



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»

Кафедра химической технологии и промышленной экологии

Исследование процесса абсорбции аммиака водой в аппарате барботажного типа

Методические указания к лабораторной работе



Самара 2016

Печатается по решению методического совета нефтетехнологического факультета

УДК 66.08 (076)

ББК 35.11я73

Исследование процесса абсорбции аммиака водой в аппарате барботажного типа: Метод. указ. / Сост. В.В. Филиппов. – Самара, Самар. гос. техн. ун-т, 2014. 34 с.: ил. 6. Издание второе.

Методические указания предназначены для студентов всех форм обучения следующих **направлений бакалавриата:**

- 15.03.02 Технологические машины и оборудование, по курсу – Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии);
- 18.03.01 Химическая технология (по курсу – Процессы и аппараты химической технологии);
- 19.04.01 Биотехнология (по курсу – Процессы и аппараты биотехнологии);
- 19.03.02 Продукты питания из растительного сырья (по курсу – Процессы и аппараты пищевых производств);
- 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии (по курсу – Процессы и аппараты химической технологии);
- и специалитета: 18.05.01 Химическая технология энергонасыщенных материалов и изделий (по курсу – Процессы и аппараты химической технологии).

Составитель канд. хим. наук В.В. Филиппов

Рецензент канд. техн. наук Н.Г. Кац

© В.В. Филиппов, составление, 2014

© Самарский государственный
технический университет, 2014

Введение

Абсорбция и область её применения. Теория процесса

В промышленности довольно часто появляется задача выделения из сложной газовой смеси какого-то компонента. Сделать это можно с помощью процесса абсорбции.

Абсорбция – это процесс избирательного поглощения целевого компонента из газовой смеси специально подобранным жидким поглотителем.

Абсорбция – это массообменный процесс, в ходе которого молекулы целевого компонента совершают довольно сложный переход из газовой фазы в жидкую.

Поглощаемый (целевой) компонент часто называют **абсорбтивом**, а жидкий поглотитель – **абсорбентом**.

Различают **физическую** и **химическую** абсорбцию. При физической абсорбции целевой компонент просто растворяется в жидкости, не вступая с ней в химическую реакцию. При химической же абсорбции, которую ещё называют **хемосорбцией**, поглощаемый компонент реагирует с жидким поглотителем с образованием нового химического соединения.

В промышленности абсорбция применяется, во-первых, как конечная стадия в ряде крупнотоннажных производств. В самом деле, многие минеральные кислоты (HCl , HNO_3 , H_2SO_4), а также, например, гидроксид аммония NH_4OH – это продукты растворения газообразных веществ в воде. Кроме того, абсорбция применяется для извлечения вредных примесей из газовых смесей. Например, в нефтепереработке при производстве топлив необходимо удалить сернистые соединения, присутствие которых в составе бензинов и дизтоплива недопустимо. Для этого проводят гидрирование серни-

стых соединений. В результате они превращаются в сероводород. Затем проводят процесс абсорбции – образовавшийся сероводород поглощают водным раствором моно- или диэтаноламина. Кроме того, абсорбцию применяют для поглощения вредных веществ из газовых выбросов перед поступлением их в атмосферу. В двух последних случаях после поглощения целевого компонента необходимо регенерировать абсорбент. С этой целью проводится обратный процесс – **десорбция**.

Для реализации процесса абсорбции очень важно выбрать такой жидкий поглотитель, в котором целевой компонент растворялся бы возможно лучше. Мы знаем, что, например, азот и кислород очень плохо растворяются в воде¹. Диоксид углерода растворим в воде значительно лучше – всем хорошо известны газированные напитки. Аммиак же является своеобразным рекордсменом – в одном литре воды растворяется до 700 литров аммиака.

При абсорбции происходит переход газа в жидкую фазу, т.е. в конденсированное состояние. На этот процесс сильно влияют температура и давление. Из физической химии известно, что с повышением давления и понижением температуры растворимость газа в жидкости увеличивается. Это нам хорошо известно из простых жизненных ситуаций. Например, если открыть бутылку газированной воды (а с технологической точки зрения газированная вода – это насыщенный углекислым газом абсорбент), то происходит выделение пузырьков углекислоты. Это выделение может быть достаточно спокойным, если бутылка с водой была предварительно охлаждена. Если же вода была тёплой, то выделение газа будет бурным, что может привести к неприятным последствиям в виде намоченной одежды.

¹ Кислород хоть и очень плохо, но всё же растворим в воде. Его присутствие обеспечивает дыхание рыб в водоёмах. При понижении концентрации кислорода наступает замор и гибель рыб.

Так как при абсорбции ставится задача возможно полнее удалить целевой компонент, то, следовательно, его поглощение выгодно проводить при повышенном давлении и пониженной температуре. Если же требуется провести десорбцию, т.е. удалить газ из жидкой фазы, то необходимо сбросить давление (а иногда и создать вакуум) и нагреть жидкость.

Промышленные аппараты, в которых проводится процесс абсорбции, называют **абсорберами**. Внешне они представляют собой довольно высокие цилиндрические колонны (рис. 1). В низ такой колонны подаётся исходный газ, а на верх – чистый абсорбент. В результате с верха колонны отводится очищенный газ, а снизу выводится отработанная жидкость – насыщенный абсорбент.



Рис. 1. Абсорбционные установки для улавливания сероводорода на газоперерабатывающем заводе

Внутреннее устройство колонн может быть различным. Различают аппараты со ступенчатым контактом фаз (**тарельчатые** колонны) и с непрерывным контактом фаз (**насадочные** колонны).

В химических расчётах используются различные способы выражения концентраций: массовые и молярные доли, нормальность, молярность, титр и т.д. Для расчётов процесса абсорбции удобно использовать **относительные концентрации**, которые могут быть как **массовыми**, так и **молярными**.

Относительная концентрация показывает, сколько киломолей (или килограмм) компонента A приходится на один киломоль (или килограмм) компонента B .

Обозначим относительную концентрацию целевого компонента в газовой фазе на входе в аппарат символом Y_n , а на выходе из колонны – Y_k (т.е. начальная и конечная). В состав газового потока входит целевой компонент и инертная часть, которая в процессе не участвует. Эта инертная часть как вошла в колонну, так и вышла из неё. Расход инертной части газового потока обозначим буквой G . В системе СИ единицей измерения расхода будет кг/с или кмоль/с. Например, если из смеси воздуха с аммиаком требуется поглощать аммиак, то Y_n будет относительной концентрацией аммиака в газовой смеси на входе в аппарат (начальная концентрация), а Y_k – относительной концентрацией аммиака на выходе из колонны (конечная концентрация). Расход воздуха, который как вошёл в колонну, так и вышел из неё – это и будет G .

В ходе процесса абсорбции целевой компонент переходит в жидкую фазу (абсорбент). Выразим его содержание в жидкости, как и для газа, в относительных концентрациях (молярных или массовых) и обозначим на входе в колонну через X_n , а на выходе из аппарата X_k . Если в колонну подаётся чистый абсорбент, то $X_n = 0$.

Если же используется регенерированный абсорбент, то X_n будет иметь хоть и очень маленькое значение, но всё же отличное от нуля. Расход жидкого абсорбента обозначим буквой L . В системе СИ единица измерения расхода также будет кг/с или кмоль/с. Если происходит поглощение аммиака водой, то X_n – его относительная концентрация в воде на входе в аппарат (начальная), а X_k – его относительная концентрация в воде после абсорбции (конечная). Расход воды – L .

В ходе процесса идёт переход целевого компонента из газовой фазы в жидкую. Обозначим расход переходящего компонента буквой M . Это могут быть или килограммы в секунду (кг/с), или киломоли в секунду (кмоль/с).

Теперь можно переходить к составлению материального баланса процесса абсорбции. Для этого изобразим потоки, входящие и выходящие в колонну (рис. 2).

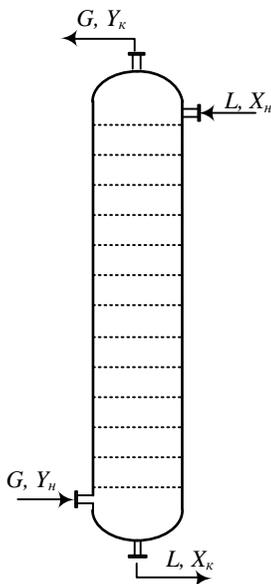


Рис. 2. Материальные потоки процесса абсорбции

В колонну поступает целевой компонент как с газовым потоком (основной вход), так и с абсорбентом (незначительно количество или вообще 0, если $X_n = 0$). Из колонны выходит целевой компонент с очищенным газом (остаточное количество) и с обработанным абсорбентом (основное количество). Входящие и выходящие потоки целевого компонента можно выразить так:

- вход целевого компонента $GY_n + LX_n$;
- выход целевого компонента $GY_k + LX_k$.

Входящее количество компонента должно равняться выходящему – это следует из закона сохранения массы. Т.е.

$$GY_n + LX_n = GY_k + LX_k \quad (1)$$

Нас же интересует массовый (или молярный) расход компонента M , переходящего из газовой фазы в жидкую. Выразив его из соотношения (1), получаем

$$M = G(Y_n - Y_k) = L(X_k - X_n) \quad (2)$$

Выражение (2) представляет собой **уравнение материального баланса процесса абсорбции**.

Расчёт по уравнению материального баланса (2) будет правильным только в том случае, если все входящие в него величины выражены или в молярных, или в массовых единицах.

Для оценки эффективности процесса абсорбции принято использовать степень поглощения (извлечения) целевого компонента c_n .

Степень поглощения c_n показывает, какая доля (или процент) целевого компонента извлекается из газовой фазы

$$c_n = \frac{Y_n - Y_k}{Y_n}, \quad (3)$$

где Y_n и Y_k – начальная и конечная относительные концентрации целевого компонента в газовой фазе.

Степень поглощения зависит от растворимости целевого компонента в жидкости, технологического режима (температуры и давления в колонне), степени совершенства колонны как инженерного объекта. В хорошо организованных процессах степень извлечения приближается к единице, т.е. достигает почти 100%.

Для расчёта процессов переноса вещества из газовой фазы в жидкую в тарельчатых аппаратах удобно использовать **модифицированные уравнения массопередачи**. Эти уравнения можно записать как в переменных газовой фазы Φ_y , так и в переменных жидкой фазы Φ_x

$$M = K_{sy} S n_m \Delta Y_{cp}, \quad (4)$$

$$M = K_{sx} S n_m \Delta X_{cp} \quad (5)$$

где:

M – расход вещества (целевого компонента), которое переходит из газовой фазы в жидкую в единицу времени, кг/с или кмоль/с;

K_{sy} и K_{sx} – поверхностные коэффициенты массопередачи, выраженные в переменных газовой и жидкой фаз;

ΔY_{cp} и ΔX_{cp} – средние движущие силы переноса целевого компонента, выраженные через концентрации в газовой и жидкой фазах;

S – площадь поперечного сечения аппарата;

n_m – число тарелок в аппарате.

Уравнения (4) и (5) используются для расчёта числа тарелок проектируемого абсорбера.

Коэффициент массопередачи (K_{sy} или K_{sx}) является важнейшей **кинетической характеристикой** процесса абсорбции. Чем больше его значение, тем выше интенсивность процесса переноса целевого компонента, тем меньше размеры требуемого для проведения абсорбции аппарата. Физический смысл коэффициентов массопередачи определяется из уравнений (4) и (5):

Поверхностный коэффициент массопередачи показывает, какое количество вещества переходит на тарелке из одной фазы в другую в единицу времени через единицу поверхности при движущей силе, равной единице.

Процесс массопередачи, т.е. переход целевого компонента из одной фазы в другую, складывается из двух одновременно протекающих процессов **массоотдачи**.

Массоотдача – это процесс переноса вещества в пределах одной фазы, из её ядра к границе или наоборот – от границы в глубь фазы.

Скорость движения целевого компонента в пределах фазы пропорциональна движущей силе, которая равна разности концентраций вещества в ядре и на границе фазы.

Интенсивность массоотдачи характеризуют **коэффициенты массоотдачи** β_{sy} для газовой фазы Φ_y и β_{sx} для жидкой фазы Φ_x .

Между коэффициентами массоотдачи β_{sy} и β_{sx} и массопередачи K_{sy} и K_{sx} существует связь

$$\frac{1}{K_{sy}} = \frac{1}{\beta_{sy}} + \frac{m}{\beta_{sx}}; \quad (6)$$

$$\frac{1}{K_{sx}} = \frac{1}{m\beta_{sy}} + \frac{1}{\beta_{sx}}, \quad (7)$$

где m – константа фазового равновесия (коэффициент распределения), численно равна тангенсу угла наклона линии равновесия и определяется из уравнения равновесия между жидкостью и паром²

$$y^* = mx, \quad (8)$$

где x – молярная доля компонента в жидкой фазе, y^* – молярная доля этого же компонента в газе в состоянии равновесия (равновесная концентрация).

Левые части равенств (6) и (7) представляют собой общее сопротивление переносу вещества из фазы в фазу, т.е. сопротивление массопередаче. В правых частях этих равенств находятся суммы сопротивлений переносу вещества в пределах фаз Φ_y и Φ_x , т.е. сопротивления массоотдаче. Поэтому из уравнений (6) и (7) следу-

² Фазовые равновесия изучаются в курсе физической химии. Здесь же напомним, что для хорошо растворимых газов m имеет небольшое значение (угол наклона линии равновесия мал, следовательно, мал и тангенс угла наклона). Для плохо растворимых газов m имеет большое значение – тангенс угла наклона велик.

ет, что **общее сопротивление переносу вещества из одной фазы в другую равно сумме сопротивлений переносу в пределах фаз.**

Соотношение между сопротивлениями фаз зависит в первую очередь от того, хорошо или плохо растворим целевой компонент в абсорбенте. Если он растворяется хорошо (аммиак в воде в выше рассмотренном примере), то, следовательно, коэффициент распределения m имеет малое численное значение. В этом случае сопротивление переносу вещества из одной фазы в другую будет сосредоточено в газовой фазе. Сопротивление его перемещению в жидкую фазу будет незначительным. Отсюда следует, что

$$\frac{1}{\beta_{sy}} \gg \frac{m}{\beta_{sx}}. \quad (9)$$

Это означает, что интенсивность переноса хорошо растворимого компонента из газовой фазы в жидкую определяется интенсивностью переноса этого компонента только в газовой фазе, т.е.

$$K_{sy} \approx \beta_{sy}. \quad (10)$$

Если же газ плохо растворим в жидкости, то значение m велико. В этом случае сопротивление переносу вещества будет сосредоточено в жидкой фазе

$$\frac{1}{\beta_{sx}} \gg \frac{1}{m\beta_{sx}}. \quad (11)$$

Это означает, что

$$K_{sx} \approx \beta_{sx}. \quad (12)$$

В целях экономии времени, необходимого для нахождения численного значения коэффициента массопередачи, целесообразно выяснить, хорошо или плохо растворим поглощаемый компонент в абсорбенте, а затем найти величину того коэффициента массоотдачи, который лимитирует скорость абсорбции. Если газ хорошо растворим, будем искать значение β_{sy} . Если же газ растворим плохо, то ограничивать скорость процесса будет его перемещение в жидкости, т.е. вычислять следует коэффициент массоотдачи в жидкой фазе β_{sx} .

Коэффициент массоотдачи зависит от многих переменных – температуры, давления, вязкости и плотности газа и жидкости, гидродинамической обстановки в аппарате, скорости диффузии и т.д. По этой причине простых способов расчёта коэффициента массоотдачи, увы, не существует. В инженерных расчётах приходится применять формулы, полученные с использованием **теории подобия**.

Несколько упрощённо можно считать, что основной идеей теории подобия является понижение числа переменных, влияющих на процесс, путём формирования из них безразмерных **критериев подобия**. В один из таких критериев входит интересующая инженера величина – в нашем случае это будет коэффициент массоотдачи. Следовательно, этот критерий и надо определять.

Следующим шагом будет нахождение зависимости между критериями подобия. Эта зависимость устанавливается в результате обработки большого массива экспериментальных данных, кото-

рые, в свою очередь, получены в ходе проведения опытов на **моделях**³. Итогом такой работы будут **критериальные уравнения**.

Коэффициент массоотдачи входит в **диффузионный критерий Нуссельта**

$$Nu' \equiv \frac{\beta l}{D}, \quad (13)$$

где β – коэффициент массоотдачи; l – определяющий геометрический размер; D – коэффициент молекулярной диффузии целевого компонента в веществе фазы.

Другими критериями, влияющими на процесс переноса массы, являются⁴:

критерий Рейнольдса

$$Re \equiv \frac{wl\rho}{\mu}, \quad (14)$$

диффузионный критерий Пекле

$$Pe' \equiv \frac{wl}{D} \quad (15)$$

и **диффузионный критерий Прандтля**, являющийся отношением критериев Пекле и Рейнольдса

³ Все установки лаборатории «Процессов и аппаратов химической технологии» являются моделями реальных промышленных процессов и позволяют получать надёжные экспериментальные данные.

⁴ Кроме названных основных критериев Рейнольдса и Прандтля, на массоотдачу влияют критерии Вебера и Фруда. Здесь они не рассматриваются.

$$Pr' \equiv \frac{Pe'}{Re} = \frac{\mu}{\rho D} = \frac{\nu}{D}, \quad (16)$$

где w – скорость движения вещества фазы, μ – динамический коэффициент вязкости вещества фазы, ν – кинематический коэффициент вязкости вещества фазы; ρ – плотность фазы.

При абсорбции в барботажных⁵ аппаратах расчёт коэффициента массоотдачи проводится по критериальным уравнениям

$$Nu'_2 = 1,77 \cdot 10^3 (Pe'_2)^{0,5} H_n^{1,2}, \quad (17)$$

$$Nu'_{жс} = 1,26 \cdot 10^5 (Pe'_{жс})^{0,5} H_n^{1,9} \quad (18)$$

Входящие в формулы (17) и (18) критерии выражаются соотношениями

$$Nu'_2 \equiv \frac{\beta_{ys} H_n}{D_2}; \quad (19)$$

$$Nu'_{жс} \equiv \frac{\beta_{xs} H_n}{D_{жс}}; \quad (20)$$

⁵ Барботаж (барботирование) (англ. *Bubbling* — «пузырение», фр. *barbotage* — «перемешивание», нем. *Barbotage*, итал. *burbujeo*) — это процесс пропускания газа или пара через слой жидкости. Газ продавливается через слой жидкости. Для этого в тарелке сделано большое количество мелких отверстий диаметром 3÷6 мм. При барботировании создаётся большая межфазная поверхность на границе «жидкость-газ», что способствует интенсификации тепло- и массообменных процессов, а также более полному химическому взаимодействию газов с жидкостями. Википедия.

$$Pe'_2 \equiv \frac{wH_n}{D_2}; \quad (21)$$

$$Pe'_{жс} \equiv \frac{UH_n}{D_{жс}}; \quad (22)$$

- величины с нижними индексами «г» относятся к газовой фазе, а с нижними индексами «жс» - к жидкой фазе;
- β_{ys} и $\beta_{жс}$ – поверхностные коэффициенты массоотдачи в газовой и жидкой фазах, м/с;
- H_n – высота слоя пены на тарелке, м;
- w – средняя скорость газа в аппарате, м/с
- U – плотность орошения, $\frac{м^3}{м^2 \cdot с}$;
- D_2 и $D_{жс}$ – коэффициенты молекулярной диффузии целевого компонента в газовой и жидкой фазах. Если идёт процесс поглощения аммиака водой, то коэффициент диффузии его в воздухе равен $D_2 = 1 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$, а коэффициент диффузии в воде $D_{жс} = 1 \cdot 10^{-9} \frac{м^2}{с}$.

Средняя скорость газа в аппарате рассчитывается из уравнения объёмного расхода

$$w = \frac{V}{S} = \frac{4V}{\pi d^2} \quad (23)$$

где V – объёмный расход газового потока при рабочих условиях, м³/с; d – диаметр абсорбера, м.

Плотность орошения U показывает, какой объём жидкого поглотителя проходит через единицу площади аппарата в единицу времени. Она находится по уравнению

$$U = \frac{L_V}{S} = \frac{4L_V}{\pi d^2}, \quad (24)$$

где L_V – объёмный расход абсорбента, м³/с.

В уравнение массопередачи (4) входит средняя движущая сила переноса целевого компонента ΔY_{cp} , выраженная через концентрации в газовой фазе. Если линия равновесия между жидкостью и газом является прямой (рис. 3), то значение ΔY_{cp} можно найти по уравнению

$$\Delta Y_{cp} = \frac{\Delta Y_n - \Delta Y_k}{\ln \frac{\Delta Y_n}{\Delta Y_k}}, \quad (25)$$

где ΔY_n и ΔY_k – начальная (для низа аппарата) и конечная (для верха аппарата) движущие силы процесса абсорбции. На рисунке 3 они показаны фигурными скобками.

Определение равновесной концентрации Y_n^* возможно только в том случае, если известны данные по равновесию между жидкостью и газом. Для растворимости аммиака в воде линия равновесия описывается уравнением

$$Y^* = 0,99X, \quad (26)$$

где Y^* и X – относительные молярные концентрации аммиака в газовой и жидкой фазах.

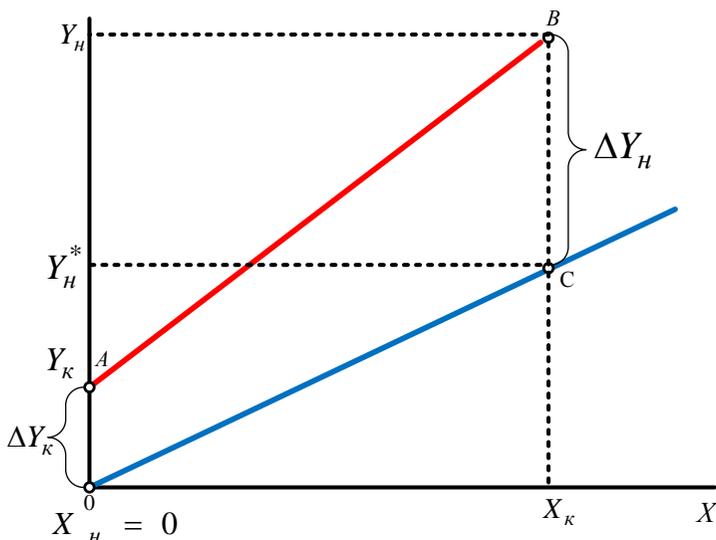


Рис. 3. Рабочая и равновесная линии процесса абсорбции.
 АВ – рабочая линия процесса; 0С – линия равновесия жидкость-газ;

Нахождение движущей силы процесса абсорбции для низа и верха колонны иллюстрирует диаграмма $Y - X$ (рис. 3), на которой красным цветом нанесена рабочая линия процесса АВ и синим цветом линия равновесия 0С. Предполагается, что для процесса используется чистый абсорбент, т.е. $X_H = 0$.

Линия равновесия 0С строится по двум точкам 0 и С с координатами⁶

$$\begin{aligned} \text{т. 0} & [X = 0, Y = 0], \\ \text{т. С} & [X = X_K, Y = Y_H^*]. \end{aligned}$$

Величина Y_H^* находится путём подстановки в уравнение (26) значения $X = X_K$.

⁶ Линия равновесия – она от Бога. Нам бы только узнать её положение, которое не зависит от нашего желания. Изменить это положение мы не можем.

На рис. 4 показан массообмен на одной барботажной тарелке. Под тарелкой встречаются «грязный» газ и отработанная жидкость (пространство B на рис. 4 и т. B на рис. 3). На тарелку поступает чистая жидкость, а покидает тарелку очищенный газ (пространство A на рис. 4 и т. A на рис. 3). Следовательно, рабочая линия AB проходит через точки B и A , соответствующие составам фаз до процесса и после него

$$\text{т. } A [X = X_H = 0, Y = Y_K],$$

$$\text{т. } B [X = X_K, Y = Y_H].$$

Важнейшим фактором, влияющим на интенсивность массопередачи, является скорость движения фаз относительно друг друга. Увеличение скорости газового потока приводит к турбулизации газо-жидкостной смеси. В результате уменьшаются диффузионные сопротивления на границе раздела фаз. А это приводит к увеличению коэффициента массопередачи.

Одним из способов турбулизации газо-жидкостной смеси является превращение её в сильно подвижную нестабильную, но гидродинамически устойчивую пену. Достигается это за счёт кинетической энергии газа.

Рассмотрим изменения, которые происходят в газо-жидкостной смеси на ситчатой тарелке (рис. 4).

При небольшой скорости газа ($0,1 - 0,4$ м/с), не превышающей скорости свободного подъёма пузырьков в данной жидкости, на тарелке образуется барботажный слой. Основной объём жидкости находится в пузырьковой зоне. Высота пены пока невелика.

При увеличении скорости до $0,5 - 0,7$ м/с почти вся газо-жидкостная смесь превращается в пену, и лишь у поверхности тарелки остаётся тонкий барботажный слой.

При дальнейшем увеличении скорости газа до 1,0 – 3,0 м/с структура пены меняется – она становится подвижной и сильно турбулизованной. Такая пена представляет собой взвешенный слой жидкости в виде быстро движущихся плёнок и струй, хорошо перемешанных с пузырьками и струями газа.

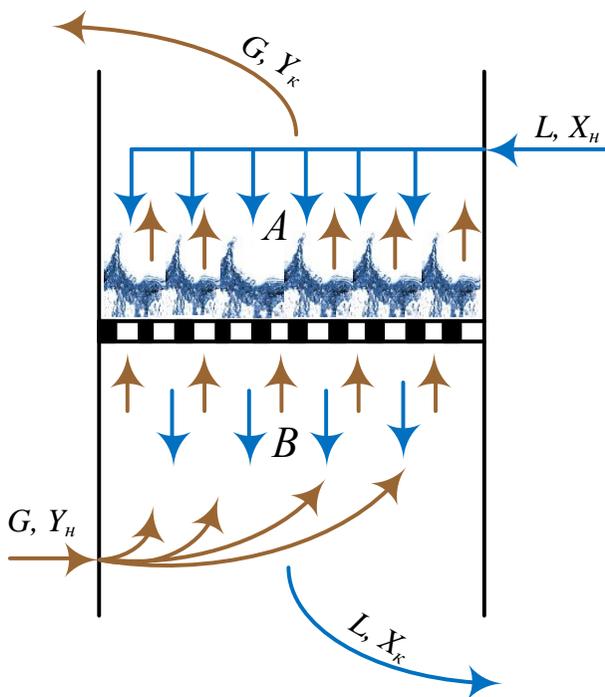


Рис. 4. Схема массообмена на ситчатой тарелке

Если продолжать увеличивать скорость газа, то турбулентность пены усиливается, её движение приобретает вихревой характер, количество брызг над пеной возрастает. При скорости более 3,0 м/с начинается унос пены.

В промышленности подвижная пена специально создаётся в аппаратах, которые так и называются – **аппараты пенного типа**

или **пенные аппараты**. Их эффективность в несколько раз выше барботажных аппаратов и в сотни раз – обычных насадочных.

1. Цель лабораторной работы

Выполнение работы предусматривает два этапа.

Цели первого этапа:

1. Знакомство с конструкцией и принципом работы пенного абсорбера;
2. Проведение процесса абсорбции и нахождение концентраций аммиака в воде до и после процесса;
3. Вычисление экспериментального значения коэффициента массопередачи $K_{sy}^{эксп}$.

Цели второго этапа (выполняется по указанию преподавателя):

4. Изучение влияния скорости газа и плотности орошения на величину коэффициента массопередачи $K_{sy}^{эксп}$.

2. Устройство пенного аппарата

Конструкция пенного аппарата должна обеспечивать создание взвешенного слоя подвижной высокой пены с возможно меньшим гидравлическим сопротивлением.

Пенный аппарат (рис. 5) представляет собой корпус круглого сечения, в котором установлена горизонтальная решётка. При подаче на решётку жидкости, а под решётку потока газа на ней образуется подвижная пена. При этом газ движется снизу вверх, а жидкость – по решётке горизонтально со скоростью примерно 0,02 – 1,0 м/с. Абсорбент подаётся через штуцер в приёмную камеру, которая обеспечивает равномерное поступление жидкости на решётку.

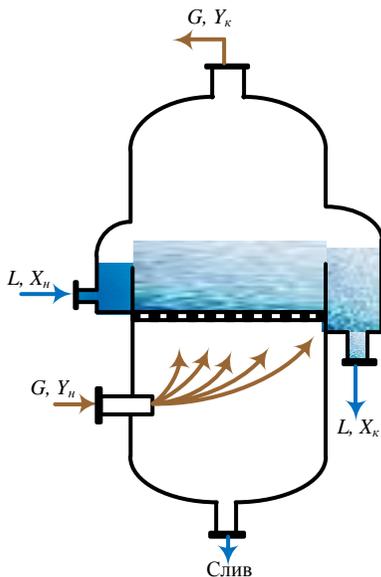


Рис. 5. Принципиальное устройство пенного аппарата

3. Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки показана на рис. 6. Основным аппаратом является пенный абсорбер 4, в котором осуществляется процесс поглощения аммиака из газовой фазы водой. В абсорбере установлена одна ситчатая тарелка 18, на которую из напорной ёмкости 3 самотёком поступает абсорбент – вода. Под тарелку подаётся смесь воздуха с аммиаком. Эта смесь готовится искусственно: через водный раствор аммиака (нашатырный спирт) (ёмкость 8) пропускается воздух, который нагнетается воздуходувкой (на схеме не показана). В результате получается насыщенный аммиаком воздух. На тарелке 18 образуется слой подвижной пены. Очищенный от аммиака воздух отводится сверху, а жидкость через порог отводится в сливную камеру 17, где пена разрушается. В

случае попадания воды под тарелку предусмотрен её дренаж в канализацию с помощью крана 16.

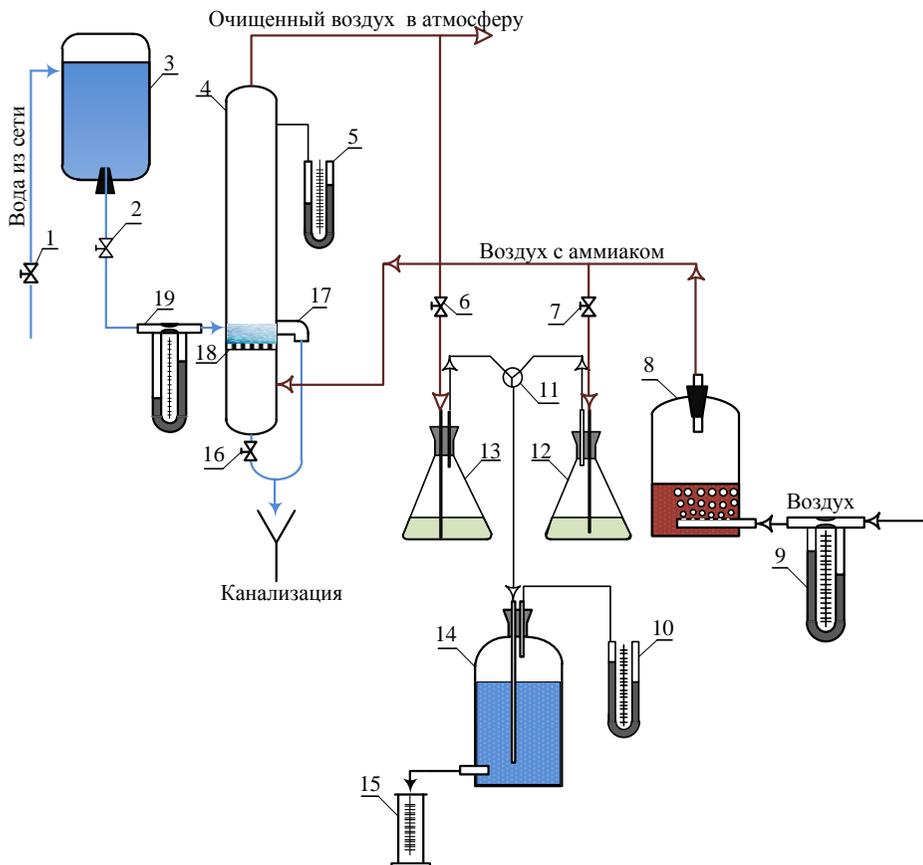


Рис. 6. Схема лабораторной установки. 1, 2 – регулировочные вентили; 3 – напорная ёмкость; 4 – абсорбер; 5, 10 – дифманометры; 6, 7 и 16 – краны; 9, 19 – реометры; 8 – ёмкость с раствором гидроксида аммония; 11 – трёхходовой кран; 12, 13 – колбы; 14 – аспиратор; 15 – мерный цилиндр; 17 – сливная камера; 18 – ситчатая тарелка

Расход подаваемой в абсорбер воды регулируется вентилем 2, измеряется по показанию реометра⁷ 19 и калибровочному графику, расположенному на стенде.

Расход воздуха регулируется напряжением, которое подаётся на воздуходувку, с помощью лабораторного трансформатора (ЛАТР, на схеме не показан). Для определения расхода воздуха предназначен реометр 9, калибровочный график которого расположен на стенде.

В ходе процесса абсорбции будет изменяться содержание целевого компонента (аммиака) в газе. Для определения концентраций аммиака до и после абсорбции на газовых линиях предусмотрен отбор газа на анализ при помощи трёхходового крана 11 и кранов 6 и 7. Пропуская смесь воздуха с аммиаком через известное количество 0,1 Н раствора серной кислоты в колбах 12 и 13, по убыли H_2SO_4 можно определить число молей вступившего в реакцию аммиака. Объём прошедшего воздуха определяется по объёму вытекшей из аспиратора воды, которая собирается в мерный цилиндр 15. С помощью трёхходового крана 11 аспиратор можно подключать к колбам 12 и 13. Дифманометр 10 служит для определения разрежения $P_{разр}$ в аспираторе. Это значение будет нужно для приведения объёма прошедшего воздуха к нормальным условиям.

После пропускания через колбы 12 и 13 воздушно-аммиачной смеси оставшаяся серная кислота оттитровывается в присутствии индикатора 0,1 Н раствором щёлочи. Для того чтобы отмерить точные объёмы серной кислоты и в дальнейшем провести

⁷ Реометр (от греч. *rhéos* — течение, поток и метр), прибор для измерения объёмного расхода; разновидность расходомера. Действие реометра основано на измерении перепада давления в дросселирующем (сужающем сечение потока) устройстве, установленном в трубопроводе.

титрование на стенде установлены две бюретки с 0,1 Н раствором кислоты и 0,1 Н раствором щёлочи.

4. Оборудование, реактивы и лабораторная посуда

Характеристика абсорбера:

- внутренний диаметр $d = 18 \cdot 10^{-3}$ м ;
- диаметр отверстий ситчатой тарелки $d_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ м ;
- доля живого сечения ситчатой тарелки $f_0 = 0,12$;
- высота сливного порога $H = 3,5 \cdot 10^{-2}$ м .

Для создания на тарелке устойчивого слоя подвижной пены скорость газа, отнесённая к полному сечению абсорбера, должна быть не менее 0,5 м/с.

В работе используются следующие реактивы.

- 0,1 Н раствор гидроксида натрия $NaOH$ или гидроксида калия KOH (готовится из фиксанала на дистиллированной воде, его нормальность может несколько отличаться от значения 0,1, точное значение нормальности сообщит инженер, готовящий установку).
- 0,1 Н раствор серной H_2SO_4 или соляной HCl кислоты (готовится из фиксанала на дистиллированной воде).
- Индикатор метиловый оранжевый (готовится растворением 1 г индикатора в 1 л дистиллированной воды).
- 25%-й водный раствор гидроксида аммония (нашатырный спирт) NH_4OH .

В работе применяется следующая химическая посуда.

- Конические колбы ёмкостью 250 мл – 6 шт.
- Бюретки на 50 мл – 2 шт.

- Промывалка с дистиллированной водой – 1 шт.
- Капельница для индикатора – 1 шт.

5. Подготовка установки к работе

1. Закрывать краны 6 и 7. В колбы 12 и 13 налить из бюретки 10 мл 0,1 N раствора серной кислоты. Добавить в каждую колбу по 2–3 капли индикатора. Долить в колбы дистиллированной воды и плотно закрыть пробками с газоотводящими трубками. Трубки должны быть погружены в раствор на 15–20 мм.

2. Заполнить аспиратор 14 водой и проверить герметичность установки. Для этого с помощью трёхходового крана 11 соединить с аспиратором 14 сначала колбу 13, а затем колбу 12. Если установка герметична, то вытекание воды из аспиратора быстро прекращается.

3. Открыть вентиль 1 и заполнить ёмкость 3 водой⁸.

Установка готова к проведению эксперимента.

6. Последовательность выполнения работы

1. Начинаем процесс абсорбции. Для этого надо открыть вентиль 2 и установить по реометру 19 заданный преподавателем расход воды, наблюдая при этом за перепадом уровней на реометре 19. Изменяя напряжение вращением вариатора ЛАТРа, установить заданный расход воздуха по перепаду уровней на реометре 9. Начался процесс абсорбции.

2. Фиксируем величину избыточного давления в аспираторе по дифманометру 5.

⁸ Как правило, ёмкость 3 уже заполнена водой – за этим следит инженер, обслуживающий лабораторию.

3. Измерим линейкой высоту пены H_n на тарелке 18 абсорбера 4.

4. Определим концентрацию аммиака в воздухе, который поступает в абсорбер. Для этого надо соединить колбу 12 с аспиратором 14 с помощью трёхходового крана 11, после чего открыть кран 7 и несколько секунд пропускать через колбу 12 воздушно-аммиачную смесь. При этом из аспиратора будет вытекать вода, объём которой $V_{H_2O}^{нач}$ (мл) необходимо измерить с помощью мерного цилиндра 15. При вытекании воды из аспиратора образуется небольшое разрежение. Его величину $P_{разр}$ необходимо измерить по дифманометру 10. Значение разрежения будет использовано для вычисления объёма газа, прошедшего через колбу.

5. Теперь определим концентрацию аммиака в газе, уходящем из абсорбера. Для этого следует переключить трёхходовой кран 11 на колбу 13. Открыть кран 6 и пропускать смесь воздуха с оставшимся аммиаком через раствор серной кислоты в колбе 13. Вытекающая при этом вода опять собирается в мерный цилиндр 15.

6. Отключаем подачу воды и воздуха и переходим к определению концентраций аммиака в газе до и после процесса абсорбции.

7. Отсоединяем колбы 12 и 13 и оттитровываем оставшуюся в них серную кислоту раствором щёлочи. Объёмы щёлочи, пошедшей на титрование, записываем.

8. Записываем температуру в лаборатории t и атмосферное давление $P_{атм}$.

9. По графикам, расположенным на лабораторном стенде, определяем объёмные расходы воды L_V и воздуха G_V .

Полученные при выполнении экспериментальной части работы результаты сводим в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

№	Показания реометров, мм рт. ст		Расход, м ³ /с		H _п , м	P _{изб.} , кПа	Объём вытекшей воды, мл		P _{разр.} , кПа	Объём щёлочи, мл	
	Вода	Воздух	Вода	Воздух			до	после		до	после

7. Обработка результатов эксперимента

1. Определяем число киломолей воздуха $N_{\text{возд}}$, пропущенное через колбы 13 и 12, по формуле

$$N_{\text{возд}} = \frac{V_{H_2O} \cdot 10^{-6}}{22,4} \cdot \frac{P_{\text{атм}} - P_{\text{разр}}}{101,3} \cdot \frac{273}{273 + t}, \quad (27)$$

где V_{H_2O} – объём воды в миллилитрах, вытекшей из аспиратора при пропускании газа через колбы 12 и 13; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, кПа; $P_{\text{разр}}$ – разрежение в аспираторе, кПа; 101,3 – нормальное давление; 22,4 – объём, занимаемый одним киломолем газа при нормальных условиях; 10^{-6} – коэффициент пересчёта из миллилитров в кубические метры.

2. Число киломолей аммиака, поглощённого серной кислотой из пропускаемой через колбы 12 и 13 воздушно-аммиачной смеси, определяется по формуле

$$N_{NH_3} = (10 \cdot H_k - V_{щ} H_{щ}) \cdot 10^{-6}, \quad (28)$$

где 10 – объём кислоты, помещённый в колбу, мл; H_k – нормальность раствора кислоты, если не будет других указаний, считать её равной 0,1; $H_{щ}$ – нормальность раствора щёлочи, если не будет других указаний, считать её равной 0,1; $V_{щ}$ – объём щелочи, пошедший на титрование оставшей-

ся в колбе кислоты; 10^{-6} – коэффициент пересчёта из миллилитров в кубические метры.

3. Относительная молярная концентрация аммиака в воздухе до абсорбции Y_H и после абсорбции Y_K находится по соотношению чисел киломолей аммиака и воздуха

$$Y = \frac{N_{NH_3}}{N_{возд}}. \quad (29)$$

4. Количество аммиака (молярный расход аммиака), поглощаемое водой в единицу времени, M , кмоль/с, определяется из уравнения материального баланса (2), которое для нашего случая примет вид

$$M = G(Y_H - Y_K) = \frac{G_V}{22,4} (Y_H - Y_K) \cdot \frac{273}{273 + t}, \quad (30)$$

где G – молярный расход воздуха, кмоль/с; G_V – объёмный расход воздуха, м³/с.

5. Относительная молярная концентрация аммиака в воде на выходе из абсорбера также определяем из уравнения материального баланса (2). Так как на абсорбцию подаётся чистая вода то $X_H = 0$. Тогда

$$X_K = \frac{M}{L} = \frac{18M}{L_V \rho_{H_2O}}, \quad (31)$$

где L – молярный расход воды, кмоль/с; L_V – объёмный расход воды, м³/с; ρ_{H_2O} – плотность воды, считать равной 996 кг/м³; 18 – молярная массы воды, кг/кмоль.

6. Для расчёта средней движущей силы процесса абсорбции ΔY_{cp} необходимо знать равновесную концентрацию аммиака в газе Y_n^* . Её значение можно найти из уравнения линии равновесия (26), подставив в него значение X_k .

7. По уравнению (25) вычисляем среднюю движущую силу процесса абсорбции ΔY_{cp} .

8. Из уравнения (4) вычисляем экспериментальное значение коэффициента массопередачи $K_{sy}^{эксн}$.

9. Находим степень извлечения аммиака водой по уравнению (3).

10. Вычисляем среднюю скорость газа в абсорбере w по уравнению (23).

11. Плотность орошения в аппарате U находим по формуле (24).

На этом расчёты, необходимые для выполнения первого этапа работы, закончены.

8. Содержание отчёта

Отчёт о работе должен включать экспериментальные, расчётные и графические материалы, оформленные в следующей последовательности.

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Принципиальная схема установки.
4. Основные расчётные уравнения.
5. Таблицы экспериментальных и расчётных величин.
6. Графические зависимости.
7. Выводы по работе.

9. Контрольные вопросы

1. Назначение процесса абсорбции. Примеры промышленного применения.

2. Физико-химические основы процесса абсорбции. Растворимость газа в жидкости, понятие равновесия. Закон Генри. Влияние температуры и давления на растворимость газа в жидкости.

3. Движущая сила процесса абсорбции. Направление переноса вещества.

4. Рабочая линия процесса. Соответствие точек A и B рабочей линии верху и низу абсорбера.

5. Описание лабораторной установки. Приборы, используемые для измерения расходов и давлений.

6. Влияние скорости газа на структуру газожидкостной системы.

7. Физический смысл коэффициентов массоотдачи и массопередачи, их связь.

8. Единицы измерения физических величин, используемых в расчётах.

9. Влияние расхода абсорбента на положение рабочей линии. Физический смысл понятия «минимальный расход абсорбента».

Литература

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Изд-во Альянс, 2005. – 753 с. ISBN 5-98353-005-3.
2. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А Носков. – М., 2005. – 576 с. ISBN 5-98535-006-1.
3. Фролов, В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» / В.Ф. Фролов. – Л.: «ХИМИЗДАТ», 2008.- 288с. ISBN 5-93808-039-8
4. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии / Ю.И. Дытнерский. Часть 2. - М., «Химия» 2002.-368 с. ISBN 5-7245-1232-7.

Оглавление

Введение	3
Абсорбция и область её применения. Теория процесса	3
1. Цель лабораторной работы.....	21
2. Устройство пенного аппарата	21
3. Описание лабораторной установки	22
4. Оборудование, реактивы и лабораторная посуда.....	25
5. Подготовка установки к работе.....	26
6. Последовательность выполнения работы	26
7. Обработка результатов эксперимента	29
8. Содержание отчёта.....	32
9. Контрольные вопросы.....	32
Литература.....	33

**Исследование процесса абсорбции аммиака водой в аппарате
барботажного типа**

Составитель *Филиппов Вячеслав Васильевич*

Авторская редакция
Формат 60×84 ¹/₁₆ . Бумага офсетная
Усл. п. л. 1,73. Уч.-изд. л. 1,71
Тираж 20 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»
443100 г. Самара, Молодогвардейская, 244. Главный корпус