

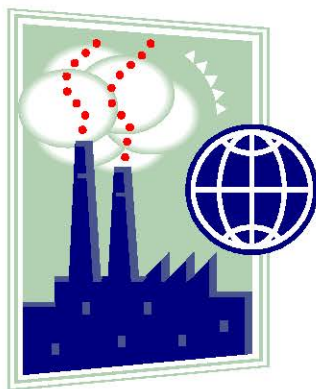
Министерство образования и науки  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Казанский национальный исследовательский технологический  
университет»

А. А. Мухутдинов, С. В. Степанова, О. А. Сольяшинова

# **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ГАЗОВ**

(лабораторный практикум)  
Учебное пособие



Казань  
КНИТУ  
2012

Министерство образования и науки  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Казанский национальный исследовательский технологический университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ  
ГАЗОВ**

(лабораторный практикум)  
учебное пособие

Казань  
КНИТУ  
2012

УДК 66.074  
ББК 6П7.1:57 (069)

**Мухутдинов, А. А.**

Физико-химические методы очистки газов (лабораторный практикум) / А. А. Мухутдинов, С. В. Степанова, О. А. Сольяшинова. - Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. – 140 с.

ISBN 978-5-7882-1254-8

Рассмотрены принципы разработки и создания лабораторных газоочистных установок, основы приготовления газовых смесей, измерения расхода, анализа и очистки газов в лабораторных условиях и математических методов обработки экспериментальных данных.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 280201 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» и 280200-05 «Утилизация и переработка отходов производства и потребления».

Подготовлено на кафедре «Инженерная экология».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского национального исследовательского технологического университета.

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент КГАСУ  
канд. физ.-мат. наук, доцент КГЭУ

*Т.Ю. Горская*  
*В.Е. Леонтьев*

ISBN 978-5-7882-1254-8

© Мухутдинов А.А., Степанова С.В., Сольяшинова О.А., 2012

© Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2012

## **ВВЕДЕНИЕ**

Изучение принципов разработки и создания лабораторных газоочистных установок и экспериментальные исследования процессов очистки газов представляют большое значение при разработке и усовершенствовании технических средств защиты атмосферы от вредных воздействий.

В учебном пособии описаны основные принципы разработки отдельных блоков лабораторных газоочистных установок, подробные сведения о составных элементах этих блоков. Приведены описания лабораторных работ, посвященных изучению основных характеристик расходомеров и дросселирующих устройств, абсорбционных и адсорбционных установок по очистке газов. Все это дает возможность ознакомиться с типовыми процессами газоочистки и последовательностью разработки и создания газоочистных установок в лабораторных условиях. Каждая работа представлена как небольшое исследование. Поэтому перед ее выполнением студенту необходимо изучить соответствующий теоретический раздел, решить задачи и ответить на вопросы.

При выполнении работ обращается особое внимание на простые и точные способы измерения, стабилизацию и дозированию газовых потоков, которые почти не требуют сложного оборудования, но, тем не менее, дают максимальную возможность для развития самостоятельности в овладении основами экспериментальной техники. С этой же целью в пособие включены вопросы и задачи, ориентированные на правильный выбор и понимание студентом условий эксперимента, физико-химических методов, оценку точности результатов измерений, а также на использование этих результатов в практических расчетах.

Большое внимание в учебном пособии уделяется математической обработке экспериментальных данных с применением современной вычислительной техники. Приведены основные сведения о физическом моделировании и получении уравнений регрессии, показана последовательность проведения регрессионного анализа.

Основой для написания учебного пособия является многолетний опыт проведения лабораторных работ по очистке газов на кафедре инженерной экологии КНИТУ.

## **ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ЛАБОРАТОРНЫХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ**

Физико-химические процессы очистки газовых потоков предназначены для удаления из них тех или иных компонентов (примесей), имеющих сравнительно небольшую концентрацию (десятые или сотые доли процента). Если газовый поток после очистки выбрасывается в атмосферу, то процесс называется санитарной очисткой. В тех случаях, когда газовый поток после удаления примесей используется для производства других продуктов (например, аммиака, серной кислоты, синтетических каучуков) или как топливо (природный газ), то процесс называется технологической очисткой газов. Примеры санитарной и технологической очистки газовых потоков подробно описаны в соответствующих учебных пособиях и настоящей работе не рассматриваются.

В лабораторных условиях непосредственное использование газовых выбросов промышленных предприятий затруднено и поэтому при разработке газоочистной установки и изучении процессов очистки газов прибегают к получению модельных смесей. Такая модельная смесь состоит из воздуха или инертного газа (например, азота) называемых газом-носителем, и примесей, которые характерны для изучаемых промышленных газовых потоков. Обычно примеси могут быть механическими (пыль, летучая зола) или химическими веществами в газообразном и парообразном состоянии (диоксид серы, оксиды азота, аммиак, сероводород и др.).

### **1.1. Блок-схема лабораторной установки для подготовки газовой смеси и ее очистки**

Лабораторная установка, предназначенная для изучения процессов очистки газов, включает следующие стадии: получение стабильного потока газа-носителя и его измерение, дозирование примеси в поток и смешение, определение содержания примеси до и после очистки газового потока. В некоторых случаях возникает необходимость также в кондиционировании газового потока (нагрев или охлаждение, осушка или увлажнение).

#### ***Вспомогательные устройства к газоанализаторам.***

Приведение исходных параметров газовой смеси к значениям, которые должны быть на входе в газоанализатор, называется подготовкой газа к анализу. Подготовка к анализу заключается в изменении

давления и температуры газовой смеси, в очистке ее от механических и агрессивных примесей, осушке и т.п.

Вспомогательные устройства, предназначенные для подготовки газа к анализу, в зависимости от назначения можно разделить на: очистные, охлаждающие, редуцирующие, регуляторы расхода (давления), устройства контроля расхода газа, просасывающие устройства, вентили и т. д. Некоторые технологические процессы при наличии запыленных влажных газов и газов с высокой температурой требуют установки вспомогательных устройств непосредственно в агрегате (газоходе).

Для выбора газоанализатора, подбора вспомогательных устройств и составления газовой схемы необходимо знать:

1) технологический процесс и место отбора газовой смеси (желательна схема процесса);

2) наименование определяемого компонента и предельно возможные минимальная и максимальная концентрации (в процентах по объему в мг/л или в г/м<sup>3</sup>);

3) интервал значений нормальных (рабочих) концентраций (в процентах по объему, мг/л или г/м<sup>3</sup>);

4) полный состав анализируемой газовой смеси и возможные колебания содержания компонентов (в процентах по объему в мг/л или г/м<sup>3</sup>);

5) влагосодержание газовой смеси (в г/м<sup>3</sup>);

6) давление или разрежение газовой смеси и его колебания (в ат или в мм вод ст.);

7) температура газовой смеси и ее изменение (в °С);

8) наличие в газовой смеси агрессивных примесей (в мг/л или г/м<sup>3</sup>);

9) наличие механических примесей (в мг/л или в г/м<sup>3</sup>);

10) допустимое время запаздывания показаний газоанализатора с учетом подводящей линии и вспомогательных устройств.

Наиболее распространенным **отборным устройством**, применяемым, в частности, в случае анализа отходящих газов котлов тепловых электростанций, является керамический фильтр.

Фильтр устанавливается непосредственно в агрегат или газопровод и может применяться при температуре до 500<sup>0</sup> С, содержании пыли в газовой смеси до 20 г/м<sup>3</sup> и расходе газа до 0,8 л/мин (14,4 мл/сек) при длине фильтра l= 200 мм.

При наличии водоохлаждаемой формы керамический фильтр (при длине l=400 мм) может применяться для запыленных газов (до 30

г/м<sup>3</sup>) при температуре в точке отбора 1700° С. При этом следует отметить, что фильтр должен находиться при температуре, исключающей конденсацию влаги, но не более 500 °С.

**Охлаждающие устройства** предназначены для снижения температуры газовой смеси и одновременно для снижения ее влажности с целью увеличения срока службы осушителей. В качестве охлаждающих устройств применяются преимущественно водяные холодильники, конструкция которых определяется входными параметрами газа и условиями эксплуатации.

Температура и влажность газовой смеси могут колебаться в самых широких пределах, что вызывает необходимость в применении различных конструкций холодильников, выполненных в виде теплообменников. Для чистых газов теплообменник обычно выполняется в форме змеевика. Для загрязненных газов рекомендуются прямоточные теплообменники. Имеются конструкции холодильников с гидрозатворами, а также с двумя изолированными газовыми линиями для охлаждения двух потоков газа.

**Очистные устройства** в зависимости от назначения подразделяются на устройства для очистки от твердых частиц, фильтры-осушители и фильтры химические.

Очистка газов от твердых частиц является одной из наиболее трудных задач при непрерывном отборе проб газа. Особенно затруднена очистка влажных газов, так как при этом температура газа должна оставаться более высокой, чем температура конденсации влаги или других веществ, присутствующих в газе. Чрезмерный обогрев может вызвать вторичные реакции на поверхности фильтрующего материала, а, следовательно, и изменение состава анализируемой газовой смеси.

Очистка газов от твердых частиц может производиться различными способами: фильтрацией, промывкой, осаждением в циклонах или электрофильтрах.

Наибольшее распространение получил метод фильтрации газов. Фильтрующими материалами служат: пористая керамика, картон, ткань и вата.

Предварительный фильтр типа ФП предназначен для очистки газовой смеси от пыли при содержании ее до 1 г/м<sup>3</sup>. Фильтр используется при расходах газовой смеси до 10 л/мин (160 м/сек). Наполнителем фильтра является вата.

Фильтр из пористой керамики предназначен для монтажа на трубопроводе. Фильтр используется при расходах до 0,5 л/мин для очистки сухой газовой смеси от пыли при содержании ее до 10 г/м<sup>3</sup>.

Тканевый фильтр предназначен для тонкой очистки газовых смесей. Качество очистки определяется сортом применяемой фильтрующей ткани. Фильтр является одновременно контрольным, так как газовая смесь поступает в фильтр на поверхность ткани.

Тканевый фильтр с развитой поверхностью предназначен для больших расходов порядка 10 л/мин при содержании пыли до 0,05 г/м<sup>3</sup>. Внутри фильтра газ проходит по трубке, а затем через свернутый тканевый мешок.

**Осушка газов** производится с помощью сухих и жидких осушителей. Наиболее широко для осушки газовых смесей применяются хлористый кальций, силикагель марки КСМ и поглотитель типа ОС. Силикагель применяется для осушки газовых смесей, в которых анализируемый компонент не сорбируется силикагелем (например, кислород и водород). Двуокись углерода частично сорбируется силикагелем, в связи с чем применение его в этом случае не может быть рекомендовано, так как инерционность фильтра увеличивается в несколько раз.

При температуре выше 30° С резко снижается срок службы указанных осушителей, в связи с чем в этих случаях необходимо производить охлаждение непосредственно самих фильтров.

Фильтры-осушители могут в газовую схему газоанализатора как самостоятельные узлы или входить в состав так называемых блоков регулировки и фильтрации.

Очистка газовых смесей от агрессивных газов или от газов, мешающих анализу, производится с помощью веществ, способных химически соединяться с этими компонентами. Для удаления сероводорода применяется болотная руда; для удаления двуокиси углерода — химический поглотитель ХПИ (СаО — 96 % и NaOH — 4 %); для удаления хлора при содержании до 2 % — активированный уголь.

Однако большинство активных химических сорбентов не обладает избирательной поглотительной способностью, что в ряде случаев затрудняет их применение.

Очистка газовых смесей от агрессивных и мешающих примесей осуществляется в специальных устройствах — химических фильтрах, имеющих различные размеры и конструкции. Химические фильтры могут включаться в газовую схему газоанализатора как самостоятельные узлы или входить в состав блоков регулировки и фильтрации.

**Редуцирующие устройства** предназначены для снижения давления газовой смеси. В газовых схемах различных газоанализаторов в



зависимости от величины давления газа в технологических системах применяются следующие редуцирующие устройства.

Редуктор ВР-05, серийно выпускаемый промышленностью имеет две ступени снижения давления: от 150 до 15 ат и до рабочего давления 0,2–0,5 ат. В отдельных случаях используется только вторая ступень редуктора.

Мембранный регулятор давления позволяет снизить, входное давление газовой смеси в пределах от 0,9 до 30 ат до рабочего давления  $0,8 \pm 0,1$  ат — на выходе. Для защиты выходной стороны от аварийного повышения давления регулятор имеет предохранительный клапан, срабатывающий при давлении 1,4 ат. Регулятор давления предназначен для работы в газовых смесях, не содержащих агрессивных и механических примесей и сконденсированной влаги.

**Регуляторы расхода** применяются при наличии колебаний давления газовой смеси в технологической системе в целях поддержания расхода в нужных пределах.

Регулятор расхода РР мембранного типа действует следующим образом: газ, проходя через регулятор, создает на мембране перепад давления, воздействующий на жестко связанную с нею тягу. С помощью рычага изменяет зазор между седлом и клапаном, благодаря чему поддерживается постоянство перепада давления на мембране, а, следовательно, и постоянство расхода. Регулятор нашел применение для расходов: 0,5, 1,0, 2,0, 3,5, 15,0 л/мин (240 мл/сек). При изменении давления на входе на  $\pm 25\%$  и прочих равных условиях регулятор может обеспечить постоянство расхода с точностью  $\pm 3-5\%$ . Регулятор в основном предназначен для работы при перепадах давления 0,2 ат. Минимально допускаемый перепад 0,06 ат.

Регулятор расхода РР-4 мембранного типа предназначен для поддержания постоянного расхода при изменении входного давления в более широких пределах от 0,15 до 2 ат, что обеспечивается совершенной рычажной системой и пружиной, рассчитанной на регулирование расходов в узком диапазоне.

Точность поддержания расхода обеспечивается созданием большого перепада давления на мембране за счет применения дросселя. Перепад давления на этом регуляторе должен быть не менее 0,15 ат.

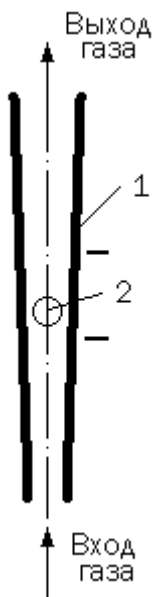


Рис. 1.1. – Схема поплавкового ротаметра: 1 – трубка; 2 – шариковый поплавок

В газовых схемах различных газоанализаторов необходимо контролировать наличие расхода и его величину в диапазоне от 0,3 до 10 л/мин (4,8 до 160 мл/сек).

Для этих целей наиболее широко применяются поплавковые ротаметры — индикаторы расхода.

Схема ротаметра изображена на рисунке 1.1.

Для различных величин расхода, а также для широкого интервала плотностей контролируемых газовых смесей (от 0,08 до 1,78 кг/м<sup>3</sup>) подбираются соответствующие размеры конической трубки ротаметра и шарикового поплавка.

Учитывая, что большинство газоанализаторов допускают довольно широкие пределы колебания расхода, на трубку индикатора расхода наносят две риски, соответствующие нижнему и верхнему пределам допустимого изменения расхода.

**Побудители расхода** предназначены для просасывания газовой смеси через газоанализатор при недостаточном давлении в технологической системе или при работе газоанализатора в замкнутом контуре.

Можно назвать следующие разновидности побудителей расхода: центробежные (вентиляторные), ротационные (пластинчатороторные), электромагнитные (вибрационные) и струйные (водяные или воздушные эжекторы). Наибольшее распространение вследствие своей надежности и лучших технических характеристик по величинам создаваемого расхода и давления получили ротационные побудители расхода.

Побудитель расхода ПР-3 может обеспечивать расход до 25 л/мин (0,4 л/сек) при малом сопротивлении системы. При рабочем расходе 10 л/мин. (0,16 л/сек) разрежение составляет около 300 мм рт. ст.

Существенными элементами вспомогательных устройств газоанализаторов являются **запорные и регулирующие вентили**.

Запорные вентили служат для перекрытия газопроводов. Вентили типов ВЗ-2, ВЗ-2У и ВЗ-3 применяются в системах с избыточным давлением газа до 25 ат и температурой в пределах 10-50° С. Перепад давления на вентиле при расходе 10 л/мин не превышает 100 мм вод. ст.

Вентили регулирующие служат для перекрытия газопроводов и регулирования расхода газа, используются при избыточном давлении газа до 6 ат и температуре 10-50° С. Перепад давления при полностью открытом вентиле и расходе 0,7 л/мин (11,2 мл/сек) не превышает 15 мм вод. ст.

Вентиль ВР-2 обеспечивает перекрытие с помощью запорного клапана, аналогичного клапану в вентиле ВЗ-2. Плавность регулировки расхода обеспечивается только при малых перепадах давления и достигается наличием конического регулирующего клапана.

В соответствии с вышесказанным блок-схема лабораторной установки для подготовки модельной газовой смеси (газ-носитель + примесь), ее очистки и анализа может быть представлена в следующем виде (рис. 1.2.). Рассмотрим каждый блок более подробно.

**Блок подготовки газа-носителя** предназначен для получения заданного объема инертного газа по отношению к примеси с заданной температурой, давлением и влажностью. В состав блока входят: источник газа-носителя (воздуходувка, воздушный компрессор, баллоны со сжатым воздухом или азотом), регуляторы давления, дросселирующие устройства, осушители и увлажнители газа и расходомеры.

**Блок подготовки примеси** предназначен для получения газа-примеси ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и др.). Источниками примеси могут служить баллоны со сжатыми и сжиженными газами, а также лабораторные установки для получения газа-примеси путем проведения соответствующей химической реакции.

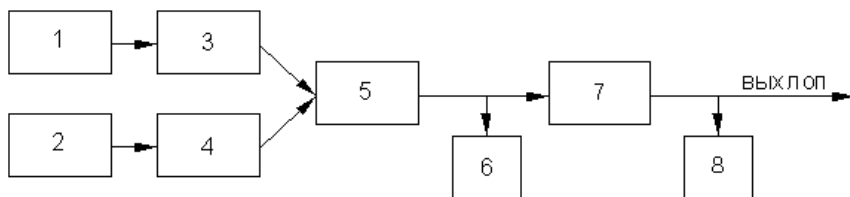


Рис.1.2. - Блок-схема приготовления газовой смеси, ее анализа и очистки: 1 и 2 – вспомогательные устройства; 3 и 4 – блоки подготовки газа-носителя и примеси; 5 – блок приготовления газовой смеси; 6 и 8 – блоки анализа газовой смеси; 7 – блок очистки газовой смеси

**Блок приготовления газовой смеси** обычно представляет собой смеситель в виде стеклянного тройника с достаточным объемом для смешения газа-носителя с примесью за счет их диффузии и конвективного движения.

**Блок очистки газовой смеси** состоит из фильтров, лабораторного абсорбера или адсорбера. Часто эти аппараты соединяются последовательно.

**Блоки анализа газовой смеси** обычно включают газоанализаторы, хроматографы или приборы и установки для определения содержания примеси аналитическим путем. Блоки анализа располагаются до и после очистки газовой смеси.

## 1.2. Стабилизация потока газа

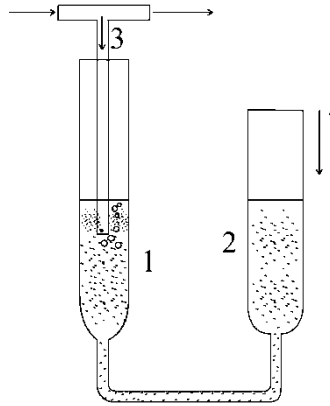
При работе с газовыми потоками, как правило, необходимо поддерживать постоянный расход газа через систему. Если ее сопротивление в ходе опыта неизменно, то задача решается стабилизацией давления газа-носителя. В лабораторной практике находят применение два типа стабилизаторов давления: дроссельные и гидростатические.

Простейшим дросселирующим устройством является стеклянная трубка с внутренним диаметром 0,1-0,6 мм, называемая капилляром. Смягчая кратковременные толчки и удары, она значительно облегчает такие необходимые операции, как калибровка расходомеров, отбор проб для анализа и т.д. Однако капилляры имеют постоянное гидравлическое сопротивление и поэтому они, являясь стабилизирующими элементами, не могут служить регуляторами потока газа.

Ручное регулирование потока газа осуществляется путем использования дросселирующих устройств с переменным сопротивлением: кранов и вентиляей. Широкое распространение получили также мембранные автоматические регуляторы расхода газа.

Маностат с гидростатической трубкой (рис. 1.3) стабилизирует давление за счет сброса части газа в атмосферу.

Рис. 1.3. - Схема маностата: 1 и 2 — цилиндрические трубки с водой; 3 — гидростатическая трубка



В системе с маностатом поддерживается давление, превышающее атмосферное на величину  $\Delta P$ :

$$\Delta P = H \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g , \quad (1.1)$$

где  $H$  – глубина погружения маностатной трубки (необходимая величина  $H$  определяется сопротивлением установки).

Газ сбрасывается через достаточно широкую трубку (6-8 мм) со скоростью 1-5 пузырьков в секунду. При этом струйный режим нежелателен. Верхняя часть маностата может быть шарообразной (100-200 см<sup>3</sup>) для сглаживания переменного давления газового потока.

Главным недостатком описанной конструкции маностата является необходимость сброса части газа в атмосферу, что нежелательно в случае токсичных или ценных газов.

На рис. 1.4 изображена конструкция замкнутого маностата-регулятора, которая исключает сброс газа в атмосферу. Газ, подводящийся по центральной трубке 1, через слой жидкости барботирует в трубку 2, откуда через ловушку 5 поступает в систему. Внутреннее пространство колбы 3 соединено с входом в систему, поэтому при резком увеличении или уменьшении входного давления  $P_1$  происходит автоматическое изменение высоты столба жидкости в трубке 2, что обеспечивает стабильность потока газа.