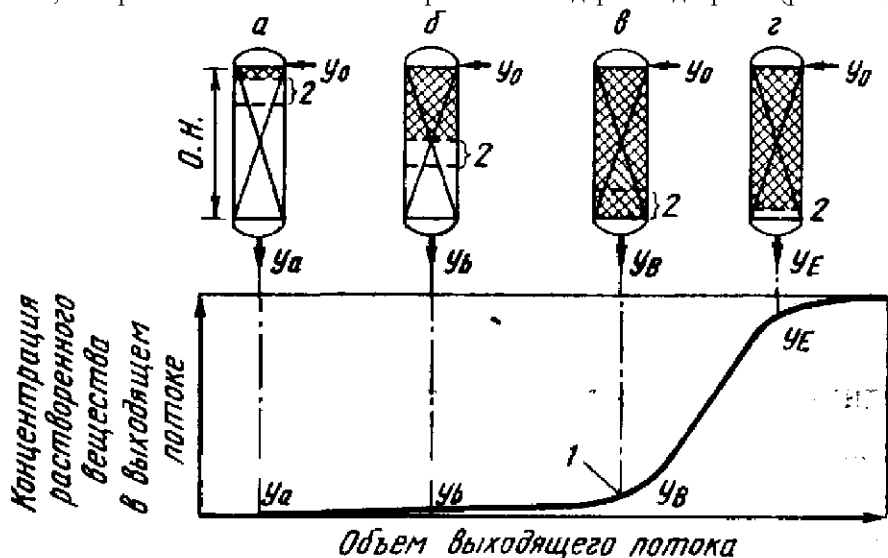


Рис. 7.19. Нестационарная адсорбция в закрепленном слое сорбента: 1 – точка проскока; 2 – адсорбционная зона; О. Н. – объем, заполненный насадкой

Сначала адсорбент контактирует с поступающим концентрированным раствором. В результате прохождения через весь слой адсорбента почти все раство-

ренное вещество удаляется из раствора. Рис. (рис. 9.2) иллюстрирует процесс при подаче потока сверху вниз; рис. (рис. 9.2,а) соответствует случаю, когда выходящий поток практически не содержит растворенного вещества.

Самая верхняя часть слоя насыщается, и основная адсорбция происходит в сравнительно узкой части слоя сорбента, где концентрация быстро изменяется. Эта узкая адсорбционная зона смещается вниз по слою, образуя концентрационную волну; скорость смещения намного меньше, чем линейная скорость газа, проходящего через слой сорбента. С течением времени концентрация растворенного вещества в выходящем потоке возрастает. Когда она достигает заранее заданного предельного значения, которое, например, может определяться требованиями законодательства по охране окружающей среды, считают, что произошел проскок. После этого концентрация растворенного вещества быстро возрастает, так как адсорбционная зона выходит за пределы слоя сорбента; в конечном итоге концентрация растворенного вещества на выходе становится такой же, как и в исходном растворе. Зависимость концентрации от объема выходящего потока в этой области носит название *кривой проскока*.

Если пары вещества адиабатически адсорбируются из газовой смеси, то тепловыделение в процессе адсорбции описывается температурной кривой, которая проходит по слою сорбента аналогично кривой адсорбции. Повышение температуры выходящего потока может служить указанием на приближение проскока.

Время, через которое происходит проскок, и форма кривой проскока оказывают значительное влияние на режим работы адсорберов с неподвижным слоем. Форма кривой определяется фактической скоростью и механизмом адсорбционных процессов, природой адсорбционного равновесия, скоростью подачи жидкости, концентрацией растворенного вещества и высотой слоя сорбента. В некоторых случаях точка проскока выражена очень резко, а иногда ее весьма трудно обнаружить.

Как правило, время до наступления проскока уменьшается с уменьшением высоты слоя и увеличением размера частиц адсорбента, скорости подачи сырья и концентрации растворенного вещества в нем. При проектировании процесса требуется определять время до наступления проскока, для чего необходимо построение кривой проскока.

В схеме, приведенной на рис. 7.20, адсорбер может работать по трем технологическим циклам: четырехфазному, трехфазному и двухфазному. При четырехфазном цикле последовательно проводятся адсорбция, десорбция, сушка и охлаждение адсорбента. Три последние стадии представляют собой процесс регенерации адсорбента, т.е. восстановления его способности поглощать целевые компоненты из исходной смеси. В трехфазном цикле адсорбент после регенерации охлаждается исходной смесью в начале фазы адсорбции. При двухфазном цикле часть исходной смеси подается в адсорбер сначала с подогревом, а потом без него, или же в течение всей стадии адсорбции смесь подается при одной температуре. Этим достигается совмещение сушки и охлаждения со стадией адсорбции.

Непрерывность процесса по газовой фазе обеспечивается соединением нескольких одинаковых адсорберов в батарею.

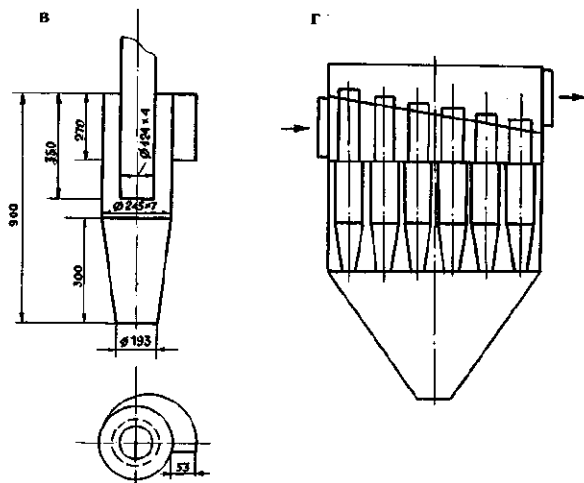


Рис. 7.20. Схема адсорбционной установки периодического действия с неподвижным слоем адсорбента: 1 – адсорбер, 2, 10, 12 – вентиляторы, 3 – фильтры, 4 – огнепреградитель, 5, 8 – холодильник, 6 – разделитель, 7 – конденсатор, 9 – сборник, 11 – калорифер, 13 – гидрозатвор

Несомненным достоинством таких установок является их простота и надежность, что при современных возможностях автоматизации компенсирует недостатки, связанные с периодичностью действия отдельных аппаратов.

Для обеспечения непрерывной работы установки необходимо иметь в схеме не менее двух адсорберов. Обычно, учитывая разное время протекания стадий, в одной установке монтируют от трех до шести адсорберов.

Приведенная на рис. 7.21 схема адсорбционной установки рекуперации летучих растворителей работает по четырехфазному циклу.

Исходная смесь подается в адсорбер 1 вентиляторами 2 через рукавные фильтры 3, огнепреградитель 4 с разрывными мембранами и холодильник 5. Число адсорберов определяется в соответствии с графиком работы установки, составляемым в зависимости от производительности одного аппарата и продолжительности отдельных фаз цикла.

Очищенный в результате адсорбции газ удаляется из адсорбера. По окончании фазы адсорбции линия подачи исходной смеси (вентилятор, фильтр, огнепреградитель, холодильник) переключаются на следующий адсорбер, в котором уже прошли стадии регенерации адсорбента (десорбция, сушка, охлаждение), а в первом аппарате начинается десорбция.

Острый пар давлением 0,3...0,5 МПа подается на десорбцию в адсорбер 1 (давление в адсорбере до 0,05 МПа) через штуцер Б. Смесь извлекаемого компонента с так называемым динамическим паром (пар, который не конденсируется в слое адсорбента) выходит из адсорбера через штуцер А и поступает через разделитель 6 в конденсатор 7, холодильник 8 и сборник 9. Из сборника 9 смесь идет на разделение (отстаивание, ректификация и т.д.).

Образовавшийся в адсорбере конденсат греющего пара (часть пара, идущего на нагрев системы до температуры процесса, на десорбцию извлекаемого компонента, на компенсацию отрицательной теплоты смачивания адсорбента водой и на компенсацию потерь тепла) удаляется через гидрозатвор 13.

Воздух для сушки вентилятором 10 нагревается в калорифере 11 до 80...100 °С, подается в адсорбер через штуцер А и удаляется из адсорбера через штуцер

Б. Вентилятор 12 через штуцер А подает на охлаждение адсорбента атмосферный воздух, который удаляется из адсорбера через штуцер Б (при наличии в схеме только двух адсорберов для этой цели может быть использован вентилятор 10). На этом цикл заканчивается, и адсорбер переключается на стадию адсорбции.

Продолжительность фаз процесса принято изображать в виде графиков или таблиц, называемых циклограммами.

Ниже приводится циклограмма работы рекуперационной установки, состоящей из двух адсорберов и работающей по четырехфазному циклу (*a* – адсорбция, *д* – десорбция, *с* – сушка, *о* – охлаждение).

Таблица 7.4 Циклограмма работы рекуперационной установки

Время, ч	1	2	3	4	5	6	7	8
Адсорбер №1	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>д</i>	<i>с</i>	<i>о</i>	-
Адсорбер №2	<i>д</i>	<i>с</i>	<i>о</i>	-	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>
Время, ч	9	10	11	12	13	14	15	
Адсорбер №1	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>д</i>	<i>с</i>	<i>о</i>	
Адсорбер №2	<i>д</i>	<i>с</i>	<i>о</i>	-	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	

Выбор цикла (четырёх-, трёх- или двухфазный) определяется техникоэкономическим расчетом, проводимым в каждом конкретном случае в зависимости от назначения процесса (рекуперация, обезвреживание отходов производства, создание безопасных условий труда и т. п.).

В практике адсорбционной очистки газов наиболее распространены цилиндрические вертикальные и горизонтальные адсорберы.

Вертикальные адсорберы изготавливают нескольких модификаций. Адсорберы с верхним вводом исходной смеси (рис. 7.21) выполняют из стального листа толщиной 8... 10 мм. Цилиндрическая обечайка при высоте до 2,2 м может иметь диаметр 2; 2,5 и 3 м в зависимости от требуемой производительности. Днище и крышка – конические. Высота слоя сорбента выбирается в интервале от 0,5 до 1,2 м. Адсорбент в этих аппаратах помещается на разборных колосниковых решетках, которые располагаются на балках. Последние устанавливают на опоры, приваренные к стенке корпуса адсорбера.

Для предотвращения попадания сорбента под решетку на нее помещают два слоя сетки из нержавеющей стали или слой кускового гравия толщиной 100... 200 мм. Сетку используют с ячейками следующих размеров: нижний слой – от 3,2×3,2 до 4×4 мм при диаметре проволоки 0,9... 1,0 мм; верхний слой – от 1,4×1,4 до 1,8×1,8 мм при диаметре проволоки 0,65... 0,7 мм. При использовании гравия прямо на решетку кладут куски размером 25... 30 мм, на них – размером 15... 20 мм, затем – 7... 15 мм, а на них – 5... 7 мм. Для регенерации активного чаще всего применяют насыщенный водяной пар, который поступает в угольную шихту снизу под решетку. При использовании в качестве подложки слоя гравия для его нагрева требуется значительное дополнительное тепло, поэтому выгоднее применять подложку из сеток. Для предотвращения уноса угля слой сорбен-

та покрывают сверху сеткой с ячейками размером от $2,2 \times 2,2$ до $2,5 \times 2,5$ мм при диаметре проволоки 0,7... 0,8 мм. Сетка фиксируется сверху грузами, представляющими собой чугунные отливки поперечным сечением 25×25 мм, длиной 600... 900 мм.

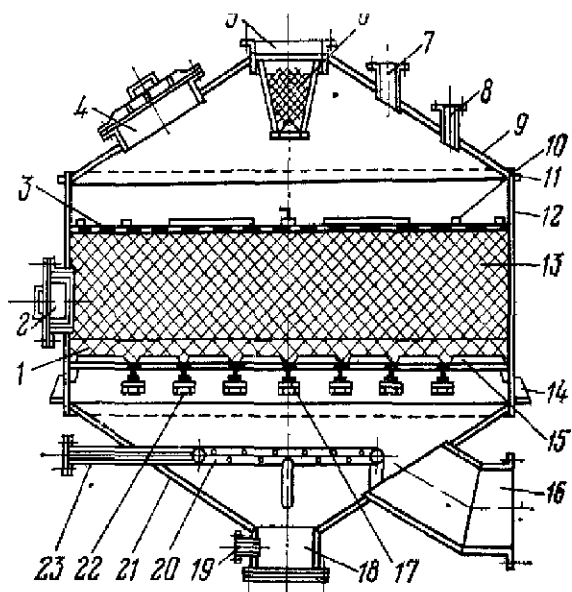


Рис. 7.21. Адсорберы периодического действия с неподвижным слоем поглотителя: 1 – гравий; 2 – разгрузочный люк; 3, 6 – сетка; 4 – загрузочный люк; 5 – штуцер для подачи исходной смеси; 7 – штуцер для отвода паров при десорбции; 8 – штуцер для предохранительного клапана; 9 – крышка; 10 – грузы; 11 – кольцо жесткости; 12 – корпус; 13 – адсорбент; 14 – опорное кольцо; 15 – колосниковая решетка; 16 – штуцер для отвода очищенного газа; 17 – балки; 18 – смотровой люк; 19 – штуцер для отвода конденсата и подачи воды; 20 – барботер; 21 – днище; 22 – опоры балок; 23 – штуцер для подачи водяного пара через барботер

Во входных патрубках помещают на каркасах распределительные проволочные сетки из меди или нержавеющей стали с ячейкой $2,2 \times 2,2$ мм при диаметре проволоки 0,8 мм. Острый водяной пар для ведения десорбции подают через кольцевой барботер, расположенный под решеткой, с отверстиями диаметром 4... 6 мм. На верхней крышке адсорбера имеется штуцер для установки предохранительного клапана.

Горизонтальные адсорберы (рис. 7.22) изготовляют диаметром 1,8 и 2 м при длине цилиндрической части корпуса 3... 9 м; днища эллиптические; высота слоя адсорбента 0,5... 1,0 м. Корпус выполняют из листовой нержавеющей или углеродистой стали толщиной 8... 10 мм. В адсорбер, изображенный на рис. 9.5, исходная смесь, сушильный и охлаждающий газы поступают в верхнюю часть, в пространство над слоем адсорбента. Входные патрубки внутри оборудованы распределительными сетками из меди или нержавеющей стали с ячейками размером $2,2 \times 2,2$ мм при диаметре проволоки 0,8 мм. Очищенный газовый поток отводится из нижней части адсорбера, из пространства под слоем адсорбента. Острый пар на десорбцию подается через барботер с отверстиями диаметром 4... 6 мм. При десорбции смесь паров растворителей с парами воды отводится из адсорбера сверху.

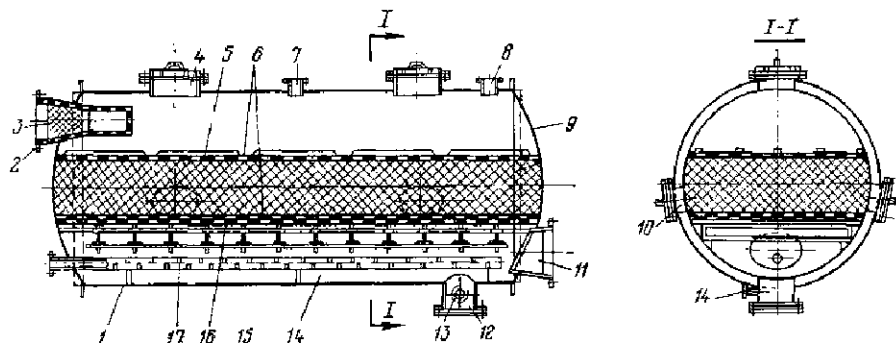


Рис. 7.22. Горизонтальный адсорбер: 1 – корпус; 2 – штуцер для подачи паровоздушной смеси при адсорбции и воздуха при сушке и охлаждении; 3 – распределительная сетка; 4 – загрузочный люк с предохранительной мембраной; 5 – грузы; 6 – сетки; 7 – штуцер для предохранительного клапана; 8 – штуцер для отвода паров на стадии десорбции; 9 – слой адсорбента; 10 – люк для выгрузки адсорбента; 11 – штуцер для отвода очищенного газа на стадии адсорбции и отработанного воздуха при сушке и охлаждении; 12 – смотровой люк; 13 – штуцер для отвода конденсата и подачи воды; 14 – опоры для балок; 15 – балки; 16 – разборная колосниковая решетка; 17 – барботер

Основной недостаток горизонтальных адсорберов – неравномерное распределение потоков по сечению адсорбента и образование застойных зон. Несмотря на простоту конструкции и малое гидравлическое сопротивление, эти адсорберы не нашли широкого применения в промышленности.

Адсорберы кольцевого типа. Для очистки газов от примесей, присутствующих в небольших концентрациях, можно применять кольцевые адсорберы. Вертикальные адсорберы, показанные на рис. 7.23 представляют собой полый цилиндр, в который помещается адсорбент. Они конструктивно сложнее рассмотренных выше адсорберов с плоским слоем, но благодаря большому поперечному сечению шихты более компактны и имеют большую производительность при относительно невысоком гидравлическом сопротивлении.

Аппараты выполняются диаметром до 3,2 м, высотой до 8 м. Загрузочные люки расположены на верхней крышке, а разгрузочный – внизу цилиндрической обечайки. Исходная смесь движется от периферии к центру, что способствует лучшему использованию адсорбента, так как по мере снижения концентрации целевого компонента в смеси уменьшается и площадь сечения слоя. Тип адсорбера выбирают с учетом конкретных условий процесса, причем вертикальные адсорберы применяют на установках малой и средней мощности, производительностью до 30 000 м³/ч исходной смеси. Горизонтальные и кольцевые адсорберы работают на установках средней и большой мощности.

Предложены конструкции, в которых стадии адсорбции и десорбции совмещены в одном корпусе. Однако более интенсивны аппараты непрерывного действия с движущимся слоем адсорбента и псевдооживленным слоем адсорбента. Предложено несколько конструкций аппаратов непрерывного действия.

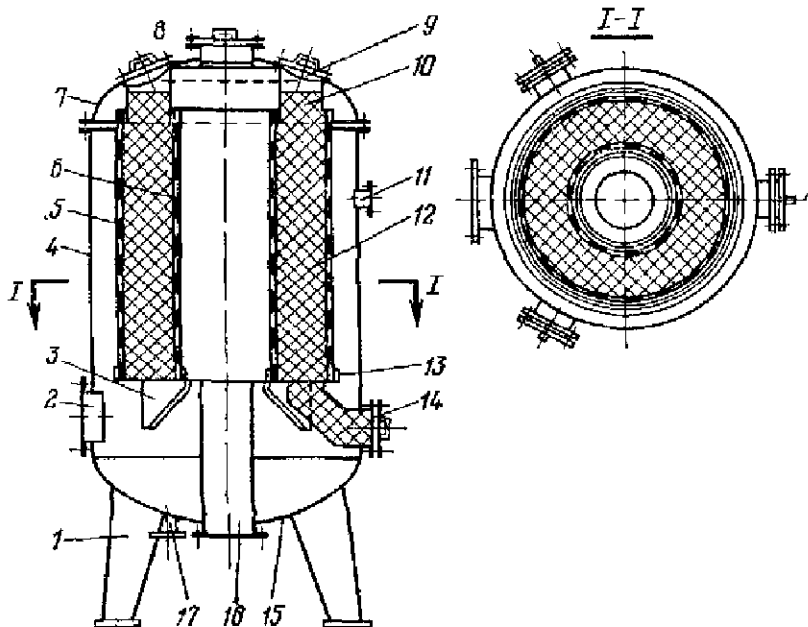


Рис. 7.23. Кольцевой адсорбер: 1 – установочная лапа; 2 – штуцер для подачи паровоздушной смеси, сушильного и охлаждающего воздуха; 3 – опора для базы под цилиндры; 4 – корпус; 5, 6 – внешний и внутренний перфорированные цилиндры; 7 – крышка; 8 – смотровой люк; 9 – загрузочный люк; 10 – бункер-компенсатор; 11 – штуцер для предохранительного клапана; 12 – слой активного угля; 13 – база для цилиндров; 14 – разгрузочный люк; 15 – днище; 16 – штуцер для отвода очищенного и отработанного воздуха и для подачи водяного пара; 17 – штуцер для отвода паров и конденсата при десорбции и для подачи воды

7.5.9. Адсорберы непрерывного действия

Одним из путей интенсификации адсорбционного процесса является применение непрерывной адсорбции. Преимущества непрерывных адсорбционных процессов с движущимся плотным слоем сорбента следующие:

- высокая скорость парогазового потока в шихте (по сравнению со скоростями в стационарном слое);
- высокий коэффициент использования сорбента;
- отсутствие энергозатрат на периодическое нагревание и охлаждение в одном и том же аппарате;
- возможность полной автоматизации и простота обслуживания. Недостатки непрерывных процессов:
- высокие требования к прочности зернистого сорбента (необходимо использовать высокопрочные адсорбенты сферической формы);
- необходимость применения дорогостоящего теплоносителя;

- эрозия аппаратуры;
- низкий коэффициент теплопередачи, что требует большие площади теплообменных поверхностей в колонне (холодильник, десорбер)

Непрерывность процесса может быть достигнута циркуляцией адсорбента в замкнутой системе и распределением в адсорбционной колонне локальных зон, в каждой из которых в оптимальных рабочих условиях осуществляется одна из основных стадий процесса: адсорбция, нагрев и десорбция, охлаждение и т.д.

Адсорбционные установки с движущимся слоем поглотителя относятся к установкам непрерывного действия. Адсорбент перемещается в аппарате плотным слоем под действием силы тяжести, что позволяет организовать непрерывную работу. Эти установки целесообразно применять для выделения целевого компонента из газа-носителя с использованием адсорбционной и десорбционной секций.

Схема адсорбера с движущимся слоем зернистого адсорбента показана на рис. 7.24, с псевдооживленным слоем – на рис. 7.25.

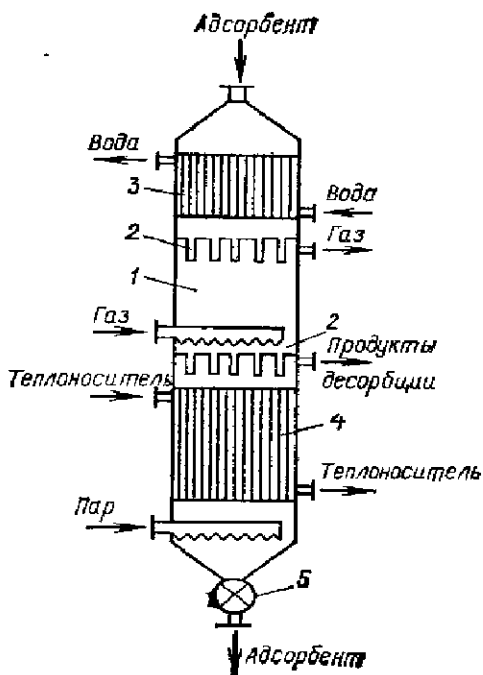


Рис. 7.24. Адсорбер с движущимся слоем адсорбента: 1 – зона адсорбции; 2 – распределительные тарелки; 3 – холодильник; 4 – подогреватель; 5 – затвор

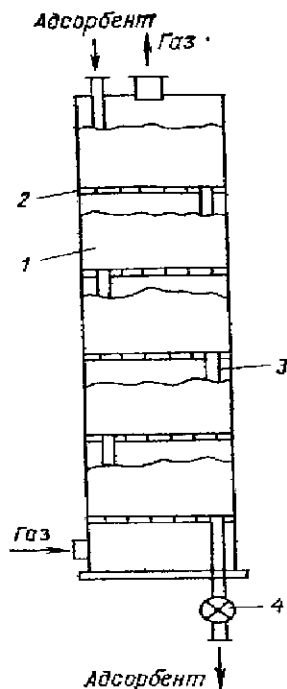


Рис. 7.25. Схема много-ступенчатого адсорбера с псевдооживленным слоем: 1 – псевдооживленный слой; 2 – решетка; 3 – переток; 4 – затвор

Для перетока адсорбента с тарелки на тарелку используют различные пере-

точные устройства (рис. 7.26). Переточное устройство с дополнительным псевдоожигенным слоем адсорбента показано на рис. 7.27; с коническим запорным устройством – на рис. 7.28 и с автономным подводом газа – на рис. 7.29.

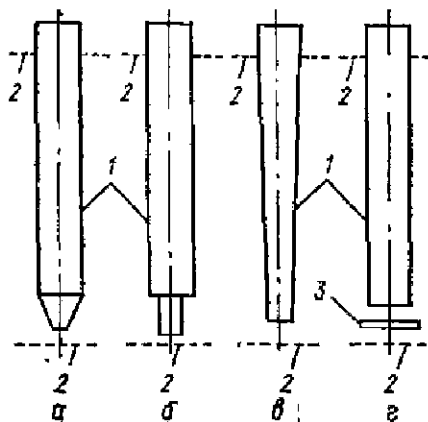


Рис. 7.26. Типы переточных трубок адсорбера: а – цилиндрическая с коническим сужением; б – цилиндрическая с цилиндрическим сужением; в – коническая; г – цилиндрическая с подпорным диском; 1 – переточная трубка; 2 – тарелка; 3 – диск

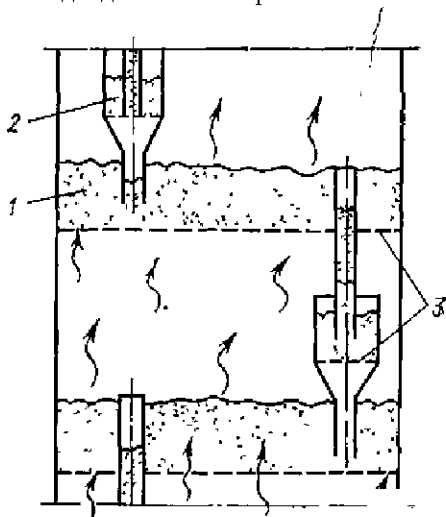


Рис. 7.27. Переточное устройство с дополнительным псевдоожигенным слоем адсорбента: 1 – основной псевдоожигенный слой; 2 – дополнительный слой; 3 – решетки

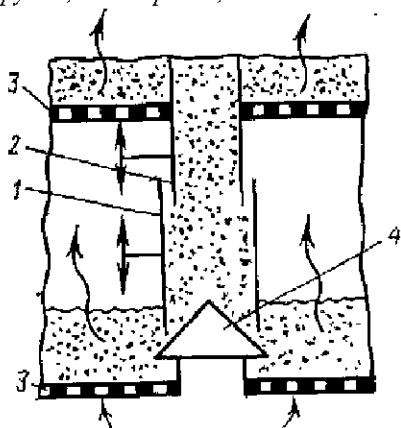


Рис. 7.28. Переточное устройство с коническим запорным устройством: 1, 2 – патрубки; 3 – решетки; 4 – конус

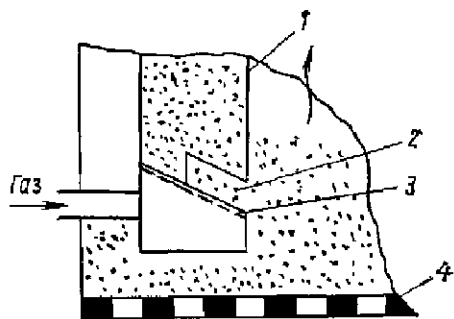


Рис. 7.29. Переточное устройство с автономным подводом газа: 1 – корпус перетока; 2 – щель; 3 – наклонная решетка; 4 – решетка

Разработаны конструкции адсорберов с провальными тарелками и регулируемым свободным сечением (рис. 7.30). Предложены также конструкции тарелок со спиралевидной щелью.

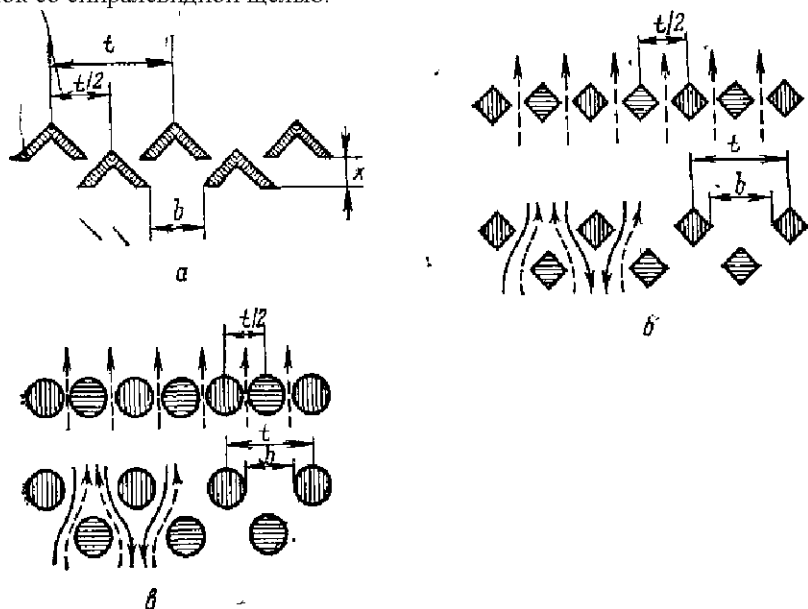


Рис. 7.30. Элементы двухслойных провальных тарелок: а – угольные; б – квадратные; в – круглые.

Для непрерывной подачи в аппарат адсорбента применяют различные питатели (рис. 7.31). Расход адсорбента регулируется перемещением шибера или изменением числа оборотов звездочки или диска.

Преимуществом оживленного слоя является высокая скорость теплопередачи при использовании охлаждающих трубок для отвода тепла адсорбции. Данный вариант также эффективен в тех случаях, когда требуется частая регенерация сорбента. Он может быть использован для адсорбции органических соединений из газов, имеющих очень высокую влажность, что требует частой регенерации используемого угля, при которой удаляется адсорбированная вода.

Одно из основных преимуществ, благодаря которому адсорберы с псевдооживленным слоем находят применение – это возможность интенсивного теплоотвода из сорбционной зоны. Однако из-за быстрого насыщения адсорбента наиболее эффективной областью их использования является обработка газов с невысокой концентрацией загрязнителя.

Важной технологической проблемой, следствием которой является снижение экономической эффективности, нужно считать истирание сорбента, приводящее к его потерям. Желательно использовать очень твердые гранулы, устойчивые к истиранию.

Все преимущества и недостатки псевдооживленного слоя характерны для фонтанирующего режима. Фонтанирование адсорбента особенно эффективно

для осуществления процессов хемосорбции. Скорость процесса хемосорбции растет с увеличением дисперсности частиц, а тонкодисперсные частицы плохо поддаются псевдоожигению. Интенсифицировать процесс хемосорбции удобнее всего посредством организации фонтанирующего режима такого адсорбента.

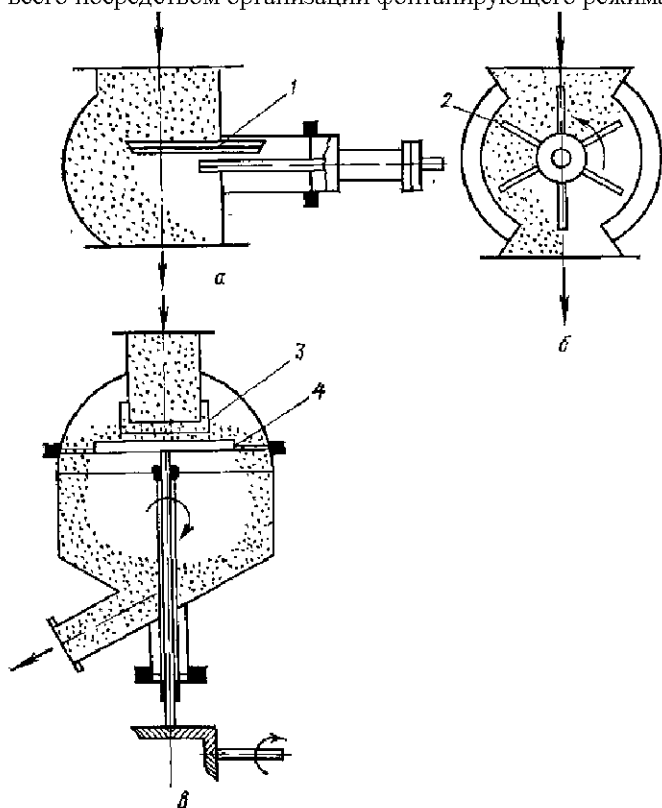


Рис. 7.31. Схемы типовых питателей: а – шиберный; б – секторный; в – тарельчатый; 1 – шибер; 2 – звездочка; 3 – регулирующий патрубок; 4 – диск.

7.6. Десорбция адсорбированных продуктов

Одной из основных стадий адсорбционного процесса является десорбция поглощенных веществ, которая может проводиться различными способами: повышением температуры слоя адсорбента, снижением давления в системе, отдувкой адсорбата в токе газа-носителя, применением вакуума, вытеснение сорбата более легко адсорбирующимся материалом, комбинация двух или более указанных методов.

Как правило, возможность регенерации адсорбента и выделения адсорбированного загрязнения определяется экономическими соображениями.

Одним из путей удаления адсорбированных загрязнителей является полная замена адсорбента с направлением отработанного материала в отходы. Такой путь возможен в тех случаях, когда количество адсорбата невелико или процесс замены производится достаточно редко. Стоимость свежего адсорбента невелика по сравнению со стоимостью процесса регенерации с учетом трудовых затрат.

Адсорбент может находиться на бумажном носителе или во вставной гильзе. Удаляемый материал может быть вывезен на свалку; однако в тех случаях, когда адсорбированное вещество токсично или канцерогенно и может растворяться в воде, а также при использовании угля в качестве адсорбента предпочтительно отработанный материал сжигать.

Проблема утилизации или удаления материала, выделенного при адсорбционной очистке, в значительной степени связана с пригодностью этого материала для повторного использования в процессе, однако определенную роль может играть и выбор метода десорбции, применяемого для регенерации отработанного сорбента. Если выделенное вещество может быть использовано в процессе производства, то оптимальными методами десорбции могут быть простое нагревание или нагревание при частичном вакуумировании, поскольку загрязнитель при выкипании образует концентрированный пар; при конденсации пара образуется концентрированный раствор, который может быть возвращен в процесс. Если одновременно выделяется несколько загрязнителей, например, смесь паров растворителей, и эта смесь не может быть утилизирована как таковая, то необходимо дополнительное разделение, например путем дистилляции. Поскольку адсорбцию часто используют для выделения органических загрязнителей, то во многих случаях выделенный материал можно использовать в качестве топлива или добавки к топливу, если он не находит другого применения. При сжигании замещенных углеводородов необходимо принимать во внимание, что возможно образование продуктов, вызывающих коррозию или наносящих вред окружающей среде.

Нагревание распространено наиболее широко, оно позволяет получать сорбат в концентрированном виде, а в некоторых случаях и в виде, пригодном для повторного использования. При повышении температуры адсорбента до величины, равной температуре кипения сорбата при атмосферном давлении, начинается выкипание вещества, пары которого конденсируют. Если повышение температуры до такого значения приводит к разложению вещества, то дополнительно можно применить частичное вакуумирование. При использовании только вакуумирования степень десорбции не столь высока, как при нагревании. Кроме того, в этом случае для конденсации десорбированного продукта могут потребоваться более эффективные холодильники или окажется необходимой конденсация при сжатии.

Десорбция путем продувания инертного газа, за исключением процесса адсорбционного концентрирования с последующим сжиганием газа, как правило, создает проблем больше, чем решает, поскольку загрязняющее вещество в этом случае снова оказывается диспергированным в газовом потоке. Продувка газом, инертным относительно адсорбционного процесса (например, воздухом или азотом), имеет тот недостаток, что десорбируемое вещество снова оказывается распределенным в газовой фазе. Однако в определенных ситуациях применение этого метода целесообразно. Для концентрирования загрязняющих веществ, присутствующих в очень малых концентрациях, может быть использована абсорбция. При продувке воздухом образующийся при десорбции газовый поток может быть непосредственно направлен на сжигание.

Обработка угольного адсорбента водяным паром представляет собой метод

регенерации, основанный на вытеснении. Водяной пар адсорбируется, вытесняя молекулы адсорбата, который имеет более низкое равновесное парциальное давление. Десорбированные загрязнения конденсируются вместе с избытком водяного пара. После насыщения адсорбента паром необходима регенерация для удаления воды; ее проводят продуванием горячего воздуха. Обработка водяным паром фактически представляет собой комбинацию методов. Хотя основной движущей силой десорбции является вытеснение, пар одновременно повышает температуру адсорбента, а его избыток выполняет роль инертного газа, используемого для продувки. В случае органических материалов, хорошо растворимых в воде, применение этого метода связано с трудностями, поскольку требуется проведение дополнительного разделения водного конденсата и органических продуктов. Даже в тех случаях, когда растворимость органических продуктов незначительна и разделение осуществляется простой декантацией несмешивающейся фазы, необходимо принять во внимание проблемы, связанные с удалением получаемых водных растворов. Если их объемы невелики, а растворенные органические вещества подвергаются биологическому разложению, приемлемым вариантом может быть обычная обработка в канализационных сооружениях. Однако при наличии устойчивых органических соединений или в случае больших количеств водных растворов желательно отказаться от данного метода десорбции.

В процессе регенерации никогда не достигается абсолютно полная десорбция, поэтому необходимо предусматривать некоторый избыток адсорбционной емкости, компенсирующий ее потерю за несколько циклов регенерации. При регенерации могут возникать и другие проблемы, которые нужно предусматривать при выборе метода обработки. Некоторые органические соединения, в частности, мономеры, например пары стирола, в процессе регенерации могут полимеризоваться в порах адсорбента, что делает его непригодным для дальнейшего использования. При высоких температурах регенерации возможен распад органических соединений, в результате чего сорбент покрывается смолой и сажей и также становится неактивным. В таких случаях следует использовать другие методы десорбции, или работать при умеренных температурах и пониженных давлениях, или проводить обработку водяным паром; возможна также регенерация дезактивированного адсорбента в окислительной атмосфере печи. В таких печах в контролируемых условиях органические материалы выжигают с поверхности и из пор сорбента.

В результате хемосорбции сорбат связывается настолько прочно, что десорбция возможна только при удалении некоторого количества самого сорбента. В большинстве случаев регенерация проводится в специальных условиях. Примером может служить регенерация активированного угля, используемого для удаления SO_2 , продувкой воздухом. Часть SO_2 постоянно накапливается на сорбенте в виде серной кислоты. Ее десорбируют, нагревая до 370°C в инертной атмосфере, в результате чего кислота реагирует с углем, образуя CO_2 и SO_2 .

В тех случаях, когда адсорбируемые загрязнители представляют собой неорганические или негорючие вещества и не находят никакого полезного применения, проблемы удаления аналогичны тем, которые возникают при удалении подобных материалов методами адсорбции.

7.7. Конденсационная очистка газов и паров

Конденсационную обработку отбросных газов обычно включают в технологический цикл, если процесс сопровождается ощутимыми потерями промежуточных или конечных продуктов. Часто посредством конденсации улавливают и возвращают в технологический процесс пары растворителей, удаляемых с поверхности изделий после нанесения функциональных, защитных и окрашивающих слоев. Иногда конденсацию применяют для извлечения из газового потока ценных (дорогостоящих) или особо опасных веществ. При экономически и технически приемлемых параметрах рабочей среды можно перевести в конденсированное состояние пары легкокипящих соединений (обычно используемых в качестве растворителей) с концентрациями не ниже $5 \dots 10 \text{ г/м}^3$. Конденсация более разбавленных загрязнителей представляет технически сложную задачу и требует значительных затрат.

Степень улавливания (глубина извлечения) загрязнителя зависит от степени охлаждения и сжатия газовых выбросов. В производственных условиях температуру и давление принимают такими, чтобы энергозатраты на конденсацию составляли незначительную долю общих затрат на технологию. Поэтому степень извлечения даже дорогостоящих продуктов назначают невысокой, как правило, в пределах 70...80%. По этой же причине использовать конденсацию в качестве самостоятельного средства санитарной очистки (т.е. с глубиной извлечения до санитарных норм) неприемлемо.

В то же время конденсационная обработка может успешно применяться в многоступенчатых схемах очистки выбросов. Существуют три направления в области газоочистки, где конденсация не только полезна, но и необходима.

Это – предварительное осаждение основной массы паров загрязнителей перед адсорберами при высокой степени загрязнения выбросов;

- парциальное извлечение паров, содержащих соединения фосфора, мышьяка, тяжелых металлов, галогенов перед термообезвреживанием смеси загрязнителей;

- конденсация загрязнителей после химической обработки с целью перевода в легкоконденсируемые соединения, например, после хемосорбционных аппаратов.

Конденсация может быть применена для обработки систем, содержащих пары веществ при температурах, достаточно близких к их точке росы. Этот метод наиболее эффективен в случае углеводородов и других органических соединений, имеющих достаточно высокие температуры кипения, при обычных условиях и присутствующих в газовой фазе в относительно высоких концентрациях. Для удаления загрязнителей, имеющих достаточно низкое давление пара при обычных температурах, можно использовать конденсаторы с водяным и воздушным охлаждением. Для более летучих растворителей возможна двухстадийная конденсация с использованием водяного охлаждения на первой стадии и низкотемпературного – на второй. Максимальное снижение содержания инертных или неконденсирующихся газов в обрабатываемой смеси позволяет облегчить проведение процесса конденсации и повысить ее экономическую эффективность, поскольку дает возможность исключить необходимость охлаждения

до очень низких температур, соответствующих точке росы.

Если газ необходимо охладить до температуры, лежащей на 40... 50 К ниже точки росы, чтобы достичь требуемого удаления загрязняющих веществ, то в процессе конденсации в массе газового потока может начаться образование тумана. Размеры частиц этого тумана составляют обычно 1,0 мкм или еще меньше, что затрудняет улавливание. Туман образуется тогда, когда скорость теплопередачи значительно превышает скорость массопереноса и основная часть газа охлаждается до температуры, лежащей значительно ниже точки росы конденсируемого пара. В паре затем возникают центры конденсации и начинается процесс конденсации капель в основной массе газового потока еще до того, как пар достигнет холодной поверхности. В конденсаторах с непосредственным контактом туман образуется редко, поскольку масса газа находится очень близко к холодным теплопроводящим поверхностям (капли или пленки жидкости). Образование тумана в поверхностных конденсаторах можно предсказать путем расчета скоростей тепло- и массопередачи в процессе прохождения газа через конденсатор. Если масса газового потока при данной температуре становится пересыщенной, то образование тумана вероятно. Для предотвращения тумана следует использовать конденсацию с непосредственным контактом. Другой метод состоит в том, чтобы заранее вызвать образование тумана и удалить его с помощью соответствующего устройства (электрофильтр, скруббер Вентури, соответствующие фильтры).

Конденсация может быть применена для предварительной обработки газов, при которой выделяются ценные растворители и уменьшается количество загрязнителей перед последующей стадией обработки. Парциальная конденсация может найти применение в тех случаях, когда обрабатываемый газ не выбрасывается, а снова возвращается в процесс или используется в процессе дожигания. Предварительная обработка конденсацией целесообразна в тех случаях, когда перед основной обработкой газовой поток необходимо охладить, например, при осуществлении адсорбции. Различают два вида конденсации:

- *поверхностную* (или просто *конденсацию*), при которой конденсирующиеся пары и охлаждающий агент разделены стенкой и конденсация паров происходит на внутренней или внешней поверхности холодной стенки;

- *конденсацию смешением*, при которой конденсирующиеся пары непосредственно соприкасаются с охлаждающим агентом.

Если конденсации подвергаются пары нерастворимых в охлаждающем агенте (воде) жидкостей или пар, являющийся неиспользуемым отходом того или иного процесса, охлаждение и конденсацию этих паров можно проводить путем непосредственного смешения с охлаждающим агентом (водой).

Эффективность работы конденсаторов смешения находится в прямой зависимости от поверхности соприкосновения охлаждающего агента и пара, поэтому поверхность соприкосновения увеличивают, распыляя охлаждающий агент при помощи различных устройств.

7.7.1. Принцип конденсационной очистки

При охлаждении многокомпонентной газовой смеси, содержащей обычные неконденсирующиеся газы, охлаждение смеси сначала происходит за счет кон-

векции, а теплосодержание передающей поверхности (стенка трубы в поверхностном конденсаторе либо капля или пленка хладагента при непосредственном контакте) уменьшается до тех пор, пока газовая фаза не насыщается одним или несколькими из ее конденсируемых компонентов. При дополнительном охлаждении конденсируемые газы диффундируют к теплопередающей поверхности, где происходит их конденсация с выделением скрытой теплоты. Начальная точка росы или температура насыщения для каждого компонента может быть определена из кривой зависимости температуры от давления пара для данного компонента при известной величине его мольной доли в парах:

$$y_A \cdot P = (p_A)_n \quad (5.1)$$

где y_A – мольная доля компонента A в парах; P – суммарное абсолютное давление газа; $(p_A)_n$ – парциальное давление компонента A в парах.

Компонент A начинает конденсироваться, когда температура газа снижается до температуры, при которой компонент A имеет давление пара $p_A = (p_A)_n$.

После начала конденсации температура газа будет понижаться только по мере отвода соответствующего количества тепла и скрытой теплоты, вследствие которого в процессе снижения температуры газ будет оставаться насыщенным компонентом A .

Поскольку пары вещества A должны диффундировать к теплопередающей поверхности, процесс контролируется тепло- и массопереносом. В системе, содержащей другие конденсирующиеся компоненты (B , C и т.д.), каждый из этих компонентов начнет конденсироваться тогда, когда газ станет насыщен этим компонентом, и для него будет выполняться соотношение парциальных давлений, аналогичное $p_A = (p_A)_n$.

Для определения температуры, до которой нужно охладить газ, чтобы достичь после обработки требуемое содержание компонента A , используются следующие уравнения:

$$(v_A)_r = (y_A)_r; (y_A)_r \cdot P = (p_A)_r,$$

где $(v_A)_r$ – допустимая объемная доля компонента A в газовых выбросах; $(y_A)_r$ – допустимая мольная доля компонента A в выбросах; P – абсолютное парциальное давление газа; $(p_A)_r$ – допустимое давление пара компонента A .

Необходимая температура газа представляет собой температуру, при которой давление пара компонента A равно величине $(p_A)_r$ на кривой давления пара. В присутствии нескольких компонентов улавливание осуществляется по компоненту, требующему наиболее низкой температуры.

7.7.2. Типы и конструкции конденсаторов

По способу взаимодействия охлаждающей и охлаждаемой среды конденсаторы разделяют на контактные и поверхностные. В контактных конденсаторах охлаждаемые газы и хладоноситель смешиваются, а в поверхностных разделены твердой стенкой.

Контактные аппараты по конструкции и методам расчета аналогичны абсорбционным устройствам.

Конденсация смешением осуществляется в аппаратах – *конденсаторах смешения*. В зависимости от способа отвода из аппаратов потоков различают *мокрые* и *сухие конденсаторы смешения*. В мокрых конденсаторах охлаждающий

агент, конденсат и неконденсирующиеся газы (воздух) отводят из нижней части аппарата совместно при помощи мокровоздушного насоса, в сухих охлаждающий агент с конденсатом отводятся из нижней части аппарата, а воздух отсасывается вакуум-насосом из верхней части.

Кроме того, различают *прямоточные* конденсаторы смешения, в которых охлаждающий агент и пар движутся в одном направлении (сверху вниз), и *противоточные*, в которых пар и охлаждающий агент движутся в противоположных направлениях (агент сверху вниз, а пар снизу вверх).

Поверхностные конденсаторы по конструкции сходны с другими типами поверхностных теплообменников – подогревателями, холодильниками, испарителями.

Кожухотрубчатые конденсаторы могут компоноваться вертикально или горизонтально. Конденсируемые газы обычно направляют в их межтрубное, а хладоноситель – в трубное пространство.

Наиболее простыми являются конденсаторы типа "труба в трубе" (рис. 7.32, а), которые изготавливаются по нормам или индивидуальным проектам.

Многотрубные конденсаторы более сложны по конструкции и имеют две разновидности:

- тип Н (с неподвижной решеткой) предназначен для условий, не требующих компенсации температурных напряжений;
- тип К (рис. 7.32, б) имеет линзовый компенсатор на кожухе.

Еще более совершенны, но достаточно сложны конструктивно конденсаторы с плавающей головкой (рис. 7.32, в). Теплообменники с *U*- и *W*-образными трубками имеют хорошие компенсационные показатели и проще по конструкции, но в качестве конденсаторов их не применяют.

Для аппаратов типа Н в зависимости от материала, диаметра и давления допускается максимальная разность температур охлаждающей и охлаждаемой сред 20... 60°C. При большей разности температур применяют аппараты типа К или с плавающей головкой. Максимальное давление для конденсаторов типа К составляет 1,6 МПа, а для конденсаторов с плавающей головкой до 1 МПа в трубном и 1... 2,5 МПа в межтрубном пространстве. Все элементы кожухотрубчатых конденсаторов (трубы, перегородки, кожух и др.) могут изготавливаться из углеродистых или легированных сталей.

Пластинчатые конденсаторы более просты в изготовлении, имеют меньшие сопротивления и менее металлоемки. Пакетные пластинчатые теплообменники изготавливают из тонких металлических листов в виде многослойных разборных, полуразборных или неразборных пакетов. В разборных конструкциях (рис. 10.1, г) пластины 1 собираются на стяжных устройствах с герметизацией посредством больших 2 и малых 3 прокладок из термостойкой резины. В полуразборных или неразборных конструкциях пластины частично или полностью соединяются на сварке. Разборные конструкции используются при рабочих давлениях до 1 МПа в пределах температур – 20... 180°C, сварные – при давлениях до 4 МПа и температурах 100... 300°C.

Наиболее часто для конденсации используются кожухотрубчатые и пластинчатые конструкции.

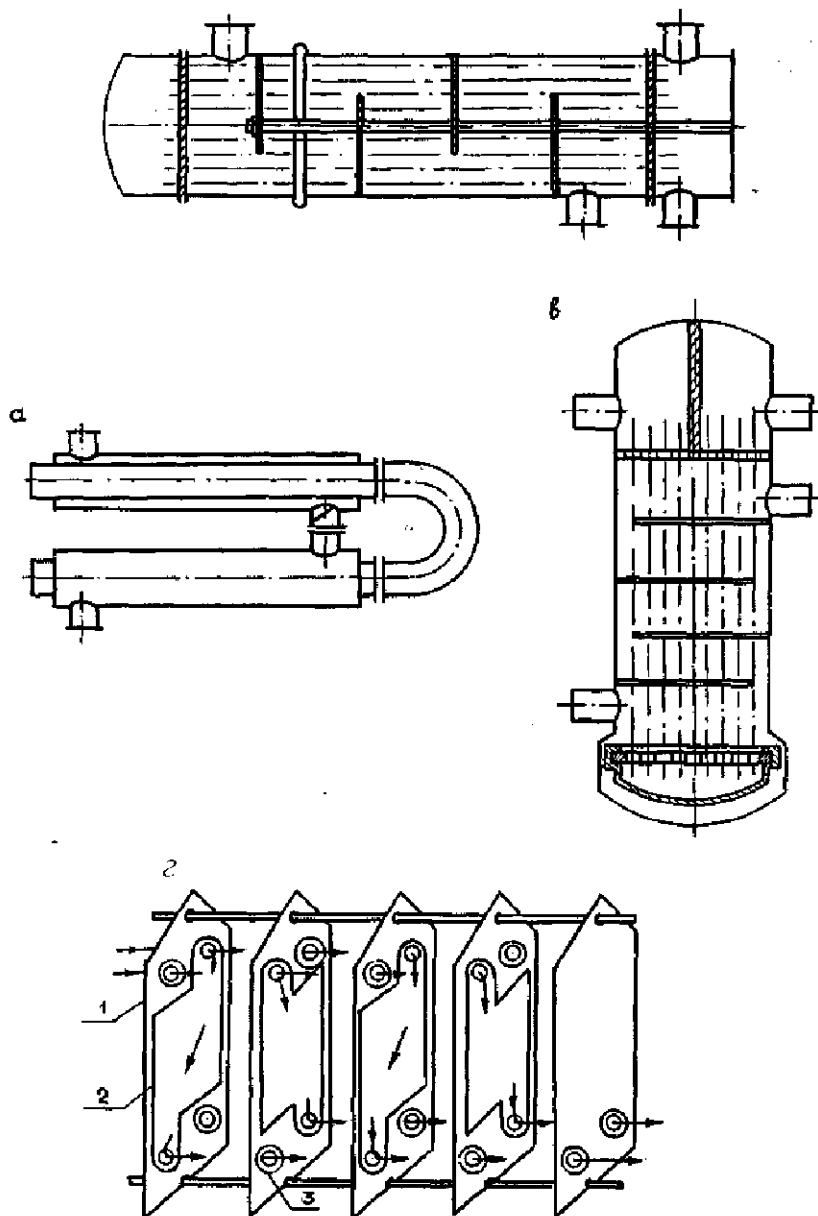


Рис. 7.32. Конструкции теплообменников-конденсаторов.

7.8. Термокаталитическая очистка газовых выбросов

Термоокисление газообразных загрязнителей может происходить в газовой фазе (в объеме) или на границе раздела фаз (на поверхности). Газофазный про-

цесс осуществляют непосредственной огневой обработкой (сжиганием в пламени) газовых выбросов при температурах, превышающих температуру воспламенения горючих компонентов выбросов. Для организации процесса окисления на границе раздела фаз используют *катализаторы* – конденсированные вещества, способные за счет активности поверхностных частиц ускорять процесс окисления того или иного загрязнителя при температурах ниже температуры воспламенения.

Каталитические методы очистки газов основаны на гетерогенном катализе и служат для превращения примесей в безвредные или легко удаляемые из газа соединения. Процессы гетерогенного катализа протекают на поверхности твердых тел – катализаторов. Катализаторы должны обладать определенными свойствами: активностью, пористой структурой, стойкостью к ядам, механической прочностью, селективностью, термостойкостью, низким гидравлическим сопротивлением, иметь небольшую стоимость.

Особенность процессов каталитической очистки газов заключается в том, что они протекают при малых концентрациях удаляемых примесей. Основным достоинством метода является то, что он дает высокую степень очистки, а недостатком – образование новых веществ, которые надо удалять из газа адсорбцией или абсорбцией. Посредством термокаталитического окисления возможно обезвреживание водорода H_2 , оксида углерода CO , углеводородов C_mH_n и кислотных производных углеводородов $C_mH_nO_p$ только в газообразном состоянии.

Термокатализ неприемлем для обработки газов (паров) высокомолекулярных и высококипящих соединений, которые, плохо испаряясь с катализатора, коксуются и "отравляют" его, т.е. заполняют активную поверхность сажевыми продуктами неполного окисления.

Температурный уровень процесса термокаталитического окисления составляет диапазон 350... 500°C, что требует соответствующих затрат топлива.

Физико-химические основы термокаталитического окисления органических загрязнителей сложны и мало изучены. Имеются общие представления об отдельных стадиях процесса и их последовательности: диффузия молекул загрязнителя и окислителя к поверхности катализатора и их сорбция предшествуют активации исходных молекул на поверхности; активированные молекулы претерпевают цепь различных изменений, превращаясь в радикалы, вступая в реакции и образуя новые соединения; последние переходят на поверхность из возбужденных состояний в основные (стабильные), сбрасывая излишки энергии поверхностным частицам, и затем могут удалиться в газовую фазу, десорбируясь с поверхности катализатора. Практических методов расчета стадий термокаталитического окисления в совокупности или по отдельности нет, и аппараты обезвреживания для каждого вида выбросов разрабатываются индивидуально на основе экспериментальных исследований.

В качестве катализаторов обычно используют металлы или оксиды металлов. Наилучшие катализаторы разрабатываются на основе благородных металлов, а среди других наиболее активны катализаторы из оксидов кобальта, хрома, железа, марганца, никеля и др. Однако они имеют меньшую активность, чем катализаторы из благородных металлов, а также низкую химическую и термическую стойкость.

Обычно активирующие компоненты наносятся на нейтральные термостойкие носители (фарфор или шамот в виде таблеток, шариков, гранул, сетки из никромовой проволоки). Катализаторы подбирают индивидуально для каждого конкретного случая, учитывая их стоимость, физико-химические свойства и концентрации загрязнителей, объемы выбросов, присутствие катализаторных ядов, другие условия. Универсальных катализаторов не существует.

Различают три основные области протекания каталитических процессов: кинетическую, внешнедиффузионную и внутريدиффузионную. В зависимости от стадии, лимитирующей общую скорость процесса, используются различные уравнения кинетики процесса.

Во внешнедиффузионной области скорость реакции определяется скоростью переноса компонента к поверхности зерен катализатора.

В области химической кинетики скорость необратимой (обратимой) реакции первого порядка определяется по уравнениям

$$z_A = \kappa C_{Ap} \text{ или } z_A = \kappa(C_A - C_{Ap}).$$

Для необратимой реакции n -го порядка уравнение имеет вид:

$$z_A = \kappa C_A^n.$$

Для внутريدиффузионной области и реакции первого порядка суммарную скорость каталитического процесса находят, комбинируя уравнение массопередачи с уравнением диффузии и реакции внутри частицы.

Каталитические реакторы могут быть с неподвижным, движущимся и псевдооживленным слоем катализатора (рис. 7.33). Они работают по принципу идеального вытеснения или идеального смешения. Для определения размеров реакторов производят кинетические расчеты, а также расчет материальных и тепловых балансов.

При очистке газов реакции протекают главным образом в диффузионных областях. Для нахождения размеров реактора определяют число единиц переноса и высоту, эквивалентную единице переноса ($h_{\text{ВЕП}}$):

$$N_0 = \int_{p_A}^{p_{A^*}} \frac{p_{cp} dp_A}{(P + p_A \gamma_A)(p_A - p_{As})} = \int_{N_A}^{N_{A^*}} \frac{N_{cp} dN_A}{(1 + N_A \gamma_A)(N_A - N_{As})},$$

$$H_p = h_{\text{ВЕП}} N_0.$$

$$h_{\text{ВЕП}} = \frac{G_z}{M_{cp} \beta_z a_{cp}}.$$

$$\Delta p_{cp} = \frac{(P + p_A \gamma_A) - (P - p_{As} \gamma_A)}{\ln[(P + p_A \gamma_A)/(P + p_{As} \gamma_A)]}.$$

Число единиц переноса рассчитывают по уравнению

где H_p – высота реактора; G_z – массовая скорость газа, кг/(м² ч); M_{cp} – средняя молекулярная масса компонентов газового потока; a – удельная поверхность катализатора, м²/м³; p_{cp} – среднее логарифмическое парциальное давление компонента A в пленке газа около поверхности катализатора; p_A – парциальное давление компонента A , Па; p_{As} – парциальное давление компонента на поверхности катализатора, Па; γ_A – изменение числа молей компонента A в результате реакции (на 1 моль исходного вещества A); $N_{cp} = p_{cp} / P$ – среднее логарифмическое значение концентрации реагента A в пленке газа; N_A и N_{As} – мольная доля компонента A в

газе и на поверхности катализатора соответственно.

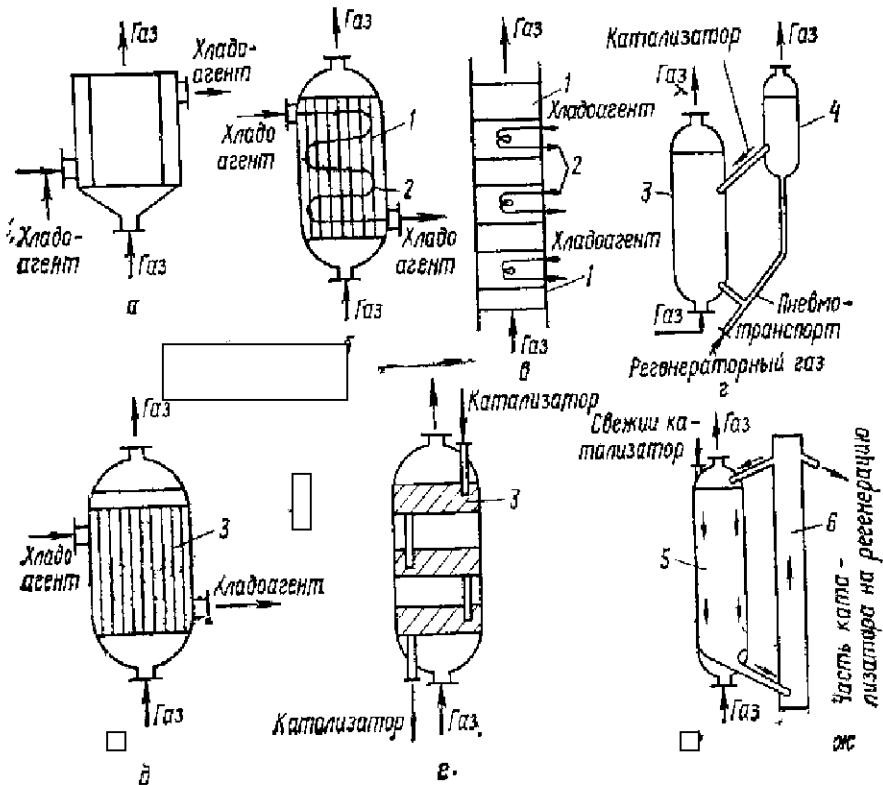


Рис. 7.33. Схемы каталитических реакторов: а – с неподвижным слоем катализатора; б – то же, и охлаждением; в – многослойный с охлаждением; г – с псевдоожиженным слоем; д – то же, и с охлаждением; е – многоступенчатый с псевдоожиженным слоем; ж – с движущимся слоем; 1 – неподвижный слой; 2 – холодильник; 3 – взвешенный слой; 4 – регенератор; 5 – движущийся слой; 6 – элеватор.

Для определения числа единиц переноса графическим интегрированием откладывают на оси ординат значения p_A , а на оси абсцисс $p_C / [(P + p_A \gamma_A)(p_A - p_{AS})]$.

Гидравлическое сопротивление реактора рассчитывают по разным формулам в зависимости от его конструкции.

Для реактора с неподвижным слоем катализатора

$$\Delta P = \xi (a/\varepsilon_0^3) (\rho_f w^2 / 2) H_0,$$

где ξ – коэффициент сопротивления, при $Re < 50$ величина $\xi = 220/Re$; при $Re > 50$ величина $\xi = 11,6/Re^{0,25}$; w – фиктивная скорость газа, м/с; H_0 – высота неподвижного слоя катализатора, м; ε_0 – порозность неподвижного слоя.

Гидравлическое сопротивление взвешенного слоя рассчитывается по формуле

$$\Delta P = g \rho_r (1 - \varepsilon) H. \quad (6.16)$$

Для отвода (подвода) тепла из реакторов с неподвижным слоем используют теплообменники, расположенные вне слоев катализатора, а в реакторах со взвешенным слоем – теплообменники, расположенные внутри слоев катализатора. Поверхность теплообмена рассчитывают по уравнению теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи от взвешенного слоя к поверхности теплообмена $\alpha_{взв}$ при оптимальной скорости газа рассчитывают по формуле

$$Nu = 0,86 Ar^{0,2},$$

где $Nu = \alpha_{взв} d / \lambda_r$ – критерий Нуссельта; λ_r – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(мК).

Каталитическое окисление используют для удаления диоксида серы из дымовых газов, а каталитическое восстановление для обезвреживания газов от оксидов азота. Окисление проводят на ванадиевом катализаторе при 450...480°C. После окисления газы направляют на абсорбцию. Каталитическое восстановление оксидов азота производят до элементного азота в присутствии газавосстановителя. В качестве восстановителей используют метан, коксовый и природный газ, оксид углерода, водород, аммиак. Катализаторами служат платиновые металлы, палладий, рутений, платина, родий либо сплавы, содержащие никель, хром, медь, цинк, ванадий, церий и др. Степень очистки достигает 96%.

Использование каждого катализатора имеет определенные температурные ограничения. Превышение температуры приводит к его разрушению. Перегрев катализатора чаще всего происходит из-за нестабильности содержания окисляемых компонентов отбросных газов, концентрации которых за технологический цикл обычно несколько раз изменяются от нуля до максимума, достигающего иногда нескольких десятков грамм на кубометр выбросов. Для предохранения от перегрева приходится оборудовать установки обезвреживания автоматикой регулирования подачи энергоносителя (обычно газового топлива) в зависимости от концентрации загрязнителя. Система автоматики основывается на особенностях конкретных технологических процессов и разрабатывается индивидуально.

Конструктивно установки термокатализа обычно состоят из топки с газогорелочными устройствами и реактора, в котором размещаются каталитические насадки.

Проектирование установки термокаталитического обезвреживания сводится к подбору конструкций и размеров топочных и горелочных устройств, типа катализатора и способа его размещения в реакторе. Выполняют также гидравлические расчеты воздухопроводов, газопроводов, дымоходов, подбирают вентиляторы и дымососы.

Количество топливного газа определяют по температуре процесса термокаталитического обезвреживания, которую находят опытным путем или по действующим аналогам. Размеры реактора зависят от количества обрабатываемых выбросов и объема катализаторной массы. Последний параметр может быть определен лишь экспериментально или по сведениям о действующих аналогах, реально обеспечивающих требуемую степень очистки. Сведения подобного рода можно считать надежными, если они получены специалистом при непосредственном ознакомлении с действующей установкой.

Подачу обрабатываемых газов обычно задают в виде расхода, м³/ч, прихо-

дющегося на 1 м^3 катализаторной массы. Такую характеристику называют скоростью обработки и используют для сравнения пропускной способности реакторов. В литературе приводится информация об установках обезвреживания со скоростями обработки $50000 \dots 1000000 \text{ ч}^{-1}$ и более. С увеличением принятого значения скорости обработки уменьшается степень конверсии исходных загрязнителей. Их превращения не дойдут до конечной стадии с безвредными продуктами – CO_2 и H_2O , а остановятся на какой-либо из промежуточных ступеней окисления с образованием соединений, возможно более опасных, чем исходные.

7.9. Термическая обработка газовых выбросов

Для обезвреживания газовых промышленных выбросов используют термические методы прямого и каталитического сжигания. Метод прямого сжигания применяют для обезвреживания промышленных газов, содержащих легко окисляющиеся органические примеси, например пары углеводородов. Продуктами сгорания углеводородов являются диоксид углерода и вода, а органических сульфидов – диоксид серы и вода.

Система, содержащая токсичные вещества, может быть обезврежена посредством термообработки, если реакции, происходящие в ней, приведут к образованию менее токсичных компонентов.

Из всех окислительных процессов для термообезвреживания пригодны исключительно реакции с кислородом, поскольку при участии иных окислителей принципиально невозможно получить безвредные продукты окисления. Поэтому далее под термином "окисление" подразумевается процесс, окислителем в котором служит кислород.

Газофазный процесс термоокисления осуществляют непосредственной огневой обработкой (сжиганием в пламени) газовых выбросов при температурах, превышающих температуру воспламенения горючих компонентов выбросов.

Огневой обработкой, как и термокаталитическим окислением, принципиально возможно обезвредить лишь вещества, молекулы которых не содержат каких-либо других элементов, кроме водорода H_2 углерода C и кислорода O . Посредством сжигания возможно обезвреживание перечисленных веществ в газообразном, жидком и твердом состояниях.

Загрязнители, содержащие какие-либо элементы, кроме H , C и O – серу S , фосфор P , галогены, металлы и др., нельзя подавать на термоокислительную обработку, так как продукты сгорания будут содержать высокотоксичные соединения. В реальных условиях и при сжигании чисто органических соединений не удастся обеспечить абсолютно полное окисление исходных компонентов до практически безвредных углекислого газа CO_2 и паров воды H_2O . В дымовых газах всегда присутствуют оксид углерода CO и другие продукты химического недожога (неполного окисления). Кроме того, при повышенных температурах заметно ускоряется реакция окисления азота, который поступает в зону горения с топливом и воздухом. Некоторые оксиды азота оказывают вредное воздействие на организм человека и окружающую среду.

Возможности термоокислительного метода обезвреживания ограничиваются также количеством отбросных газов и содержанием в них горючих компонентов. Если концентрация горючих компонентов выбросов не достигает нижнего пре-

дела воспламенения ("бедные" горючим выбросы), то их огневая обработка требует дополнительного расхода топлива на прогрев выбросов до температуры самовоспламенения, которая для паров углеводородов и кислородных производных углеводородов составляет около 500... 750°C.

При выборе способов обезвреживания ориентировочное количество отбросных газов, "бедных" горючим, которое может быть подвергнуто термоокислительной обработке с приемлемым расходом топлива, можно принимать не выше 1,5... 2 м³/с.

Для крупных источников выбросов с невысоким содержанием загрязнителей более оптимальным решением является комбинированная двухступенчатая очистка с предварительным концентрированием горючих компонентов до нижнего предела воспламенения. Последующая огневая обработка подобных выбросов становится экономически приемлемой. Влияние горючих компонентов на параметры горения становится заметным при концентрациях более 50... 100 мг/м³.

7.9.1. Установки термообезвреживания газовых выбросов

Газы сжигают на установках с открытым факелом или в печах различных конструкций. Прямое сжигание осуществляют при 700... 800°C с использованием газообразного или жидкого топлива. Для сжигания необходим избыток кислорода на 10... 15% больше стехиометрического количества. Если теплоты сгорания углеводородов достаточно, чтобы теплота реакции превышала 1,9 МДж/м³, газы также сжигают в факеле. Чтобы пламя факела было некопящим, добавляют воду в виде пара. В этом случае происходит реакция водяного пара с углеводородами, сопровождаемая образованием водорода и оксида углерода. Количество пара в зависимости от концентрации углеводородов колеблется от 0,05 до 0,33 кг/кг.

Если концентрация горючих газов мала и выделяющегося тепла недостаточно для реакции сгорания, то газы предварительно подогревают. На рис. 7.34... 7.36 показаны различные схемы факельных установок. Установка, представленная на рис. 7.34, работает при избыточном давлении 0,15 МПа.

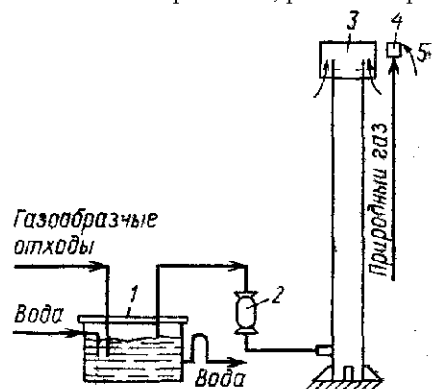


Рис. 7.34. Установка для факельного сжигания газообразных отходов: 1 – гидрозатвор; 2 – огнепреградитель; 3 – основная горелка; 4 – дежурная горелка; 5 – система зажигания дежурной горелки

На рис. 7.35 показана установка для факельного сжигания газов, смонтированная на технологическом аппарате, на рис. 7.36 – установка для сжигания газов, содержащих ацетилен. Горение таких газов сопровождается образованием

значительного количества технического углерода, поэтому предусмотрена подача пара в газовый поток. Для поджигания основной горелки во всех установках предусмотрена дежурная горелка, работающая на природном газе.

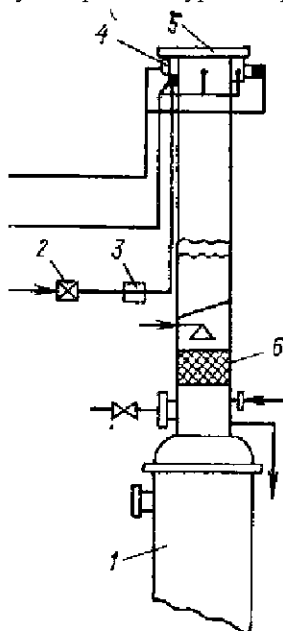


Рис. 7.35. Установка для факельного сжигания газообразных отходов, смонтированная на реакторе: 1 – реактор; 2 – эжекционный смеситель; 3 – электрозапал; 4 – дежурная горелка; 5 – основная горелка; 6 – насадка-огнепреградитель

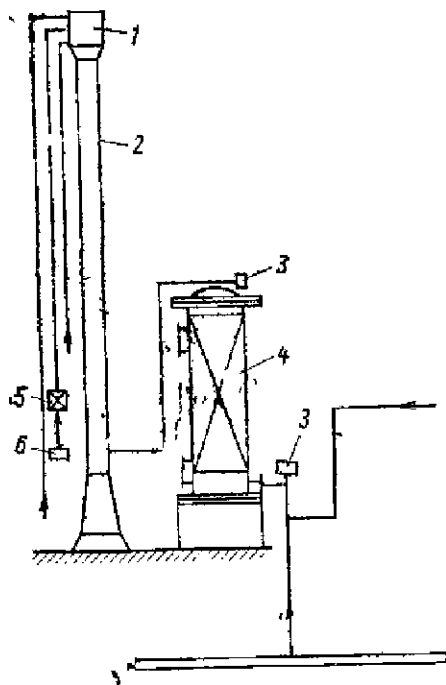


Рис. 7.36. Установка для факельного сжигания газов, содержащих ацетилен: 1 – факельная горелка; 2 – труба; 3 – разрывные мембраны; 4 – огнепреградитель; 5 – инжекционный смеситель с электрозапалом; 6 – система зажигания дежурной горелки

Термоокислительное обезвреживание концентрированных газов проводится в установках, которые обычно состоят из топочных и горелочных устройств с дымоходами для отвода продуктов сгорания и теплоутилизаторами.

Схемы термических нейтрализаторов даны на рис. 7.37. Конструкция нейтрализатора должна обеспечивать нейтрализацию токсичного продукта. Для этого время пребывания его в нейтрализаторе составляет 0,1... 1,0 с. Температура сжигания на 100... 150°C превышает температуру самовоспламенения.

Конструкции топочных устройств для печей термообезвреживания можно разделить на камерные, циклонные, шахтные и барабанные. Наиболее распространены вертикальные и горизонтальные камерные (рис. 7.38, а), а также циклонные горизонтальные (рис. 7.38, б) конструкции.

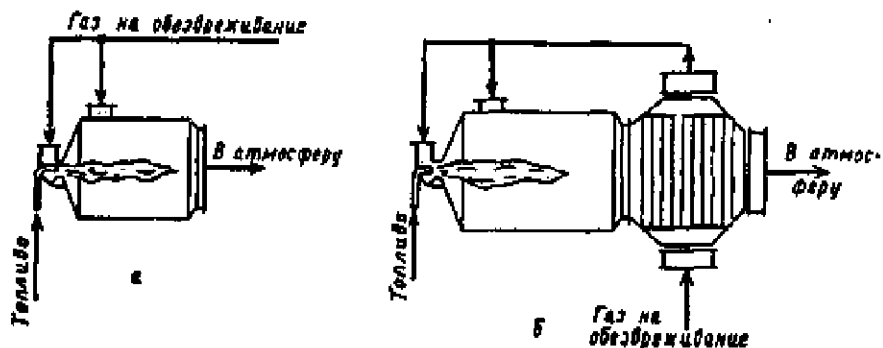


Рис. 7.37. Схемы термических нейтрализаторов промышленных отходящих газов: а – без теплообменника; б – с теплообменником

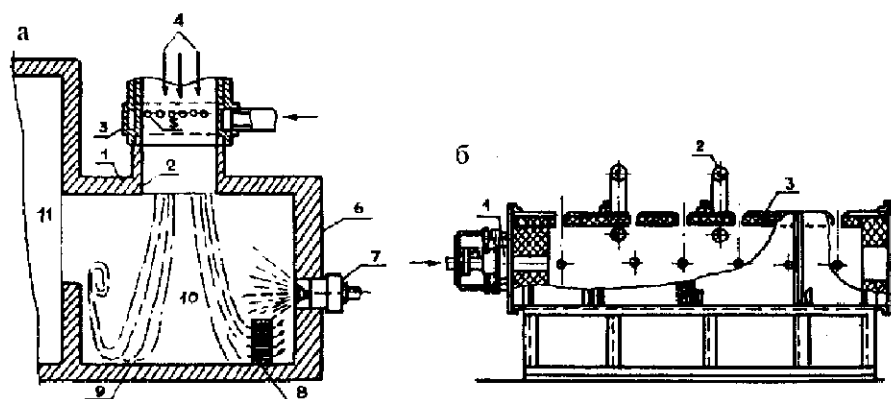


Рис. 7.38. Конструкции топочных устройств: а – камерная печь для сжигания газообразных отходов; 1 – корпус печи; 2 – отверстие; 3 – коллектор; 4 – газообразные отходы; 5 – распределительные патрубки; 6 – фронтальная стена; 7 – горелка; 8 – перфорированная стенка; 9 – под; 10 – камера; 11 – камера для утилизации тепла; б – циклонная горизонтальная печь; 1 – горелка; 2 – цилиндрическая камера; 3 – патрубки для отбросного газа

В циклонных печах организуется вращательно-поступательное движение продуктов горения, что обеспечивает большее время пребывания обрабатываемых газов, чем в камерных печах таких же габаритов. Последние обычно конструируют одно- или двухходовыми по дымовым газам. Они могут быть прямоугольного или круглого сечения. Вертикальные прямоугольные конструкции имеют худшее заполнение объема топки дымовыми газами по сравнению с горизонтальными топками круглого сечения. В камерных топках возможно устройство дополнительных сводов, повышающих температуру в реакционной зоне, что невозможно выполнить в циклонных печах. В конечном счете конструкция и габариты топочного устройства выполняются такими, чтобы обеспечить требуе-

мое время пребывания отбросных газов в зоне высоких температур.

Тип горелочного устройства для установок термообезвреживания и схему подвода отбросных газов выбирают в зависимости от их состава. Газовые выбросы с высоким содержанием кислорода, которые могут быть использованы в качестве дутьевого воздуха, выгоднее всего подавать в воздушные тракты дутьевых газогорелочных устройств. Богатые горючим газовые выбросы с низким содержанием (или отсутствием) кислорода можно подавать непосредственно в газовые и воздушные тракты дутьевых горелок. Горелки инжекционного типа для этих целей практически непригодны из-за нестабильности состава выбросов. В то же время инжекционные горелки, работающие на топливном газе стабильного состава, находят применение в качестве пилотных (поддерживающих горение) устройств. Высокая температура в зоне горения таких горелок обеспечивает термоокисление загрязнителя при колебаниях состава обрабатываемых газов. Кроме того, они не требуют затрат электроэнергии на подачу воздуха для горения.

Одна из конструкций факельной горелки с паровыми дюзами показана на рис. 7.39, горелка для сжигания галогенсодержащих примесей представлена на рис. 7.40.

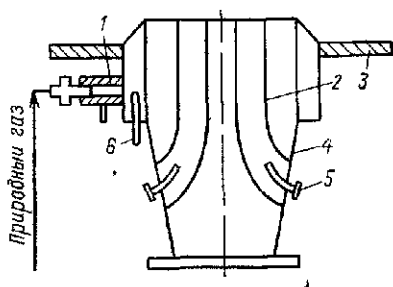


Рис. 7.39. Факельная горелка с паровыми дюзами: 1 – дежурная горелка; 2 – воздушная труба; 3 – защитный козырек; 4 – корпус факельной горелки; 5 – паровая дюза; 6 – карман для термонапар

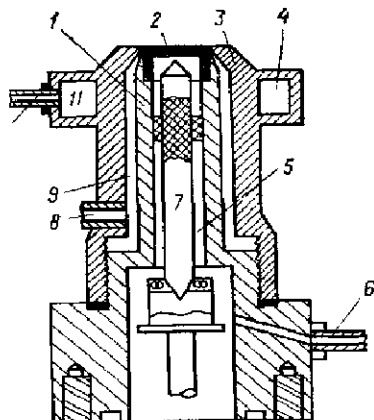


Рис. 7.40. Горелка для сжигания галогенсодержащих газов в атмосфере инертного газа: 1 – внутренний корпус горелки; 2 – отверстие для выхода газообразных отходов; 3 – внешний корпус горелки; 4 – отверстие для выхода инертного газа; 5 – канал для смеси инертного газа и газовых отходов; 6 – ввод инертного газа; 7 – игла; 8 – ввод природного газа; 9 – кольцевое пространство для природного газа; 10 – штуцер для подачи инертного газа; 11 – кольцевое пространство для инертного газа

Из диффузионных горелок заслуживает внимания достаточно простая конструкция, представляющая собой перфорированную трубу, установленную в

потоке отбросных газов так, что газовые факелы, выходящие из отверстий, развиваются в ее аэродинамическом следе, за счет чего обеспечивается устойчивость газового факела при высоких значениях коэффициентов избытка воздуха. В результате через горелочное устройство удастся пропустить большое количество отбросных газов при незначительном расходе топливного газа. Однако при больших избытках воздуха средняя температура газов становится ниже температуры самовоспламенения паров органических соединений, вследствие чего термоокислению будут подвержены лишь частицы, непосредственно соприкасавшиеся с факелом. В то же время такое устройство может быть эффективно использовано и при более высоких избытках воздуха, если на обезвреживание поступают горячие газовые выбросы.

Контрольные вопросы.

1. Классификация процессов и аппаратов очистки газовых выбросов.
2. Технология абсорбционной очистки промышленных выбросов.
3. Назначение, устройство и принцип действия абсорберов.
4. Назначение, устройство и принцип действия насадочных абсорберов.
5. Назначение, устройство и принцип действия тарельчатых абсорберов.
6. Назначение, устройство и принцип действия распыливающих абсорберов.
7. Десорбция загрязнителей из абсорбентов.
8. Адсорбция паров органических растворителей.
9. Очистка газов от оксидов азота.
10. Очистка газов от диоксидов серы.
11. Очистка от хлора и хлорида водорода.
12. Очистка газов от сероводорода.
13. Назначение, устройство и принцип действия адсорберов.
14. Назначение, устройство и принцип действия адсорберов периодического действия.
15. Назначение, устройство и принцип действия адсорберов непрерывного действия.
16. Назначение, устройство и принцип действия адсорбированных продуктов.
17. Принцип конденсационной очистки.
18. Типы и конструкции конденсаторов.

Задания для самостоятельной работы

1. Изучить материал лекции.
2. Ответить на контрольные вопросы.

Рекомендованная литература по теме лекции: [1 – 27]

Лекция 8.

Очистка газовых выбросов автомобильного транспорта

План лекции.

Характеристика выбросов двигателей внутреннего сгорания.
Снижение выбросов двигателей внутреннего сгорания.
Нейтрализация выхлопов двигателей внутреннего сгорания.
Улавливание аэрозолей, выбрасываемых дизельным двигателем.

Загрязнение окружающей среды выбросами двигателей внутреннего сгорания представляет в последние годы все большую опасность из-за возросшей угрозы здоровью человека и окружающей среде.

В общем балансе загрязнения атмосферы антропогенными источниками транспортные средства представляют собой наиболее существенный источник, хотя основную долю этих загрязнений составляют относительно неядовитые оксиды углерода.

Современный образ жизни и развитое производство тесно связаны с автомобильным транспортом.

Автомобильный транспорт получил широкое распространение, имея ряд достоинств: 1) относительно высокую скорость движения по усовершенствованным дорогам; 2) хорошие проходимость и маневренность; 3) возможность экономичной перевозки мелких партий грузов; 4) менее высокие капитальные вложения в строительство автодорог в сравнении с железнодорожным транспортом. В начале XX в. на нашей планете насчитывалось 6 тыс. автомобилей. К 1998 г. число транспортных средств с бензиновым двигателем во всем мире превысило 1,5 млрд. Протяженность автомобильных дорог с асфальтовым покрытием только в Европе и Северной Америке достигла почти 10 млн. км. По ним ежегодно перевозится 16 млрд. т. грузов

Вместе с тем автомобили являются одним из основных источников загрязнения окружающей среды, прежде всего воздушного бассейна, такими токсикантами, как монооксид углерода, оксиды азота, свинец, углеводороды и др. Так, в 1990 г. их выбросы в мире составили, млн т: углеводороды -39, монооксиды углерода - 231, диоксид углерода - 3969, оксиды азота - 32. В загрязнении атмосферного воздуха крупных городов мира доля автомобильного транспорта варьирует, %: 88...97 CO, 31...33 NO_x, 63...95 углеводородов. До 70 % весьма токсичных соединений свинца, содержащихся в этилированном бензине, также попадают в атмосферу. Токсичными выбросами автомобилей, кроме отмеченных выше выхлопных газов, являются также картерные газы, пары топлива из карбюратора и топливного бака. В целом, в выбросах транспортно-энергетических установок содержится 1200 химических компонентов, включая весьма токсичный бензпирен.

Автотранспорт существенно загрязняет также воду (нефть, масла, растворители) и почву (нефть, нефтепродукты, цветные металлы и резина как следствие истирания деталей автомашин и покрышек). На месте масляных пятен в течение 20 лет ничего не растет, полоса шириной 50...100 м по обе стороны от дорог является зоной деградации почвенно-растительного покрова с избытком тяжелых металлов (10...20 ПДК) и дефицитом биогенных элементов.

В связи со значительным увеличением автомобильного парка постоянно возрастает его роль в загрязнении атмосферного воздуха. Примерно 60 % загрязнения атмосферы приходится на автотранспорт. На другие виды транспорта

приходится небольшая часть загрязнений атмосферы.

Особенно высокое содержание оксида углерода в воздухе отмечено на уличных перекрестках, где двигатели автомобилей работают на богатых смесях перед светофором.

Выхлопные газы и сильные колебания почвы от автомобилей ускоряют процесс старения зданий, приводят к деградации придорожной растительности.

В районах с узкими улицами с высокими домами большая концентрация оксида углерода рассеивается медленно и вызывает хронические отравления людей, длительное время находящихся в этих районах, особенно на перекрестках (регулирующих уличное движение, уличных торговцев и т.д.).

Основные экологические беспокойства связаны с высокой токсичностью выхлопных газов и неудовлетворительными шумовыми характеристиками автомобилей. Пробег в 1000 км для каждого легкового автомобиля сопровождается потреблением значительного количества кислорода и выбросом из выхлопной трубы до 40 кг веществ, загрязняющих атмосферу.

В отработанных газах автомобилей присутствуют окиси углерода, диоксид серы, сажа, соединения свинца, окислы азота, бензпирен и другие вещества – десятки компонентов, некоторые из которых канцерогенны. Они вызывают кислородное голодание, нарушение функций центральной нервной системы, раздражение слизистых оболочек глаз, носа.

8.1. Характеристика выбросов двигателей внутреннего сгорания

Основными загрязнителями транспортных средств являются углеводороды, оксид углерода и оксиды азота.

Углеводороды – это широкий класс совершенно произвольных смесей углеводородных соединений. Они происходят из бензина, дизельного топлива и продуктов их сгорания. В состав этих топлив входят сотни углеводородных соединений. Для упрощения обычно из углеводородов выделяют какое-то определенное соединение и оперируют в дальнейшем с ним, предполагая, что остальные эквивалентны ему. В качестве такого соединения выбирают обычно метан (CH_4), пропан (C_3H_8) или гексан (C_6H_{14}).

В инженерной терминологии для неизвестной смеси оксидов азота принято обозначение NO_x . Как правило, в выбросах оксидов азота доминирует оксид азота (NO) с небольшой примесью (<10 %) диоксида азота (NO_2). В атмосферных условиях NO превращается в NO_2 .

Выбросы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) делятся на выбросы от карбюраторных и дизельных двигателей. Такое разделение связано с тем, что карбюраторные двигатели (КД) работают с однородными топливновоздушными смесями, в то время как дизельные двигатели (ДД) – с гетерогенными смесями.

Выбросы загрязнений от двигателей внутреннего сгорания карбюраторного типа включают углеводороды, оксиды углерода, оксиды азота и нерегулярные выбросы. Загрязнения возникают вследствие реакций и в процессе горения в объеме и на поверхностях. Прорыв газов через поршневые кольца и выхлоп из цилиндров являются менее интенсивным источником выбросов загрязнений.

В 1980 г. 4 % выпускаемых в мире легковых и грузовых автомобилей было оснащено дизелями, а к концу 80-х годов этот показатель возрос до 25 %. Ос-

новые выбросы загрязнений дизельных двигателей те же самые, что и карбюраторных двигателей (углеводороды, оксид углерода, оксиды азота, нерегулярные выбросы), но к ним добавляются частицы углерода (сажевый аэрозоль).

Содержание вредных веществ в выбросах автомобилей колеблется в широких пределах и зависит от многих факторов, например, при скорости 70 км/ч в выхлопе автомобиля содержится 0,2... 0,3% CO, при скорости более 100 км/ч и при работе двигателя на холостом ходу содержание этого опасного газа достигает 12 %.

Легковой автомобиль выбрасывает оксида углерода CO до 3 м³/ч, грузовой – до 6 м³/ч (3... 6 кг/ч).

О составе выхлопных газов автомобилей с различными типами двигателей можно судить по данным, приведенным в табл. 8.1.

Таблица 8.1. Примерный состав выхлопных газов автомобилей

Компоненты	Содержание, % (об.)	
	карбюраторный двигатель	дизельный двигатель
N ₂	74–77	76–78
O ₂	0,3–8,0	2–18
H ₂ O (пары)	3,0–5,5	0,5–4,0
CO ₂	5,0–12,0	1,0–10,0
CO	5,0–10,0	0,01–0,50
Оксиды азота	0–0,8	2·10 ⁻³ –0,5
Углеводороды	0,2–3,0	1·10 ⁻³ –0,5
Альдегиды	0–0,2	1·10 ⁻³ –9·10 ⁻³
Сажа	0–0,4 г/м ³ 0,01–1,1 г/м ³	
Бензапирен	(10–20)·10 ⁻⁶ , г/м ³ до 1·10 ⁻⁵ г/м ³	

Выбросы оксида углерода и углеводородов у карбюраторных двигателей существенно выше, чем у дизельных двигателей.

8.2. Снижение выбросов двигателей внутреннего сгорания

Повышение экологических показателей автомобиля возможно за счет проведения комплекса мероприятий по совершенствованию его конструкции и режима эксплуатации. К улучшению экологических показателей автомобиля приводят: повышение его экономичности; замена бензиновых ДВС на дизельные; перевод ДВС на использование альтернативных топлив (сжатый или сжиженный газ, этанол, метанол, водород и др.); применение нейтрализаторов отработавших газов ДВС; совершенствование режима работы ДВС и технического обслуживания автомобиля.

Известны и применяются ряд методов снижения токсичности выхлопных га-

зов. Среди них работа автомобиля в условиях, когда двигатель выделяет наименьшее количество токсичных веществ (уменьшение торможения, равномерное движение с определенной скоростью и т. д.); применение специальных присадок к топливу, увеличивающих полноту его сгорания и уменьшающих выброс CO (спирты, другие соединения); пламенное дожигание некоторых вредных компонентов.

В карбюраторных двигателях соотношение между воздухом и топливом влияет на содержание углеводородов и оксида углерода в выхлопе. Так, например, выбросы увеличиваются при увеличении обогащения смеси. Содержание CO увеличивается из-за неполного сгорания, вызванного недостатком кислорода в смеси. Увеличение содержания углеводородов происходит в первую очередь из-за увеличения адсорбции топлива и усиления механизма неполного сгорания топлива. Бедные смеси создают более низкие концентрации C_nH_m и CO в выбросе в результате их более полного сгорания.

В дизельных двигателях мощность изменяется при изменении количества впрыскиваемого топлива. В результате изменяется распределение струи топлива, количество топлива, ударяющегося о стенку, давление в цилиндре, температура, а также продолжительность впрыскивания.

Специалисты считают, что для заметного снижения вредных выбросов необходимо сократить потребление бензина с 8 литров (на 100 км пробега – до 2...3 л. Это требует совершенствование устройства двигателя и качества топлива; перехода на неэтилированный бензин; применения каталитического дожига для уменьшения выброса CO; внедрения электронной системы управления процессом горения топлива; и другие меры, в частности применения глушителей шума в системе выхлопа.

Повышение топливной экономичности автомобиля достигается главным образом за счет совершенствования процесса сгорания в ДВС: послойное сжигание топлива; форкамерно-факельное сжигание; применение подогрева и испарения топлива во впускном тракте; использование электронного зажигания. Дополнительными резервами повышения экономичности автомобиля являются:

- снижение массы автомобиля за счет усовершенствования его конструкции и применения неметаллических и высокопрочных материалов;
- улучшение аэродинамических показателей кузова (последние модели легковых автомобилей обладают, как правило, на 30...40 % меньшим коэффициентом лобового сопротивления);
- снижения сопротивления воздушных фильтров и глушителей, отключения вспомогательных агрегатов, например вентилятора и т. п.;
- снижения массы перевозимого топлива (неполное заполнение баков) и массы инструментов.

Современные модели легковых автомобилей существенно отличаются по топливной экономичности от предшествующих моделей.

Перспективные марки легковых автомобилей будут обладать расходом бензина 3,5 л/100 км и менее. Повышение экономичности автобусов и грузовых автомобилей достигается прежде всего применением дизельных ДВС. Они обладают экологическими преимуществами по сравнению с бензиновыми ДВС, поскольку имеют меньший на 25...30 % удельный расход топлива; кроме того, со-

став отработавших газов у дизельного ДВС менее токсичен (см. табл. 8.1).

Экологическими преимуществами по сравнению с бензиновыми ДВС обладают двигатели, работающие на альтернативных топливах. Общее представление о снижении токсичности ДВС при переходе на альтернативное топливо можно получить из данных, приведенных в табл. 8.2.

Таблица 8.2 Токсичность выбросов ДВС на различных топливах

Топливо	Выбросы, %	
	CO	NO _x
Бензин	100	100
Природный газ	60	74
Метанол	50	55

Многие ученые видят частичное решение экологической проблемы в переводе автомобилей на газообразное топливо. Так, содержание окиси углерода в выхлопах газомобилей меньше на 25... 40 %; окиси азота на 25... 30 %; сажи на 40... 50 %. При использовании в автомобильных двигателях сжиженного или сжатого газа выхлопные газы почти не содержат оксида углерода. Решением проблемы явилось бы широкое применение электромобиля. Выпускаемые электромобили имеют ограниченный радиус действия из-за ограниченной емкости и большой массы батарей. Сейчас ведутся широкие исследования в этой области. Некоторые положительные результаты уже достигнуты. Снижение токсичности выбросов может быть достигнуто уменьшением содержания соединений свинца в бензине без ухудшения его энергетических качеств.

Перевод на газовое топливо не предусматривает значительных изменений в конструкции ДВС, однако сдерживается отсутствием станций заправки и необходимого количества автомобилей, переоборудованных для работы на газе. Кроме того, автомобиль, переоборудованный для работы на газовом топливе, теряет грузоподъемность из-за наличия баллонов и запас хода приблизительно в 2 раза (200 км против 400... 500 км у бензинового автомобиля). Эти недостатки частично устранимы при переводе автомобиля на сжиженный природный газ.

Применение метанола и этанола требует изменений конструкции ДВС, так как спирты более химически активны к резинам, полимерам, медным сплавам. В конструкцию ДВС необходимо вводить дополнительный подогреватель для запуска двигателя в холодный период года (при $t < -25$ °С); необходима перерегулировка карбюратора, так как изменяется стехиометрическое отношение расхода воздуха к расходу топлива. У бензиновых ДВС оно равно 14,7; у двигателей на метаноле – 6,45, а на этаноле – 9. За рубежом (Бразилия) применяют смеси бензина и этанола в пропорции 12:10, что позволяет использовать бензиновые ДВС с незначительными изменениями их конструкции, несколько повышая при этом экологические показатели двигателя.

Несмотря на то, что выбросы токсичных веществ (C_nH_m и CO) из картера и топливной системы двигателя по крайней мере на порядок ниже выбросов выхлопных газов, в настоящее время разрабатываются методы сжигания картерных

газов ДВС. Известна замкнутая схема нейтрализации картерных газов с подачей их во впускной трубопровод двигателя с последующим дожиганием. Замкнутая система вентиляции картера с возвращением картерных газов до карбюратора уменьшает выделение в атмосферу углеводородов на 10... 30 %, оксидов азота на 5... 25 %, но при этом увеличивается выброс оксида углерода на 10... 35 %. При возвращении картерных газов после карбюратора снижается выброс C_nH_m на 10... 40 %, CO на 10... 25 %, но возрастает выброс NO_x на 10... 40 %.

Для предотвращения выбросов паров бензина из топливной системы, основная часть которых поступает в атмосферу, когда двигатель не работает, на автомобилях устанавливают систему обезвреживания испарений топлива из карбюратора и топливного бака, состоящую из трех основных узлов (рис. 8.1): герметичного топливного бака 1 со специальной емкостью 2 для компенсации теплового расширения топлива; крышки 3 топливно-заправочной горловины бака с двусторонним предохранительным клапаном для предотвращения чрезмерного давления или разрежения в баке; адсорбера 4 для поглощения паров топлива при выключенном двигателе с системой возврата паров во впускной тракт двигателя во время его работы. В качестве адсорбента используют активированный уголь.

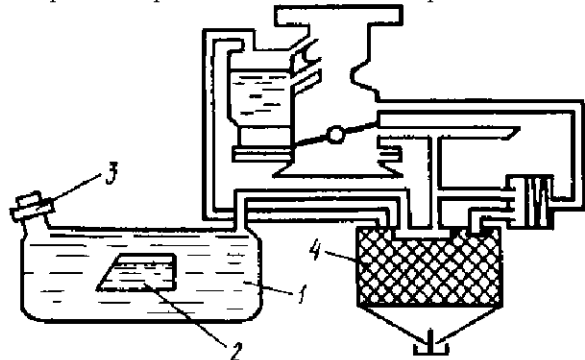


Рис. 8.1. Схема улавливания паров топлива бензинового ДВС

Соблюдение регламента технического обслуживания и контроль состава отработанных газов (ОГ) ДВС позволяет значительно сократить токсичные выбросы в атмосферу. Известно, что при 160 тыс. км пробега и при отсутствии контроля выбросы CO возрастают в 3,3 раза, а C_nH_m – в 2,5 раза.

Повышение экологических показателей газотурбинной двигательной установки (ГТДУ) на самолетах достигается совершенствованием процесса сгорания топлива, применением альтернативного топлива (сжиженный газ, водород и др.), рациональной организацией движения в аэропортах.

Увеличение времени пребывания продуктов сгорания в камере сгорания ГТДУ сопровождается увеличением полноты сгорания (уменьшение содержания CO и C_nH_m в продуктах сгорания) и содержания в них оксидов азота. Поэтому, изменяя время пребывания газа в камере сгорания, можно достичь лишь минимальной токсичности продуктов сгорания, а не устранить ее полностью.

Более эффективным средством снижения токсичности ГТДУ является применение способов подачи топлива, обеспечивающих более равномерное смешение топлива и воздуха. К ним относятся устройства с предварительным испарением топлива, форсунки с аэрацией топлива и др. Испытания на модельных ка-

мерах свидетельствуют о том, что такими способами можно снизить содержание в продуктах сгорания C_nH_m более чем на порядок, CO – в несколько раз, обеспечить бездымный выхлоп и уменьшить содержание NO_x .

Существенное снижение содержания NO_x в продуктах сгорания ГТДУ достигается при стадийном процессе сгорания топлива в двухзонных камерах сгорания. В таких камерах основная часть топлива на режимах большой тяги сжигается в виде предварительно подготовленной бедной смеси. Меньшая часть топлива (~25 %) сжигается в виде богатой смеси, где и образуются в основном оксиды азота. Опыты показывают, что при таком сгорании можно снизить содержание NO_x в 2 раза.

Решение экологических проблем, связанных с применением ракетной техники, основано на использовании экологически безопасного топлива и прежде всего кислорода и водорода.

8.3. Нейтрализация выхлопов двигателей внутреннего сгорания

Улучшение экологических характеристик автомобилей возможно за счет комплекса мероприятий по совершенствованию их конструкций и режимов эксплуатации. К ним относятся повышение экономичности работы двигателей, замена их бензиновых версий на дизельные, использование альтернативных топлив (сжатый или сжиженный газ, этанол, метанол, водород и др.), применение нейтрализаторов отработанных газов, оптимизация режима работы двигателей и технического обслуживания автомобилей.

Значительное снижение токсичности ДВС достигается при использовании нейтрализаторов отработавших газов (ОГ). Известны жидкостные, каталитические, термические и комбинированные нейтрализаторы. Наиболее эффективными из них являются каталитические конструкции. Оснащение ими автомобилей началось в 1975 г. в США и в 1986 г. – в Европе. С тех пор загрязнение атмосферы выхлопами резко снизилось – соответственно на 98,96 и 90% по углеводородам, CO и NO_x .

Нейтрализатор – это дополнительное устройство, которое вводится в выпускную систему двигателя для снижения токсичности ОГ. Известны жидкостные, каталитические, термические и комбинированные нейтрализаторы.

Принцип действия жидкостных нейтрализаторов основан на растворении или химическом взаимодействии токсичных компонентов ОГ при пропускании их через жидкость определенного состава: вода, водный раствор сульфита натрия, водный раствор двууглекислой соды.

На рис. 8.2 представлена схема жидкостного нейтрализатора, применяемого с двухтактным дизельным двигателем. Отработавшие газы поступают в нейтрализатор по трубе 1 и через коллектор 2 попадают в бак 3, где вступают в реакцию с рабочей жидкостью. Очищенные газы проходят через фильтр 4, сепаратор 5 и выбрасываются в атмосферу. По мере испарения жидкость доливают в рабочий бак из дополнительного бака 6.

Пропускание отработавших газов дизелей через воду приводит к уменьшению запаха, альдегиды поглощаются с эффективностью 0,5, а эффективность очистки от сажи достигает 0,60... 0,80. При этом несколько уменьшается содержание бензпирена в отработанных газах дизелей. Температура газов после жид-

костной очистки составляет 40... 80 °С, примерно до этой же температуры нагревается и рабочая жидкость. При снижении температуры процесс очистки идет интенсивнее.

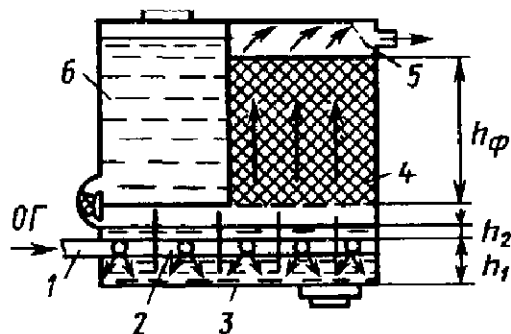


Рис. 8.2. Схема жидкостного нейтрализатора

Жидкостные нейтрализаторы не требуют времени для выхода на рабочий режим после пуска холодного двигателя. Недостатки жидкостных нейтрализаторов: большая масса и габариты; необходимость частой смены рабочего раствора; неэффективность по отношению к СО; малая эффективность (0,3) по отношению к NO_x; интенсивное испарение жидкости. Однако использование жидкостных нейтрализаторов в комбинированных системах очистки может быть рациональным, особенно для установок, отработавшие газы которых должны иметь низкую температуру при поступлении в атмосферу.

При расчете жидкостного нейтрализатора определяют его основные размеры и необходимое количество раствора для работы в течение определенного времени. Средние значения концентраций вредных компонентов отработавших газов до и после жидкостного нейтрализатора приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3 – Степень очистки вредных компонентов отработанных газов

Вещество	Концентрация, объемные доли, %		Степень очистки, %
	до нейтрализации	после нейтрализации	
СО	0,06	0,06	0
NO _x	0,002	0,001	50
Альдегиды	0,0144	0,003	98
SO ₂	0,008	0	100

Наиболее эффективным и перспективным средством уменьшения вредности выхлопа автомобилей является каталитическая нейтрализация. Дожигание негоревших компонентов выхлопов осуществляется на катализаторах. Каталитические реакторы устанавливаются в выхлопной системе и, в зависимости от конструкции, используются для удаления не только СО и C_nH_m, но и NO_x. Современный дожигатель обеспечивает очистку воздуха от оксида углерода на 98 %. В дожигателе должна поддерживаться температура 200°С. Это достигается за счет теплоты, выделяющейся при окислении дожигаемой примеси (при окислении СО в СО₂ происходит выделение теплоты).

Каталитическая нейтрализация отработавших газов ДВС на поверхности твердого катализатора происходит за счет химических превращений (реакции окисления или восстановления), в результате которых образуются безвредные или менее вредные для окружающей среды и здоровья человека соединения.

Катализаторы на основе благородных металлов (платина, палладий, рутений, родий и др.) наиболее широко используют для очистки отработавших газов ДВС. Эти катализаторы характеризуются хорошей селективностью в реакциях нейтрализации токсичных компонентов, низкими температурами начала эффективной работы, достаточной температуростойкостью, долговечностью и способностью устойчиво работать при высоких скоростях газового потока. Основным недостатком катализаторов этого типа – их высокая стоимость. Рутений, родий и иридий широко используют в качестве добавок к платиновым и палладиевым катализаторам, способным работать в широком диапазоне изменения состава рабочей смеси двигателя.

Для автомобильных транспортных средств для окисления CO и C_nH_m используются такие катализаторы, как платина и палладий. Для уменьшения содержания оксидов азота в качестве катализатора используется родий.

Для восстановления оксида азота применяют катализаторы на основе переходных металлов, в частности меди, хрома, кобальта, никеля и их сплавов. Эти катализаторы менее долговечны, чем платина Pt и палладий Pd; их эффективность заметно ниже при высоких объемных скоростях химических реакций; эффективная нейтрализация продуктов неполного сгорания достигается на таких катализаторах при более высоких температурах, чем на платиновых. Поэтому, несмотря на высокую стоимость, для каталитической нейтрализации отработавших газов чаще используют катализаторы на основе благородных металлов.

Для нейтрализации в отработавших газах NO_x , CO и C_nH_m применяют двухступенчатый каталитический нейтрализатор (рис. 8.3), состоящий из последовательно соединенных восстановительного 1 и окислительного 2 катализаторов. Отработавшие газы через патрубок поступают к восстановительному катализатору.

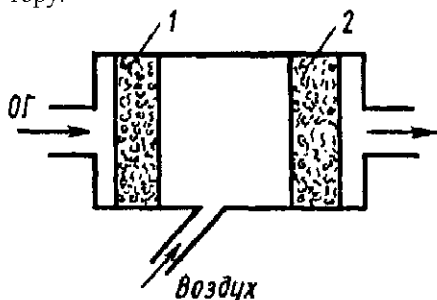
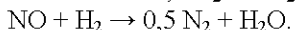
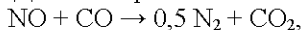


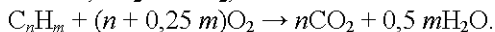
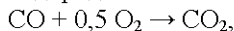
Рис. 8.3. Схема двухступенчатого каталитического нейтрализатора

На этом катализаторе нейтрализация окислов азота происходит по реакции (для ДВС с искровым зажиганием NO_x на 99% состоит из NO)



После восстановительного катализатора к отработавшим газам для создания окислительной среды подводится через патрубок вторичный воздух. На окисли-

тельном катализаторе происходит нейтрализация продуктов неполного сгорания CO и C_nH_m . Основными процессами являются окисление оксидов углерода и углеводов:



Результаты испытаний автомобиля с двухступенчатым каталитическим нейтрализатором (в 1-й ступени – медноникелевый сплав, во 2-й – платина) приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4 Результаты испытаний автомобиля с каталитическим нейтрализатором

Автомобиль	Концентрация токсических веществ		
	NO _x , мг/м ³	C _n H _m , %	CO, мг/м ³
Без нейтрализатора	1759	100	9100
С нейтрализатором	283	46	3500

Применяют в основном окислительные каталитические нейтрализаторы. Эффективность работы нейтрализатора, его массовые и габаритные показатели, создаваемое им противодействие выпуску ОГ зависят в основном от характера протекания газодинамических и массообменных процессов.

Одной из основных задач при проектировании нейтрализатора является определение длины каталитического слоя, через который проходят газы в процессе нейтрализации. В общем случае длина слоя, необходимая для достижения заданной степени очистки, зависит от скорости кинетических превращений и скорости потока. Однако вследствие большой скорости реакции, достигаемой на платиновых катализаторах в области малых концентраций оксида углерода, основным фактором, определяющим общую скорость ее окисления, становится диффузия. Практически это означает, что расчет каталитических нейтрализаторов для обезвреживания продуктов неполного сгорания ОГ можно без большой погрешности выполнять, учитывая только процессы массопередачи в диффузионной области.

Расчет профиля концентраций по длине слоя гранулированного катализатора производится по формуле

$$\frac{c_x}{c_0} = \exp \left[- \frac{ax}{1,38 Sc^{2/3} (Re^{0,41} - 1,5)} \right],$$

где c_x – текущая концентрация компонента по координате x ;

c_0 – исходная концентрация компонента на входе в реактор;

$a = 6(1 - \varepsilon)/d_k$ – удельная поверхность насыпного катализатора;

ε – пористость слоя катализатора;

d_k – диаметр отдельной гранулы насыпного слоя катализатора;

$Sc = \nu/D$ – число Шмидта;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

D – коэффициент диффузии;

$Re = w d_k/\nu$ – число Рейнольдса;

w – средняя скорость течения газа через каналы, образующие слой.

Степень очистки ОГ от вредных веществ при $x = l$ составит $\eta = 1 - c_l/c_0$, где l – длина слоя катализатора.

Полное сопротивление нейтрализатора включает потери давления на входе, активной зоне и выходе:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{\text{вх}} + \Delta p_{\text{акт}} + \Delta p_{\text{вых}}.$$

Потери на входе $\Delta p_{\text{вх}}$, выходе $\Delta p_{\text{вых}}$ и в активном слое определяют по формулам гидравлики.

В качестве скорости при определении числа Рейнольдса Re_k необходимо использовать скорость газа в порах, равную $w = Q_g / (F_k \varepsilon)$, где Q_g – расход отходящих газов; F_k – площадь поперечного сечения катализатора с пористостью ε . Число Рейнольдса определяют по соотношению $Re_k = w d_n / \nu$, где $d_n = 2\varepsilon d_k / [(1 - \varepsilon)^3]$.

Газодинамика слоя катализатора является только одним из факторов, определяющих аэродинамические характеристики нейтрализатора в целом. В частности, равномерность распределения газа по поверхности слоя зависит не столько от абсолютной потери давления в нем, сколько от отношения кинетической энергии потока газа во входной полости над реактором к перепаду давления на слое. Это относится и к выходной полости нейтрализатора.

Приемлемое для практических целей равномерное распределение потока газа достигается, если выполняется условие $\Delta p_{\text{вх}} / \Delta p_{\text{акт}} < 0,15 \dots 0,2$. С учетом этого условия, а также требований компактности степень расширения входного диффузора выбирают в пределах 2...2,5.

Экспериментальные исследования позволяют сформулировать достаточно простые правила, которых надо придерживаться при проектировании каталитических нейтрализаторов: длина гранулированного слоя катализатора для карбюраторного ДВС должна составлять 10...15 диаметров гранулы, а для дизельного в 2...2,5 раза больше; приведенная к нормальным условиям скорость газа по полному сечению реактора (скорость фильтрации) не должна превышать 1 м/с.

Каталитические нейтрализаторы конструктивно состоят из входного и выходного устройств, корпуса и заключенного в него реактора. Разработаны каталитические нейтрализаторы (рис. 8.4) для отработавших газов ДВС транспортных средств с бензиновыми и дизельными двигателями. Каталитические нейтрализаторы снижают в ОГ содержание CO на 70...90 %. C_nH_m – на 50...85 %.

Схема установки каталитического нейтрализатора в системе ДВС показана на рис. 8.5. Отработавшие газы от двигателя 1 поступают по выпускной трубе 2 к каталитическому нейтрализатору 3, после чего выбрасываются в атмосферу. Для поддержания необходимой температуры газов в нейтрализаторе используется электронный блок 4, регулирующий клапаном 5 подачу воздуха через ресивер 6 и обратный клапан 7 из атмосферы в нейтрализатор.

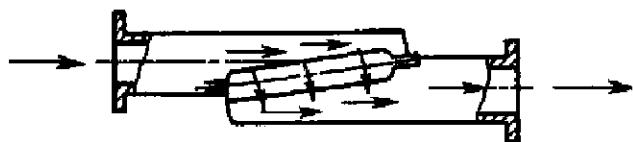


Рис. 8.4. Каталитический нейтрализатор для бензинового ДВС

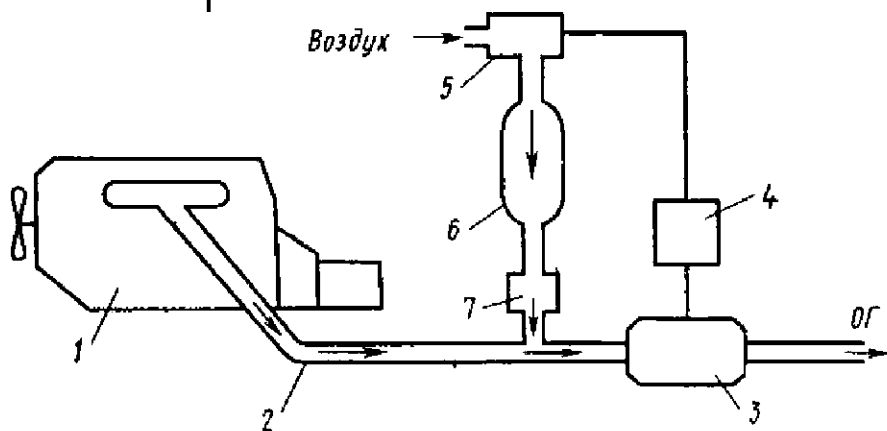
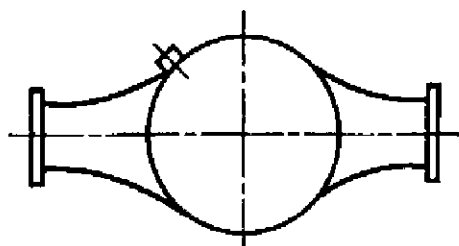


Рис. 8.5. Схема установки каталитического нейтрализатора

8.4. Улавливание аэрозолей, выбрасываемых дизельным двигателем

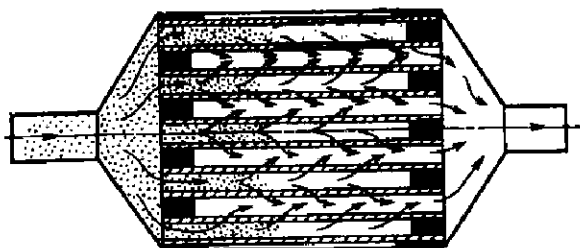
Для улавливания сажи в дизельных ДВС известно несколько конструкций устройств, использующих как принцип электростатической очистки, так и метод фильтрации.

Сущность проблемы, связанной с улавливанием частиц сажи из потока выхлопных газов, состоит в том, что эти частицы очень малы по размерам – диаметр половины из них менее 5 мкм, плотность их также низка – $0,05 \text{ г/см}^3$. Как правило, выход аэрозоля составляет от 0,1 до 0,5 % массы топлива. Следовательно, традиционные фильтры будут быстро забиваться.

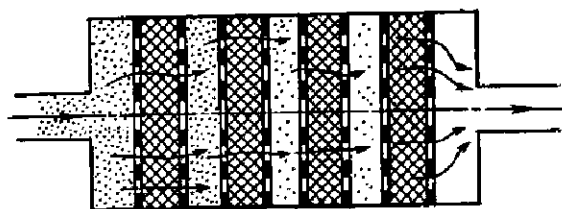
Одним из лучших конструктивных решений для снижения содержания твердых частиц в выхлопе дизельных двигателей считается установка фильтров регенеративного типа. Фильтр (рис. 8.6, а) представляет собой сотовую конструкцию с ячейками прямоугольного сечения. Пористый материал фильтра обладает достаточной механической прочностью, стойкостью к агрессивным химическим веществам, сопротивлением к оплавлению и образованию трещин при тепловых

воздействиях, а также термической стабильностью.

Фильтр (рис. 8.6, б), выполненный в виде нескольких последовательно расположенных пористых перегородок, обладает повышенной эффективностью очистки.



а



б

Рис. 8.6. Схема фильтров-сажеуловителей с соевой (а) и многослойной насадкой (б)

Накопившиеся в фильтре частицы следует периодически удалять предпочтительно термическим окислением. Для этого отходящие газы нагревают до 450°C и выше, что приводит к воспламенению накопившейся сажи. Данные, полученные при проведении эксперимента с дизелем рабочим объемом 2,3 л, по определению концентрации основных примесей в отработавших газах дизеля, приведены в табл. 8.5.

Сажеуловители дизельных ДВС должны обеспечивать ресурс 10000 км и более при незначительном увеличении гидравлического сопротивления, что обеспечивается периодической (примерно через 100 км пробега) регенерацией фильтроэлемента. Конструктивно фильтроэлементы выполняют в виде многоканальных моноблоков, объемно-проволочных элементов и в виде намотанных на перфорированную трубу стеклокерамических нитей, допускающих регенерацию при 600 °С.

Таблица 8.5 Экспериментальные данные испытаний дизельного двигателя

Схема выпуска отработавших газов	Концентрация, г/км	
	углеводороды CO, NO _x , C _n H _m	твердые частицы
Без фильтра	0,312, 0,937, 0,784	0,169
С чистым керамическим фильтром	0,337, 0,931, 0,700	0,031

9. Оценка эффективности устройств для очистки газовых выбросов

Экологическое совершенство очистного оборудования определяется отношением достигаемого уровня обезвреживания и экологически приемлемого уровня загрязнения биосферы. Объективным критерием последнего служит темп естественного изменения качества атмосферы, характеризуемый параметром изменчивости R :

$$R = dC/(C_0 dt),$$

где C_0 и t – начальная концентрация вещества и время наблюдения за ее изменением.

Оценка эффективности работы очистных устройств по ПДК удобна, но экологически малоинформативна. Однако не это препятствует распространению санитарно-гигиенического метода оценки эффективности очистных устройств, основанного на сравнении достигаемого уровня обезвреживания с ПДК. Неувязка в том, что обработка выбросов современными методами позволяет уменьшить концентрации вредных примесей более чем на 95%, и все же их значения остаются на 4...5 и более порядков выше нормативов ПДК.

Дальнейшее понижение концентраций загрязнителей до уровня, сопоставимого с ПДК, обошлось бы слишком дорого.

Так, например, минимальное количество энергии, необходимое для конденсации единицы массы (1 кг) гомогенной примеси, численно равно работе процесса изотермического обратимого сжатия ее объема от парциального давления p_n до давления насыщения $p_{нас}$:

$$A = 2,303 R T \lg(p_{нас}/p_n),$$

где A – работа сжатия, Дж/кг;

R – газовая постоянная, Дж/(кг·К);

T – абсолютная температура смеси, К.

Приняв по порядку величины давления газовых выбросов и $p_{нас}$ близкими к атмосферному, а ПДК_{св} загрязнителя порядка 10^{-5} % об. (10^{-7} об. долей), вычислим соотношение затрат энергии K на компрессию примеси с концентрацией, сравнимой с ПДК_{св}, например, 10^{-4} % об. (10^{-6} об. долей) и с обычной для промышленных гомогенных загрязнителей концентрацией 10^{-1} % об. (10^{-3} об. долей).

Таким образом, энергетические затраты на удаление одинакового количества загрязнителя посредством конденсации логарифмически возрастают с понижением его концентрации. Аналогичная зависимость характерна и для сорбционных методов очистки, основой которых также является конденсация примесей.

Химические (в том числе и термоокислительные) методы обработки выбросов характеризуются ростом затрат энергии с понижением начальных концентраций загрязнителей как на единицу обрабатываемой массы, так и на процесс в целом вследствие уменьшения скорости реакции:

$$w = k A^\alpha B^\beta,$$

где α и β – стехиометрические коэффициенты уравнения реакции с исходными реагентами A и B ;

w , k – скорость и константа скорости прямой реакции.

Для обеспечения прежней степени завершенности при замедлении превра-

шения веществ необходимо повысить температурный уровень процесса, компенсируя коэффициент проскока загрязнителя через n -ый аппарат; понижение концентрации обеспечивается увеличением константы скорости реакции или интенсифицировать процесс за счет подвода механической энергии.

В ряде случаев для очистки пылегазовых выбросов применяются термохимические, термокаталитические, хемосорбционные и другие способы обработки, которые по сути являются скомбинированными из рассмотренных выше. Процессы, происходящие при этом, будут иметь еще более сложный характер, однако принцип возрастания затрат энергии с увеличением глубины очистки справедлив и для них.

По этой причине уровень обезвреживания пылегазовых выбросов устанавливается исходя из экономических соображений, а не по экологическим или санитарно-гигиеническим требованиям.

В экономически допустимых пределах совершенство современных пылегазоочистных устройств принято оценивать по степени (коэффициенту) очистки.

Если отбросные газы последовательно обрабатываются в нескольких аппаратах, то коэффициент очистки определяют с учётом очистки в каждом из аппаратов

Соотношения (9.4-9.6) справедливы для выбросов, содержащих один гомогенный загрязнитель, при обработке которого не образуется новых токсичных соединений. Для многокомпонентных смесей эти формулы можно применять, если способ обезвреживания имеет одинаковые коэффициенты очистки по всем ингредиентам. Однако на практике приходится иметь дело с селективностью очистных устройств по загрязнителям.

Возможность использования того или иного типа устройства для обезвреживания выбросов определенного состава устанавливается по полному коэффициенту очистки, для подсчета которого необходимы данные о селективных коэффициентах очистки рассматриваемого аппарата.

Применительно к гомогенным газовым выбросам выражение для определения селективных (парциальных) коэффициентов очистки представляется несколько в ином виде, чем для пылегазовых выбросов, так как состав гомогенных загрязнителей в отличие от дисперсных удобнее относить ко всему количеству отбросных газов.

После решения вопроса о селективных коэффициентах очистки можно подсчитать полный коэффициент очистки η_{Σ} (состав загрязнителей должен быть задан или определен заранее):

$$\eta_{\Sigma} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N C_{in} n_{ci}}{\sum_{i=1}^N C_{in}} \right) 100\% .$$

Менее всего разработана проблема оценки совершенства способов обработки, связанных с химическими превращениями загрязнителей. Практикуемое в таких случаях формальное применение формулы может привести к грубым ошибкам. Игнорирование конкретных свойств исходных реагентов и термодинамически возможного набора конечных продуктов может обернуться тяжелыми

последствиями, поскольку зачастую продукты реакции не безвредны, а иногда и более токсичны, чем исходные компоненты.

Такие ошибки типичны при оценке метода термического обезвреживания, который часто рассматривается в качестве универсального средства. Если термообезвреживанию подвергаются токсичные органические вещества – альдегиды, кетоны, органические кислоты, ароматические соединения, молекулы которых содержат только атомы С, Н и О, то при правильной организации процесса сжигания они почти полностью окисляются до практически безвредных CO_2 и H_2O . Вместе с тем в процессе горения образуются оксиды азота NO и NO_2 , которые сами по себе менее токсичны, чем исходные соединения, но по воздействию на биосферу сравнимы с формальдегидом, акролеином, оксидами серы и другими соединениями, участвующими в образовании сульфатных и фотохимических смогов. Формальный расчет степени обезвреживания по исходным загрязнителям может показать картину глубокой очистки вредных выбросов, в то время как учет в формуле (9.5) образовавшихся оксидов азота поможет выявить реальную ситуацию. Если степень очистки выбросов окажется при этом недостаточной (например, при высоких концентрациях оксидов азота, характерных для энергетических парогенераторов и высокотемпературных печей), то может возникнуть вопрос о двухступенчатой очистке и, следовательно, о дополнительных затратах средств. При таком варианте решения задачи полный коэффициент очистки можно подсчитать по формуле (9.6), учитывающей результаты обеих ступеней обезвреживания.

Коэффициент очистки служит прежде всего показателем интенсивности процессов, протекающих в очистном устройстве. Показателей экологического или санитарно-гигиенического совершенства аппаратов обезвреживания в настоящее время нет, а их разработка сопряжена с затруднениями принципиального характера, которые отмечались ранее. Сомнительно также, что такого рода показатели окажутся более полезными, поскольку применять некомпетентно можно как простые, так и самые сложные методики расчетов.

10. Выбор вариантов газоочистки

Современные технические средства обработки технологических газовых выбросов не обеспечивают их полного обезвреживания или восстановления первоначального качества воздуха, использованного в производственном цикле. Поэтому отработанные газы всегда вносят в атмосферу часть отходов производства.

Простые методы обработки выбросов современных производственных процессов также скорее всего не обеспечат надлежащей степени очистки, предотвращающей ощутимый ущерб окружающей среде. Не стоит рассчитывать на то, что можно будет обойтись примитивными устройствами при постановке задачи обезвреживания гомогенных загрязнителей. Такими методами, как орошение газовых потоков в каналах и камерах, невозможно достичь глубокого обезвреживания гомогенных выбросов, а существующие проблемы дополнятся при этом необходимостью очищать загрязненные стоки.

При постановке задачи проектирования должны быть охвачены все загряз-

нителю, которые могут присутствовать в выбросах, для чего необходимо тщательно проанализировать состав выбросов, выделив нейтральную часть и компоненты, которые могут нанести ущерб окружающей среде.

Строго говоря, безвредными компонентами выбросов относительно атмосферного воздуха можно считать только азот N_2 и кислород O_2 , однако на практике к ним относятся также углекислый газ (диоксид углерода) CO_2 и водяные пары H_2O как нетоксичные соединения.

Все остальные компоненты следует либо обезвредить, т.е. превратить каким-либо способом в указанные выше безвредные соединения, либо удалить. Таким образом, в приближенном к идеальному варианту выброс не должен содержать никаких других компонентов, кроме N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O .

Все компоненты, подлежащие удалению, необходимо оценить по физико-химическим и санитарно-гигиеническим свойствам. Следует обратить внимание на агрегатное состояние и термодинамические параметры загрязнителей, их реакционную способность или каталитические свойства в атмосферных химических и фотохимических процессах, степень опасности воздействия на живые организмы.

Для газообразных загрязнителей важны данные о температурах кипения и деструкции, критических параметрах, теплотах фазовых переходов, характеристиках растворения и др. (например, для горючих газов – о температурах вспышки и воспламенения, теплоте сгорания, концентрационных пределах воспламенения).

Наиболее сложны для очистки выбросы, загрязнители которых представляют многофазную систему. Поскольку большинство современных очистных аппаратов не приспособлено для одновременного обезвреживания дисперсных и гомогенных загрязнителей, то в общем случае подобные выбросы должны пройти последовательно 4 стадии обработки: предварительную и тонкую очистку от аэрозоля и затем предварительное и окончательное обезвреживание газообразного загрязнителя. В частности, если газообразный загрязнитель хорошо растворяется в воде, может быть организована предварительная обработка выбросов мокрыми способами, которая позволит понизить концентрации как дисперсных, так и гомогенных загрязнителей.

Для очистки выбросов от газообразных загрязнителей чаще всего применяют методы конденсации, абсорбции, адсорбции и термообезвреживания.

Если температура кипения загрязнителей при атмосферном давлении невысока (ориентировочно ниже $100^\circ C$), то глубокая очистка посредством охлаждения и повышения давления потребует чрезмерно высоких расходов энергии, и конденсационную очистку можно использовать только как предварительную.

Абсорбционной обработке могут быть подвергнуты выбросы, загрязнители которых хорошо растворяются в абсорбенте. Если при этом концентрация загрязнителя в выбросах превышает $(1...2) \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$, то технически возможно достичь степени очистки более 90%.

В качестве абсорбента чаще всего используются вода или органические жидкости, кипящие при высокой температуре. В аппаратах с органическими абсорбентами можно обрабатывать выбросы, не содержащие твердых примесей, которые практически не поддаются отделению от поглотительной жидкости.

Для некоторых газовых загрязнителей можно успешно применить химическую абсорбцию (хемосорбцию) – процесс, в котором подлежащий удалению загрязнитель вступает в химическую реакцию с поглотителем и образует нейтральное или легко удаляемое из процесса соединение. Такие процессы специфичны и разрабатываются конкретно для каждого вида выбросов и набора загрязнителей.

Самым универсальным средством очистки выбросов от газообразных загрязнителей на настоящее время остается адсорбция, а наиболее универсальным адсорбентом – активированный уголь. Посредством адсорбции принципиально возможно извлечь из выбросов любой загрязнитель в широком диапазоне концентраций. Однако высококонцентрированные загрязнители (ориентировочно с концентрациями более $5 \cdot 10^{-3}$ кг/м³) удобнее подвергать предварительной обработке (конденсацией, абсорбцией) для снижения их концентраций.

Необходима также предварительная обработка (осушка) сильно увлажненных газов.

Часто в качестве универсального средства очистки выбросов рассматривается термообезвреживание, каковым оно на самом деле не является. В термоокислительных процессах необратимо теряется качество воздуха, использованного для горения, а продукты окисления, выбрасываемые в атмосферу, содержат некоторое количество новых токсичных веществ – оксида углерода СО и оксидов азота NO_x. Вообще область применения термообезвреживания ограничена только соединениями, в молекулах которых нет других элементов, кроме углерода С, водорода Н и кислорода О. Получить нетоксичные продукты реакции любых других соединений с кислородом принципиально невозможно. Термоокислительная обработка выбросов, загрязненных углеводородами или КПУ (кислородными производными углеводородов), ограничивается также по затратам топлива на создание требуемых температур в зоне реакции (400... 550°С для термокаталитической обработки и 800... 1200°С для непосредственного термоокисления, т.е. сжигания в пламени).

К перспективным способам обработки больших объемов выбросов с невысокими концентрациями органических газообразных загрязнителей можно отнести схему термообезвреживания с предварительным концентрированием загрязнителей посредством адсорбции. Такая схема может быть технически и экономически приемлемой при начальной концентрации загрязнителя выше 50 мг/м³. Теплоту, выделяющуюся при сгорании загрязнителей, можно достаточно легко утилизировать. Если концентрация горючих загрязнителей может быть доведена ориентировочно до $(5...6) \cdot 10^3$ кг/м³, то термообработку можно организовать с незначительным добавлением топлива, а при более высоких концентрациях можно ожидать и экономической эффективности работы установки.

Представляются перспективными способы обработки отбросных газов, основанные на переводе парообразных загрязнителей в конденсированное состояние и последующей фильтрации образовавшегося аэрозоля. Если загрязнители имеют невысокое давление насыщенных паров, то может быть приемлемой конденсация посредством повышения давления и понижения температуры выбросов. Пары загрязнителей легкокипящих веществ могут быть подвергнуты обработке химическими реагентами таким образом, чтобы продукты реакции имели низкие давления насыщенных паров. Зачастую при этом способы химической

обработки удастся подобрать так, чтобы была возможна утилизация улавливаемого продукта.

Контрольные вопросы.

1. Характеристика выбросов двигателей внутреннего сгорания.
2. Снижение выбросов двигателей внутреннего сгорания.
3. Нейтрализация выхлопов двигателей внутреннего сгорания.
4. Улавливание аэрозолей, выбрасываемых дизельным двигателем.

Задания для самостоятельной работы

1. Изучить материал лекции.
2. Ответить на контрольные вопросы.

Рекомендованная литература по теме лекции: [1 – 27]

Список рекомендованной литературы

1. Охрана окружающей среды. /Под ред. С.В.Белова. – М.: Высш. шк., 1991.
2. Родионов А.И. Техника защиты окружающей среды /А.И Родионов, В.Н. Клушин, Н.С. Торочешников. – М.: Химия, 1989.
3. Родионов А.И. Технологические процессы экологической безопасности (Основы энвайронменталистики) /А.И. Родионов, В.Н. Клушин, В.Г. Систер. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2000.
4. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. В 3-х т. Калуга: Изд-во Н.Бочкаревой, 2003.
5. Панин В.Ф. Экология для инженера /В.Ф. Панин, А.И. Сечин, В.Д. Федосова. Под редакцией В.Ф.Панина. – М.: Издательский дом «Ноосфе-ра», 2001.
6. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973.
7. Плановский А.Н. Процессы и аппараты химической технологии /А.Н. Плановский, В.М. Рамм, С.З. Каган. – М.: Химия, 1967.
8. Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1991.
9. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – Л.: Химия, 1981.
10. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию. /Под ред. Ю.И.Дытнерского. – М.: Химия, 1983 (1991).
11. Зиганшин М.Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки /М.Г. Зиганшин, А.А. Колесник, В.Н. Посохин. – М.: «Экопресс – 3М», 1998.
12. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. 2-е изд. – М.: Химия, 1984.
13. Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений. – Л.: Химия, 1990.
14. Ветошкин А.Г. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы) /А.Г. Ветошкин, К.Р. Таранцева. – Пенза: Изд-во ПТИ, 2003.
15. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты атмосферы от газовых выбросов. – Пенза: Изд-во ПТИ, 2003.
16. Инженерная защита окружающей среды (в примерах и задачах). Учеб. пособие. /Под ред. О.Г.Воробьева. – С.-Петербург, Изд-во “Лань”, 2002.
17. Ильичев В.Ю. Основы проектирования экобиозащитных систем /В.Ю. Ильичев, А.С. Гринин. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002.
18. Аверкин А.Г. Аппараты для физико-химической очистки воздуха. Учеб. пособие. В 2-х частях. Ч.1. Абсорберы. Пенза: ПГАСА, 2000.
19. Аверкин А.Г. Аппараты для физико-химической очистки воздуха. Учеб. пособие. В 2-х частях. Ч.2 Адсорберы. Пенза: ПГАСА, 1999.
20. Тютюнников А.Б., Товажнянский Л.Л., Готлинская А.П. Основы расчета и конструирования массообменных колонн. Учеб. пособие. – К.: Вы-ща шк. Головное изд-во, 1989.
21. Тимонин А.С. Основы расчета и конструирования химико-технологического и природоохранного оборудования: Справочник: В 3 т. Т.2.

Калуга: Изд-во Н.Бочкаревой, 2002.

22. Квашнин И.М., Юнкеров Ю.И. Расчет выбросов загрязняющих веществ в атмосферу промышленными предприятиями. - Пенза: ПГАСА, 1998. 173 с.

23. Еремкин А.И., Квашнин И.М., Юнкеров Ю.И. Нормирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. - М.: Ассоциация строительных Вузов, 2000. - 176 с.

24. Арбузов В.В. Экологические основы охраны атмосферы. Учебное пособие, Пенза, МАНЭБ, 1998.

25. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976.

26. Страус В. Промышленная очистка газов. – М.: Химия, 1981.

27. Штокман Е.А. Очистка воздуха. – М.: Изд-во АСВ, 1999.

Учебное издание

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по дисциплине
**«ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА ЗАЩИТЫ АТМОСФЕРЫ
ОТ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ»**
для студентов направления подготовки 44.04.04
(образовательно-квалификационный уровень магистр)
В 2-х частях. Часть 2-я: Газоочистка/

Составитель:
Валентин Иванович Сафонов

Печатается в авторской редакции.
Компьютерная верстка и оригинал-макет автора.

Подписано в печать _____
Формат 60x84¹/₁₆. Бумага типограф. Гарнитура Times
Печать офсетная. Усл. печ. л. _____. Уч.-изд. л. _____
Тираж 100 экз. Изд. № _____. Заказ № _____. Цена договорная.

Издательство Луганского национального
университета имени Владимира Даля

*Свидетельство о государственной регистрации издательства
МИ-СРГ ИД 000003 от 20 ноября 2015 г.*

Адрес издательства: 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а
Телефон: 8 (0642) 41-34-12, **факс:** 8 (0642) 41-31-60
E-mail: uni@snu.edu.ua **http:** www.snu.edu.ua