

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ, НЕФТЕХИМИИ И БИОТЕХНОЛОГИИ

PROCESSES AND APPARATUS OF CHEMICAL ENGINEERING, PETROLEUM CHEMISTRY AND BIOTECHNOLOGY

Научная статья
УДК 66.074.5
<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2024-3-39-48>
EDN QDDZBK

Исследование методов и современных технических решений очистки аэрозольных выбросов промышленности

Любовь Михайловна Титова, Светлана Алексеевна Свирина[✉], Гурий Алексеевич Кушнер

Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, svetlanasv97@yandex.ru[✉]

Аннотация. Приведен анализ и дана характеристика аэрозольных выбросов в атмосферу, рассмотрены пути образования первичного и вторичного аэрозолей. Рассмотрен процесс атмосферного старения аэрозолей, который оказывает негативное воздействие на окружающую среду. Приведены функциональные связи между аэрозольными выбросами, их источником и воздействием на климат и здоровье населения. Рассмотрены возможное влияние на свойства атмосферного воздуха протекающих реакций жидких и твердых аэрозольных частиц. Рассмотрены основные методы очистки аэрозольных выбросов промышленности: адсорбционная очистка, термическая и каталитическая нейтрализация, хемосорбция и абсорбционная очистка. Проанализированы пути повышения эффективности адсорбционных процессов, например, секционирование адсорбента в аппарате. Описана суть процесса термической нейтрализации газовых смесей, установлено, что термические установки на основе метода прямого сжигания эффективнее работают при комбинировании методов термического и каталитического обезвреживания, представлены конструкции комбинированного оборудования, а также рассмотрены пути повышения интенсивности работы аппаратов. Рассмотрен процесс очистки газов на основе абсорбционного процесса. Определено, что абсорбционные установки для очистки газов от вредных компонентов являются наиболее эффективными и перспективными в связи с высоким уровнем технической реализации процесса. Пути развития и совершенствования основного оборудования – абсорберов направлены на достижение максимальной эффективности очистки при оптимальном перепаде давления, определяющим энергозатраты. Проведенный анализ показывает, какое негативное влияние оказывают природные и антропогенные аэрозоли на окружающую среду. Для правильного решения проблемы необходима информация об источниках, составе и свойствах аэрозолей для подбора наиболее эффективного и экономически выгодного метода очистки, который поможет снизить антропогенную нагрузку на атмосферу.

Ключевые слова: выбросы, аэрозоли, методы очистки, адсорбция, нейтрализация, абсорбция

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке КалмГУ, проект «Прикаспийский регион: оптимизация путей решения экологических проблем» (приказ № 1424-о/д).

Для цитирования: Титова Л. М., Свирина С. А., Кушнер Г. А. Исследование методов и современных технических решений очистки аэрозольных выбросов промышленности // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2024. № 3. С. 39–48. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2024-3-39-48>. EDN QDDZBK.

Original article

Research of methods and modern technical solutions for cleaning aerosol emissions from industry

Lyubov M. Titova, Svetlana A. Svirina[✉], Guriy A. Kushner

Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, svetlanasv97@yandex.ru[✉]

Abstract. The analysis and characterization of aerosol emissions into the atmosphere are given, the ways of formation of primary and secondary aerosols are considered. The process of atmospheric aging of aerosols, which has a negative impact on the environment, is considered. The functional links between aerosol emissions, their source and impact on climate and public health are presented. The possible influence of the reactions of liquid and solid aerosol particles on the properties of atmospheric air is considered. The main methods of purification of industrial aerosol emissions are considered: adsorption purification, thermal and catalytic neutralization, chemisorption and absorption purification. The ways of increasing the efficiency of adsorption processes, for example, the separation of adsorbent in the apparatus, are analyzed. The essence of the process of thermal neutralization of gas mixtures is described, it is established that thermal installations based on the direct combustion method work more efficiently when combining thermal and catalytic neutralization methods, designs of combined equipment are presented, and ways to increase the intensity of the apparatus are considered. The process of gas purification based on the absorption process is considered. It is determined that absorption plants for cleaning gases from harmful components are the most effective and efficient due to the high level of technical implementation of the process. The development and improvement of the main absorber equipment is aimed at achieving maximum cleaning efficiency with an optimal pressure drop that determines energy consumption. The analysis shows the negative impact of natural and anthropogenic aerosols on the environment. In order to correctly solve the problem, information on the sources, composition and properties of aerosols is needed to select the most effective and economically profitable cleaning method, which will help reduce the anthropogenic load on the atmosphere.

Keywords: emissions, aerosols, cleaning methods, adsorption, neutralization, absorption

Acknowledgment: the study was carried out with the financial support of KalmSU, the project “The Caspian region: optimization of the ways to solve environmental problems” (Order No. 1424-o/d).

For citation: Titova L. M., Svirina S. A., Kushner G. A. Research of methods and modern technical solutions for cleaning aerosol emissions from industry. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2024;3:39-48. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-3-39-48>. EDN QDDZBK.

Введение

В мировом сообществе уже несколько десятилетий экологические проблемы стоят на повестке дня. Центральной темой научных исследований в области экологии воздушного бассейна является анализ влияния аэрозольных выбросов на окружающую среду, в частности на атмосферу, здоровье живых существ и климат. Такой интерес к этой теме обусловлен с тем, что частицы аэрозоля рассеивают и поглощают солнечную и земную радиацию, задействованы в образовании облаков, тумана, различных осадков, а также оказывают влияние на объем и распределение в атмосфере остаточных газовых примесей, которые образуются в результате гетерогенных химических реакций и других многофазных процессов [1]. Способность преодолевать значительные расстояния свойственна для аэрозольных выбросов благодаря естественной конвекции воздушных потоков атмосферы, и подобное явление ведет к распространению патогенов различной природы (бактерий, спор, вирусов и т. д.). Проведено множество мониторинговых исследований [2–4], которые подтверждают зависимость между качеством и загрязненностью атмосферного воздуха и количеством респираторных, сердечно-

сосудистых, инфекционных и аллергических заболеваний.

Характеристика аэрозольных выбросов в атмосфере

По своему происхождению аэрозольные дисперсные системы принято разделять на естественные и искусственные. Образование естественных аэрозолей происходит под воздействием природных сил (выброс газов при извержении вулканов, ветровая эрозия почв, вымывание атмосферными водами и т. д.). Интенсивность воздействия на климат и здоровье населения естественных аэрозолей может быть значительная в конкретном географическом месте, но в глобальном масштабе говорить об этом не приходится. Значительно более негативны в этом смысле искусственные аэрозоли, образуемые в результате хозяйственной деятельности человека (транспорт, сектор жилищно-коммунальных хозяйств (ЖКХ), промышленность). Промышленные аэрозоли являются побочным продуктом или нежелательным отходом технологических процессов, обладают низкой или отрицательной добавочной стоимостью. С экономической точки зрения предприятия не заинтересованы в обезвреживании таких

отходов, но это диктует современная экологическая ситуация в мире.

Основной характеристикой аэрозолей с точки зрения их промышленной очистки является размер частиц. В зависимости от него, а также с учетом происхождения, аэрозоли делятся на пыли, дымы и туманы. Конкретные промышленные выбросы могут содержать частицы дисперсионного и конденсационного происхождения обычно ультрамикроскопического размера. Образование дисперсной частицы как твердой, так и жидкой фазы может происходить различными способами, например, при конденсации паров различных веществ или химической реакции газов (конденсационные аэрозоли). Если рассматривать дисперсионные аэрозоли, то они образуются в результате измельчения твердых или распыла жидких веществ в качестве побочного продукта реализуемого процесса. Механический или гранулометрический состав аэрозоля зависит от его происхождения. Как правило, конденсационные частицы имеют меньший размер, чем дисперсионные, которым свойственна неправильная форма и большая полидисперсность, и часто имеют правильную шарообразную форму.

Химический состав твердых частиц в воздухе промышленных выбросов включает в себя сульфаты, нитраты аммония, золу, органические соединения и сажу или элементарный углерод в количестве около 10–30 % от общей массы загрязняющих веществ.

По характеру образования аэрозоли разделяют на два вида: первичный и вторичный. Первичный аэрозоль образуется при непосредственном выбросе частиц в окружающую среду, вторичные частицы – в результате превращения газа в частицу в атмосфере. Это происходит в результате не только физических превращений, но и химико-физических процессов коагуляции, конденсации, химических реакций. Частицы аэрозоля изменяют размер, химический состав, структуру, называемые атмосферным старением.

С наибольшей скоростью процесс атмосферного старения протекает в облаках, которые образуются в результате конденсации водяного пара на ранее существовавших аэрозольных частицах. Если размер частиц дисперсной фазы при этом достигает таких значений, что вызывает ее осаждение под действием сил тяжести, выпадающих на Землю в виде осадков, то наблюдается так называемое «мокрое осаждение». Это основной процесс вывода загрязняющих частиц из атмосферы в глобальном масштабе. Осаждение загрязняющих частиц путем конвективного переноса, диффузии и адгезии к поверхности Земли более актуально в отношении качества местного воздуха, воздействия на здоровье (вдыхание и осаждение в дыхательных путях человека) [5, 6].

В зависимости от свойств аэрозоля и атмосферных условий характерное время пребывания в атмосферном воздухе аэрозольных частиц составляет от часов до недель [7]. Стоит учитывать и то, что концентрация, состав и распределение по размерам частиц атмосферного аэрозоля сильно изменяются во времени и пространстве. В нижних слоях атмосферы (тропосфере) концентрация загрязнений обычно находится в пределах около 1–100 мг/м³ [8]. Однако в разных географических местах и в разное время при различных метеорологических условиях относительное содержание различных химических компонентов может отличаться в разы.

Рис. 1 иллюстрирует наличие и характер функциональных связей между составом аэрозоля, зависящих от свойств, взаимодействия с атмосферой и изменения частиц выбросов при их попадании в атмосферу, воздействия на климат и здоровье. Для количественной оценки, надежного прогнозирования вызываемых эффектов и эффективного контроля требуется всесторонняя характеристика, систематизация и знание источников загрязняющих выбросов. Осуществление решения этих задач возможно только при использовании адекватных систем мониторинга выбросов и качества воздуха.



Рис. 1. Функциональные связи между аэрозольными выбросами, их источником и воздействием на климат и здоровье населения

Fig. 1. Functional links between aerosol emissions, their source and impact on climate and public health

В среднем общая массовая концентрация твердых частиц в воздухе снижается примерно в 2 раза от городского к сельскому и от сельского к высокогорному воздуху.

На черный или элементарный углерод приходится большая часть света, поглощаемого атмосферными аэрозолями, поэтому он имеет решающее значение для прямого радиационного воздействия аэрозолей на климат. Концентрация элементарного углерода в твердых частицах на 50 % выше в пробах в городском воздухе, отобранном вблизи крупной транспортной развязки, и на 30 % в сельском и высокогорном воздухе, демонстрируя сильное влияние дизельной сажи и других видов ископаемого топлива и др.

Высокое содержание органических частиц в воздухе несет опасность для организма человека. Первоначальными источниками таких частиц в атмосферном воздухе являются природные явления (лесные пожары), антропогенное сжигание ископаемых видов топлива (отопление жилых помещений в секторе ЖКХ, промышленные выбросы, транспорт), испарение вод с растворенными органическими соединениями, растительные и животные остатки, микроорганизмы.

Органические вещества могут образовываться в результате химических реакций в атмосфере. Формирование частиц с новым химическим составом показывает зависимость нелинейного характера от состава атмосферы и метеорологических условий, может подвергаться влиянию ионов и эффектов электрического заряда [9]. Существует несколько главных параметров, которые определяют образование вторичных частиц: относительная влажность и концентрации органических и неорганических частиц и конденсирующихся паров, которые зависят от характера и скорости конвективных атмосферных потоков, а также от наличия местных источников и поглотителей (облака, водоемы).

Протекающие реакции на поверхности и в объеме жидких и твердых аэрозольных частиц оказывают влияние на химический состав, оптические свойства атмосферного воздуха [10]. Например, химический состав аэрозоля приводит к образованию активных форм галогена, изменениям в активных соединениях азота и истощению озона, особенно в стратосфере. С другой стороны, химическое старение аэрозольных частиц обычно изменяет их состав, снижает их реакционную способность, увеличивает их гигроскопичность и активность по конденсации облаков, а также может изменять их оптические свойства. Из-за высокого отношения поверхности к объему мелкие аэрозольные частицы могут быть очень быстро преобразованы при взаимодействии с солнечным излучением (фотолиз) и реакционноспособными остаточными газами (окисление, нитрование, кислотно-основные реакции, гидролиз, конденсация насыщения или инициируемая радикалами олигомеризация и т. д.).

Взаимодействие частиц аэрозоля с водой может привести к структурным перестройкам, например, к образованию капель высококонцентрированного водного раствора (явление «кислотных дождей»). Эти взаимодействия очень многообразны, подчиняются законам массопереноса, фазовых переходов и кинетики химических реакций на границе раздела или в объеме газовой, жидкой и твердой фаз. Смоделировать адекватные реальности математическим описанием не представляется возможным, реально только построение причинно-следственных модельных связей.

Частично окисленная органика может действовать как поверхностно-активные вещества и влиять на рост гигроскопичности и активацию аэрозольных частиц. Химическая реакционная способность углеродсодержащих аэрозольных компонентов также играет важную роль в технических приложениях для контроля выбросов аэрозоля при горении. Например, снижение предельных значений выбросов сажи и связанных с ней твердых частиц в выхлопных газах дизельных двигателей требует разработки и внедрения эффективных технологий их очистки. Молекулы водяного пара взаимодействуют с аэрозольными частицами, могут адсорбироваться на поверхности частиц или впитываться в основную массу частиц. Для гигроскопичных частиц поглощение водяного пара может привести к образованию крупных капель, вызвать конденсацию и образование облаков.

Современные технические решения очистки аэрозольных выбросов промышленности

Разработка и внедрение новых способов очистки промышленных газов, а также совершенствование основного оборудования, реализующего процесс очистки и нейтрализации опасных примесей, направлены на выполнение предельно допустимых норм по газообразным выбросам.

В основу методов очистки и нейтрализации промышленных отходящих газов легли массообменные процессы, такие как адсорбционные, абсорбционные и десорбционные процессы, хемосорбция, термическая нейтрализация.

Адсорбционная очистка газов реализуется в адсорберах, которые по способу организации можно разделить на адсорберы периодического или непрерывного типа. По виду движения твердого поглотителя, т. е. адсорбента, адсорберы можно разделить на три класса: адсорберы с движущимся слоем адсорбента (гиперсорберы), с псевдооживленным (кипящим) и стационарным (неподвижным) слоем адсорбента. Самое широкое распространение на практике получили аппараты с неподвижным слоем, т. к. их преимуществом является простота как в конструктивном, так и в технологическом плане. Модификации конструкций адсорбционного оборудования различны (рис. 2).

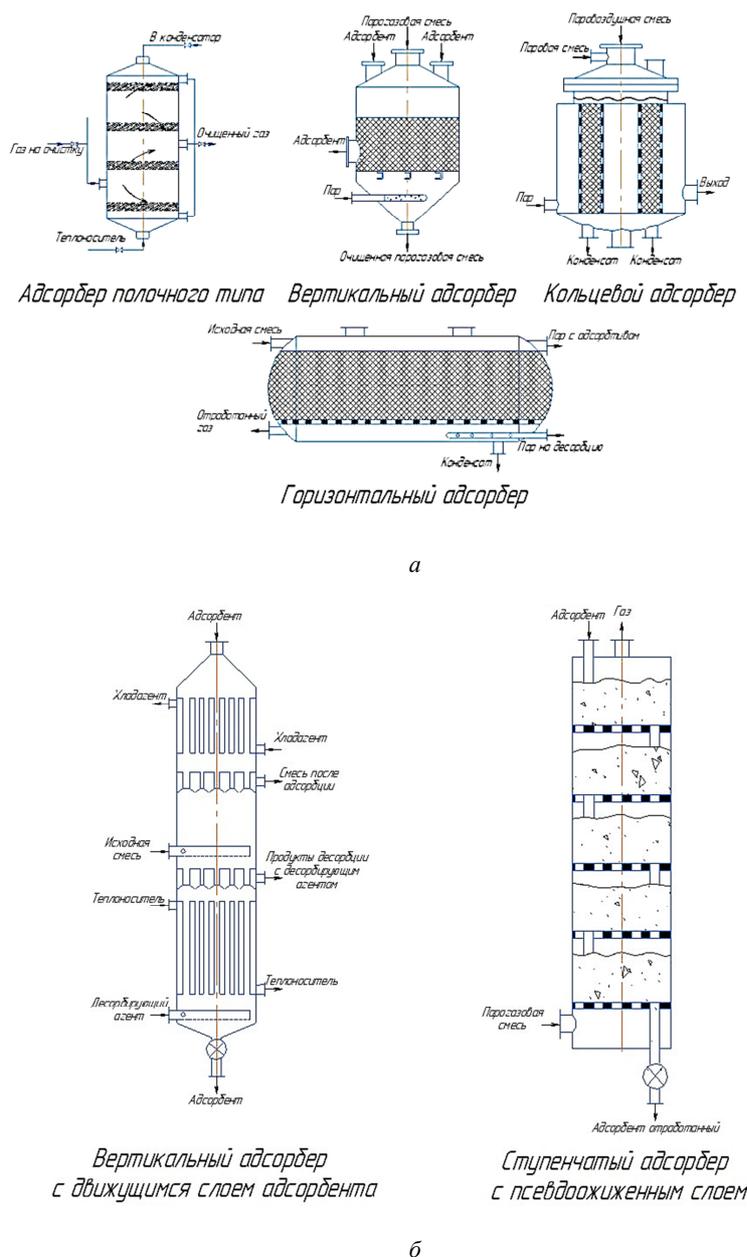


Рис. 2. Адсорбционное оборудование для очистки газов:
а – адсорберы периодического действия с неподвижным слоем адсорбента;
б – адсорберы непрерывного действия с движущимся слоем адсорбента

Fig. 2. Adsorption equipment for gas purification:
а – periodic adsorbers with a fixed adsorbent layer; б – continuous adsorbers with a moving adsorbent layer

Повышение эффективности адсорбционных процессов направлено на ряд пунктов.

1. Поддержание равномерности поля концентраций извлекаемого одного или нескольких компонентов в слое адсорбента при помощи механического воздействия на слой или физическим воздействием на сплошную или дисперсную фазу системы. Примером механического воздействия на поверхность массообмена является работа [11], в которой авторы

исследуют методы интенсификации адсорбционного процесса с применением адсорберов с перемешивающими устройствами. Предложен метод реализации подобной интенсификаций через создание активной гидродинамической обстановки в рабочей зоне массопереноса аппарата (за счет работы с высокими скоростями рабочего потока для достижения турбулентного перемешивания). Использование ультразвука в адсорбции является примером физического

воздействия, так, в работе [12] рассмотрено и определено, что при ультразвуковом воздействии на процесс сорбции наблюдается значительное сокращение времени процесса. Параметры работы с ультразвуком рассмотрены в [13], например, используя более высокую частоту можно применять гораздо меньшую мощность для получения того же эффекта, что и при использовании более низких частот.

2. Правильный подбор технологических параметров ведения процесса. С применением математического моделирования исследуемого процесса возможна корректная оптимизация режима адсорбции газовых смесей. Авторы [14] определили оптимальные условия протекания процесса для адсорбции трехкомпонентной газовой смеси ($H_2S/NO_2/CO_2$). В [15] предложена модернизированная технологи-

ческая схема процесса осушки газа, в основу которой легло применение трехступенчатой регенерации при температурах 90, 210 и 350 °С, поддержании температуры газа не выше 25 °С на входе в адсорбционный аппарат для эффективного удаления из газа сероводорода, сероокиси углерода, меркаптанов и влаги.

3. Совершенствование структуры сорбента. Работы [16, 17] направлены на оптимизации пористой структуры, прочности и других свойств сорбента.

Один из методов конструктивного совершенствования адсорберов – это секционирование адсорбента в аппарате для наиболее эффективной работы адсорбционного слоя [18]. Примеры разделения на секции представлены на рис. 3.

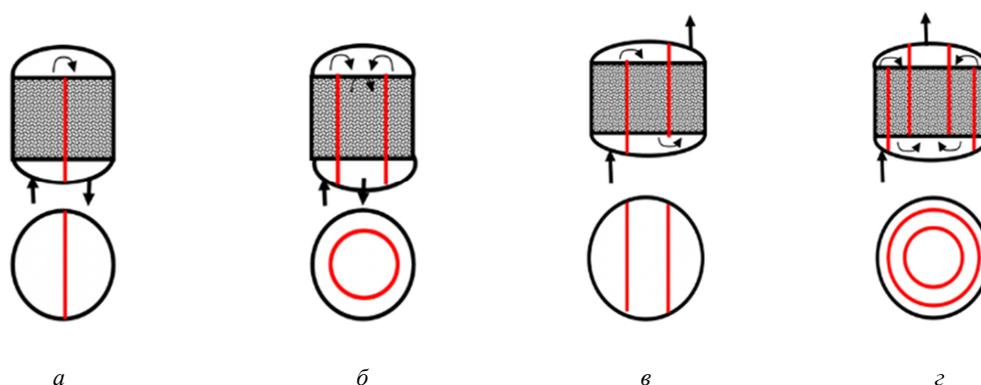


Рис. 3. Схемы двухсекционного адсорбера (а, б), трехсекционного адсорбера (в, г) с перегородками пластинчатого типа (а, в) и коаксиальными перегородками (г) [18]

Fig. 3. Diagrams of a two-section adsorber (a, б), a three-section adsorber (в, г) with plate-type partitions (a, в) and coaxial partitions (г) [18]

Секционирование адсорбционного пространства достаточно перспективно для любых вариантов реализации адсорбционного процесса в химической технологии [18, 19].

Принцип метода термической нейтрализации базируется на возможности токсичных примесей с легкой окислительной способностью (легкоокисляемые) окисляться до менее токсичных соединений, процесс реализуется в присутствии кислорода и под воздействием высоких температур [20]. Термическая нейтрализация показывает высокую эффективность при работе со средами с высокими концентрациями вредных компонентов в присутствии органических соединений, но содержание галогенов, серы и фосфора в составе очищаемой среды запрещено. При окислении наблюдается образование компонентов с более высокой токсичностью по сравнению с первоначальным составом очищаемой среды. Достоинством метода является простота и универсальность оборудования.

В промышленности распространенными схемами

термической нейтрализации считаются: прямое сжигание в пламени, термическое окисление и каталитическое сжигание. Подбор схемы производят по параметрам рабочей среды (температуры, количества выбросов, вредных примесей, содержания кислорода и др.). Дополнительная подача воздуха в рабочую зону реактора производится для нейтрализации газовой смеси с примесями, для удаления которых нужен высокотемпературный режим в камере. При недостижении нужных температур сгорания производится также дополнительная подача высококалорийного газа (например, природного). Следует отметить, что концентрация кислорода в камере должна быть не менее 17 % при работе в любом режиме.

Термические установки [21], работающие по методу прямого сжигания в пламени, довольно часто проектируют комбинированными (термическое и каталитическое обезвреживание). Типовое оборудование данного метода показано на рис. 4.

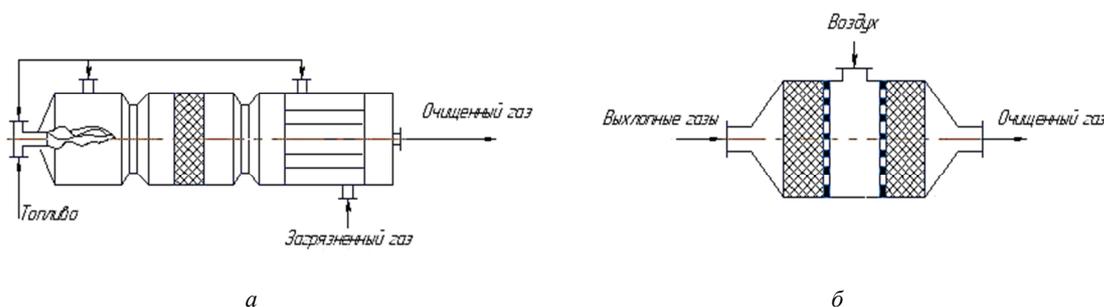


Рис. 4. Типовое оборудование термической нейтрализации газовых смесей:
а – термокаталитический реактор; б – двухступенчатый каталитический нейтрализатор

Fig. 4. Typical equipment for thermal neutralization of gas mixtures:
a – thermocatalytic reactor; б – two-stage catalytic converter

В основном при работе аппаратов прямого сжигания или термического, или каталитического окисления главным фактором, определяющим значение, имеет интенсивность смешения в реакторах потоков, поэтому интенсификация основного процесса идет по этому пути.

Для полного смешения потоков и создания реакционной зоны обезвреживания могут быть использованы турбулизирующие решетки, закрутка потоков и другие устройства, обеспечивающие требуемую организацию смешения газовых потоков. В [22] авторы рассмотрели различные виды движения газовых потоков с применением горелок в аппарате и был сделан вывод о реализации в реакторе комбинированной модели идеального смешения-вытеснения.

Еще одним способом повышения эффективности термического обезвреживания газообразных отходов является применение огневых устройств, базирующихся на применение пульсации при горении (пульсирующее горение). В [23] было определено повышение скорости химической реакции и соответственно степень очистки газа при пульсирующем горении. В ходе ряда экспериментов авторы определили, что при работе с низкоконтрированными газообразными выбросами большей эффективностью обладают устройства именно с применением пульсации.

В основу каталитического метода [20] лежит применение катализатора (металлы или их оксиды) для нейтрализации вредных примесей в газе с получением промежуточного вещества, распадающегося с образованием продукта регенерированного катализатора. Стоит отметить, что процесс реализуется при высоких объемных скоростях газовых потоков и взаимодействии удаляемых веществ с одним из компонентов, находящихся в очищаемом газе, или со специально добавленным в смесь веществом.

По сравнению с термическим окислением каталитическое производится за более короткий период времени, тем самым оборудование более компактное

и менее габаритное. Кроме того, каталитическая нейтрализация используется для более глубокой очистки газообразных выбросов. Особенностью данного типа процессов является их работа со смесями с малой концентрацией примесей. Оборудованием, реализующим процесс каталитической газоочистки, являются реакторы с неподвижным каталитическим слоем. Рекомендованное содержание доли твердых инертных компонентов в сырье не более $1,5 \text{ мг/м}^3$, в противном случае поры катализатора забиваются, что приводит к дезактивации катализатора.

Основным направлением при увеличении степени или эффективности процесса каталитической газоочистки является поиск, выбор и повышения свойств катализаторов [24]. Например, одним из распространенных загрязнителей воздуха является аммиак, для его нейтрализации при средних и высоких концентрациях (более 1 об. %) в выбросах рационально применение абсорбционной очистки (мокрого метода), для очистки смеси при малых концентрациях вещества (менее 1 об. %) рекомендовано применение окисление аммиака на катализаторе.

При реализации абсорбционной очистки газовая или парогазовая смесь взаимодействует и контактирует с жидким поглотителем (абсорбентом), происходит перенос вещества из газовой фазы в жидкую. Как правило, граница раздела фаз представляет собой либо зеркало жидкости (поверхностные абсорберы) или поверхность пленки жидкости, стекающей по поверхности (пленочные абсорберы), или насадке (насадочные абсорберы), либо поверхность проходящих через жидкость пузырьков газа (барботажные абсорберы) (например, тарельчатые и др.), либо поверхность капель жидкости (распыливающие абсорберы) [25].

В настоящее время для очистки газовых выбросов от твердых и газовых загрязняющих веществ широкое распространение получили аппараты распылительного типа, в которых реализуется принцип взаимодействия газового потока с каплями жидкости. В качестве примера можно привести

скрубберы Вентури, которые представляют собой прямоточные аппараты распылительного типа. Промышленные абсорбционные установки чаще всего применяются для извлечения ценного компонента из очищаемого газа (концентрация извлекаемого компонента более 1 %), а также для санитарной очистки газа от опасных соединений [20].

Проведя аналитический обзор основных методов очистки (абсорбционных, адсорбционных, каталитических и термических) можно сделать вывод о том, что для осуществления комплексной очистки газа наиболее приемлем абсорбционный (мокрый) способ. Мокрая очистка не требует дополнительной подготовки газов и применения дорогостоящих катализаторов или адсорбентов, позволяет одновременно проводить очистку от газовых выбросов и дисперсных частиц при оптимальном температурном режиме.

Среди рассмотренных способов абсорбция является хорошо налаженным способом с высоким уровнем технической реализации. Абсорбция как основной технологический процесс занимает прочное положение в промышленной очистке газов, новые области применения (например, для целей декарбонизации) делают ее привлекательной для дальнейшего усовершенствования. Целью всех современных разработок является максимизация эффективности разделения при оптимальном перепаде давления, определяющем энергозатраты. Учитывая рост цен на материалы, особенно на металлы, экономической проблемой также является минимизация массы материала на объем колонны при условии достижения желаемой эффективности разделения, использование более дешевых материалов (пластики). Ключевой проблемой промышленного применения новых типов внутренних устройств является не только оптимизированные характеристики, показанные в лабораторных или

технических испытаниях, но и предоставление потребителям испытаний, касающихся динамики жидкости и массообмена. Эти данные должны быть доступны для широкого диапазона нагрузок по жидкости и газу в реальных, но сопоставимых с промышленными, условиях. Необходимо проведение масштабных научных исследований, основанных, прежде всего, на данных мониторинга загрязняющих окружающую среду объектов с четко поставленными целями и сформулированными задачами.

Заключение

Антропогенные выбросы являются основными источниками атмосферных аэрозолей. В частности, выбросы твердых частиц и газов при сжигании биомассы и ископаемого топлива значительно возросли с доиндустриальных времен и составляют значительную долю мелкодисперсных частиц в воздухе в загрязненной городской среде, а также в глобальной атмосфере (углеродистые компоненты, сульфаты и т. д.). Многочисленные исследования показали, что как природные, так и антропогенные аэрозоли оказывают сильное воздействие на климат и здоровье человека. Однако из-за ограниченных знаний об источниках аэрозолей, составе, свойствах и процессах, описанных выше, фактическое воздействие аэрозолей на климат и здоровье все еще далеко от полного понимания и тем более эффективного решения. Промышленные выбросы имеют предсказуемый состав, к тому же химические предприятия обладают на данный момент всем арсеналом инженерных знаний для осуществления их эффективной очистки. Чтобы снизить антропогенную нагрузку на атмосферу, хотя бы за счет снижения доли промышленных выбросов, необходимо более активно внедрять в производство эффективные методы их очистки.

Список источников

1. Finlayson-Pitts B. J., Pitts J. N. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere // Academic Press. 2000. P. 969. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-257060-5.50027-7>.
2. Юзбеков А. К., Юзбеков М. А. Влияние техногенного загрязнения атмосферы на заболеваемость органов дыхания // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 16. 2015. № 1. С. 19–24.
3. Рыбаков Д. С. Выбросы загрязняющих веществ как региональный фактор изменения показателей смертности // Уч. зап. Петрозавод. гос. ун-та. 2014. № 2 (139). С. 65–69.
4. Макоско А. А., Матешева А. В. О тенденциях распространности экологически обусловленных заболеваний вследствие техногенного загрязнения атмосферы // Инновации. 2012. № 10 (168). С. 98–105.
5. Евдакова А. А., Гелев А. А. Анализ причин смертности населения и источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух Красноярского края // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 1. С. 922–924.
6. Куркатов С. В., Тихонова И. В., Иванова О. Ю. Оценка риска воздействия атмосферных загрязнений на здоровье населения г. Норильска // Гигиена и санитария. 2015. № 2. С. 28–30.
7. de Reus W. M., Krejci R., Fischer H., Ström J. Application of the variability-size relationship to atmospheric aerosol studies: estimating aerosol lifetimes and ages // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 2002. N. 2 (1). Pp. 133–145.
8. Krejci R., Ström J., de Reus M., Fischer W. J., H., M. O. Andreae et al. Spatial and temporal distribution of atmospheric aerosols in the lowermost troposphere over the Amazonian tropical rainforest // Atmospheric Chemistry and Physics. 2005. N. 5. Pp. 1527–1543.
9. Laakso L., Anttila T., Lehtinen K. E. J., Aalto P. P., Kulmala M., Hörrak U., Paatero J., Hanke M., Arnold, F. Kinetic nucleation and ions in boreal forest particle formation events // Atmospheric Chemistry and Physics. 2004. Pp. 2353–2366. <https://doi.org/10.5194/acp-4-2353-2004>.

10. Schkolnik G., Falkovich A.H., Rudich Y., Maenhaut W., Artaxo P. New analytical method for the determination of levoglucosan, polyhydroxy compounds, and 2-methylerythritol and its application to smoke and rainwater samples // *Environ Sci Technol*. 2005. N. 39 (8). Pp. 2744–2752. DOI: 10.1021/es048363c.
11. Бузетти К. Д., Иванов М. В. Интенсификация процесса периодической адсорбции в аппаратах с интенсивным перемешиванием // *Дельта науки*. 2019. № 1. С. 6–10.
12. Шарапова А. В. Применение ультразвука для интенсификации сорбционной очистки сточных вод // *Вестн. ННГУ*. 2013. № 1 (1). С. 109–111.
13. Breitbach M., Bathen D. Influence of ultrasound on adsorption processes // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2001. Vol. 8, Iss. 3. Pp. 277–283. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(01\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(01)00089-X).
14. Юсубов Ф. В., Байрамова А. С. Оптимизация процесса адсорбции газовых смесей // *European science*. 2017. № 9 (31). С. 11–14.
15. Искалиева С. К. Совершенствование технологии процесса адсорбционной осушки обесеренного газа: дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2012. 179 с.
16. Нистратов А. В., Клушин В. Н., Самодуров В. М. Оптимизация пористой структуры и прочности углеродных адсорбентов на основе торфа и полимерных отходов // *Успехи в химии и химической технологии*. 2011. Т. 25, № 10 (126). С. 11–15.
17. Пат. РФ 2331471 С1. Способ модификации адсорбентов со слоистой структурой / Прибылов А. А., Калининкова И. А. № 2007109301/15; заявл. 14.03.2007; опубл. 20.08.2008.
18. Самойлов Н. Интенсификация процесса адсорбции за счет секционирования объема адсорберов // *Industrial Processes and Technologies*. 2023. Т. 3, № 1 (8). С. 24–38. [https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-1\(8\)-24-38](https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-24-38).
19. Титова Л. М., Наурзалиева Д. З. Совершенствование конструкции насадочных аппаратов за счет равномерного распределения газового потока // *Нефтегаз. технологии и эколог. безопасность*. 2023. № 4. С. 54–61. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-4-54-61>.
20. Пронин В. А., Мамченко В. О., Долговская О. В., Цветков В. А. Очистка и дезодорация газовоздушных выбросов. СПб.: Ун-т ИТМО, 2022. 156 с.
21. Пикалов Е. С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Физико-химические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2016. 86 с.
22. Протопопов Р. Я., Шаповров В. П., Филенко О. Н. О моделировании реакторов для термической нейтрализации органических примесей // *Вост.-Европ. журн. передовых технологий*. 2012. Т. 2, № 12 (56). С. 22–26.
23. Новосельцева Д. В. Установка для обезвреживания газовых и вентиляционных выбросов объектов промышленности // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф: Строительство. Приклад. науки*. 2014. № 8. С. 95–98.
24. Говоруха Е. Р., Винникова С. А., Петров А. Ю. и др. Финишная каталитическая очистка отходящих газов от аммиака // *Успехи в химии и химической технологии*. 2017. Т. 31, № 6 (187). С. 90–92.
25. Биргер Е. В., Лебедев В. В., Зизюк А. П., Иванова Е. В. Проектирование абсорберов для очистки воздуха от газо- и парообразных примесей // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2016. Т. 8, № 2. С. 1–22. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN216.pdf> (дата обращения: 02.09.2024). DOI: 10.15862/04TVN216.

References

1. Finlayson-Pitts B. J., Pitts J. N. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere. *Academic Press*, 2000, p. 969. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-257060-5.50027-7>.
2. Juzbekov A. K., Juzbekov M. A. Vliyanie tehnogen-nogo zagryaznenija atmosfery na zabolevaemost' organov dyhanija [The effect of man-made atmospheric pollution on respiratory morbidity]. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Serija 16*, 2015, no. 1. pp. 19-24.
3. Rybakov D. S. Vybrosoy zagryaznjajushhih veshhestv kak regional'nyj faktor izmenenija pokazatelej smertnosti [Emissions of pollutants as a regional factor of changes in death rates-news]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 2 (139), pp. 65-69.
4. Makosko A. A., Matesheva A. V. O tendencijah rasprostranennosti jekologicheski obuslovlennyh zabolevanij vsledstvie tehnogen-nogo zagryaznenija atmosfery [Trends in the prevalence of environmentally caused diseases due to man-made atmospheric pollution]. *Innovacii*, 2012, no. 10 (168), pp. 98-105.
5. Evdakova A. A., Gelev A. A. Analiz prichin smertnosti naselenija i istochnikov vybrosov zagryaznjajushhih veshhestv v atmosferyj vozduh Krasnojarskogo kraja [Analysis of the causes of mortality of the population and sources of emissions of pollutants into the atmospheric air of the Krasnojarsk Territory]. *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki*, 2016, vol. 1, pp. 922-924.
6. Kurkatov S. V., Tihonova I. V., Ivanova O. Ju. Ocenka riska vozdejstvija atmosferyh zagryaznenij na zdorov'e naselenija g. Noril'ska [Assessment of the risk of exposure to atmospheric pollution on the health of the population of Noril'sk]. *Gigiena i sanitarija*, 2015, no. 2, pp. 28-30.
7. de Reus W. M., Krejci R., Fischer H., Ström J. Application of the variability-size relationship to atmospheric aerosol studies: estimating aerosol lifetimes and ages. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2002, no. 2 (1), pp. 133-145.
8. Krejci R., Ström J., de Reus M., Fischer W. J., H., M. O. Andreae et al. Spatial and temporal distribution of atmospheric aerosols in the lowermost troposphere over the Amazonian tropical rainforest. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, no. 5, pp. 1527-1543.
9. Laakso L., Anttila T., Lehtinen K. E. J., Aalto P. P., Kulmala M., Hörrak U., Paatero J., Hanke M., Arnold, F. Kinetic nucleation and ions in boreal forest particle formation events. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2004, pp. 2353-2366. <https://doi.org/10.5194/acp-4-2353-2004>.
10. Schkolnik G., Falkovich A.H., Rudich Y., Maenhaut W., Artaxo P. New analytical method for the determination of levoglucosan, polyhydroxy compounds, and 2-methylerythritol and its application to smoke and rainwater samples. *Environ Sci Technol*, 2005, no. 39 (8), pp. 2744-2752. DOI: 10.1021/es048363c.
11. Buzetti K. D., Ivanov M. V. Intensifikacija processa periodicheskoj adsorbicii v apparatah s intensivnym peremeshivaniem [Intensification of the periodic adsorption process in devices with intensive mixing]. *Del'ta nauki*, 2019, no. 1, pp. 6-10.
12. Sharapova A. V. Primenenie ul'trazvuka dlja intensifikacii sorbcionnoj oclistki stochnyh vod [The use of ultra-

sound for the intensification of sorption wastewater treatment]. *Vestnik NNGU*, 2013, no. 1 (1), pp. 109-111.

13. Breitbart M., Bathen D. Influence of ultrasound on adsorption processes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2001, vol. 8, iss. 3, pp. 277-283. [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(01\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(01)00089-X).

14. Jusubov F. V., Bajramova A. S. Optimizacija procesa adsorpcii gazovih smesej [Optimization of the adsorption process of gas mixtures]. *European science*, 2017, no. 9 (31), pp. 11-14.

15. Iskalieva S. K. *Sovershenstvovanie tehnologii processa adsorbciionnoj osushki obesserennogo gaza: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk* [Improving the technology of the desulfurized gas adsorption drying process: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. Astrahan', 2012. 179 p.

16. Nistratov A. V., Klushin V. N., Samodurov V. M. Optimizacija poristoj struktury i prochnosti uglerodnyh adsorbentov na osnove torfa i polimernyh othodov [Optimization of the porous structure and strength of carbon adsorbents based on peat and polymer waste]. *Uspehi v himii i himicheskoi tehnologii*, 2011, vol. 25, no. 10 (126), pp. 11-15.

17. Pribylov A. A., Kalinnikova I. A. *Sposob modifikacii adsorbentov so sloistoj strukturoj* [A method for modifying adsorbents with a layered structure]. Patent RF 2331471 C, no. 2007109301/15, 20.08.2008.

18. Samojlov N. Intensifikacija processa adsorpcii za schet sekcionirovanija ob'ema adsorberov [Intensification of the adsorption process by partitioning the volume of adsorbents]. *Industrial Processes and Technologies*, 2023, vol. 3, no. 1 (8), pp. 24-38. [https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-1\(8\)-24-38](https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-1(8)-24-38).

19. Titova L. M., Naurzgalieva D. Z. Sovershenstvovanie konstrukcii nasadochnyh apparatov za schet ravnomernogo raspredelenija gazovogo potoka [Improving the design of the nozzles due to the uniform distribution of the gas flow]. *Nefte-*

gazovye tehnologii i jekologicheskaja bezopasnost', 2023, no. 4, pp. 54-61. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-4-54-61>.

20. Pronin V. A., Mamchenko V. O., Dolgovskaja O. V., Cvetkov V. A. *Ochistka i dezodoracija gazovozdushnyh vybrosov* [Cleaning and deodorization of air-gas emissions]. Saint Petersburg, Universitet ITMO, 2022. 156 p.

21. Pikalov E. S. *Processy i apparaty zashhity okruzhajushhej sredy. Fiziko-himicheskie metody ochistki promyshlennyyh vybrosov v atmosferu i gidrosferu* [Environmental protection processes and devices. Physico-chemical methods of purification of industrial emissions into the atmosphere and hydrosphere]. Vladimir, Izd-vo VIGU, 2016. 86 p.

22. Protopopov R. Ja., Shaporev V. P., Filenko O. N. O modelirovanii reaktorov dlja termicheskoi nejtralizacii organicheskikh primesej [On modeling reactors for thermal neutralization of organic impurities]. *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 2012, vol. 2, no. 12 (56), pp. 22-26.

23. Novosel'ceva D. V. Ustanovka dlja obezvezhivaniya gazovyh i ventiljacionnyh vybrosov ob'ektov promyshlennosti [Installation for neutralization of gas and ventilation emissions from industrial facilities]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Serija F: Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, 2014, no. 8, pp. 95-98.

24. Govoruha E. R., Vinnikova S. A., Petrov A. Ju. i dr. Finishnaja kataliticheskaja ochistka othodjashhih gazov ot ammiaka [Final catalytic purification of exhaust gases from ammonia]. *Uspehi v himii i himicheskoi tehnologii*, 2017, vol. 31, no. 6 (187), pp. 90-92.

25. Birger E. V., Lebedev V. V., Zizjuk A. P., Ivanova E. V. Proektirovanie absorberov dlja ochistki vozduha ot gazo- i pa roobraznyh primesej [Design of absorbers for air purification from gas and vapor impurities]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 1-22. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN216.pdf> (accessed: 02.09.2024). DOI: 10.15862/04TVN216.

Статья поступила в редакцию 05.08.2024; одобрена после рецензирования 06.09.2024; принята к публикации 24.09.2024
The article was submitted 05.08.2024; approved after reviewing 06.09.2024; accepted for publication 24.09.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Любовь Михайловна Титова – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; titovalybov@mail.ru

Светлана Алексеевна Свирина – кандидат технических наук; ассистент кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; svetlanasv97@yandex.ru

Гурий Алексеевич Кушнер – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой электрооборудования и автоматизации судов; Астраханский государственный технический университет; guriy.kushner@mail.ru

Lyubov M. Titova – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; titovalybov@mail.ru

Svetlana A. Svirina – Candidate of Technical Sciences; Lecturer of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; svetlanasv97@yandex.ru

Guriy A. Kushner – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Electrical Equipment and Automation of Ships; Astrakhan State Technical University; guriy.kushner@mail.ru

