

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

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ АДСОРБЦИИ

Методические указания к лабораторной работе

**Казань
КНИТУ
2013**

Составители: доц. Д.В. Башкиров
доц. А.И. Разинов
проф. А.В. Клинов
асп. И.П. Анашкин

Изучение процесса периодической адсорбции: методические указания к лабораторной работе / сост.: Д.В. Башкиров, А.И. Разинов, А.В. Клинов, И.П. Анашкин — Казань: изд-во КНИТУ, 2013 – 21 с.

Изложены теоретические основы процесса адсорбции, описание лабораторной установки, порядок проведения работы, методика обработки опытных данных, моделирование на компьютере и анализ полученных результатов.

Предназначены для подготовки магистров по направлению «Химическая технология» при изучении дисциплины «Процессы массопереноса в системах с участием твердой фазы», а также бакалавров и специалистов других направлений, выполняющих лабораторный практикум по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии».

Подготовлены на кафедре процессов и аппаратов химической технологии.

Печатаются по решению методической комиссии ИХиНМ по циклу профессиональных дисциплин.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. С.В. Анаников
канд. хим. наук, проф. Р.З. Фахрутдинов

Введение

Адсорбцией называется процесс поглощения одного или нескольких компонентов из газовой, парогазовой или жидкой смеси твердым поглотителем, называемым адсорбентом. Поглощаемое вещество, находящееся в газе, называется *адсорбтивом*, а поглощенное — *адсорбатом*.

Процессы адсорбции избирательны и обычно обратимы. Благодаря их обратимости становится возможным обратный процесс выделения поглощенных веществ из адсорбента в газовую фазу — *десорбция*.

В промышленности процессы адсорбции используются при очистке и осушке газов, в частности, при извлечении паров летучих растворителей из их смеси с воздухом и другими газами (рекуперация летучих растворителей).

В зависимости от природы сил, действующих на поверхности твердого тела, различают физическую и химическую адсорбцию. Физическая адсорбция происходит под действием сил взаимного притяжения молекул газа молекулами на поверхности твердого тела — вандерваальсовыми силами. Силы притяжения возникают на поверхности адсорбента благодаря тому, что силовое поле поверхностных атомов и молекул не уравновешено силами взаимодействия соседних частиц, в отличие от молекул, расположенных в объеме твердого тела. Действие вандерваальсовых сил проявляется на расстояниях, значительно превышающих размеры адсорбируемых молекул газа. Поэтому при физической адсорбции на поверхности адсорбента обычно удерживается несколько слоев молекул поглощаемого вещества. При химической адсорбции (хемосорбции) поглощаемое вещество вступает в химическое взаимодействие с адсорбентом с образованием на его поверхности химических соединений.

В качестве адсорбентов применяются пористые твердые вещества с большой удельной поверхностью, обычно относимой к единице массы вещества. Свойства адсорбентов определяются природой материала, и пористой внутренней структурой. Адсорбенты имеют различные по диаметру капиллярные каналы — поры, которые условно могут быть разделены на макропоры (более 10^{-7} м), переходные поры ($10^{-7} - 10^{-9}$ м), микропоры (менее 10^{-9} м). Характер процесса адсорбции определяется размером пор.

Важнейшими характеристиками адсорбента являются *поглощительная способность* и *селективность*. Под поглощительной способностью понимается количество вещества, которое может быть поглощено единицей массы или объема адсорбента, а под селективностью — избирательная способность поглощения целевых компонентов (или компонента) из разделяемой газовой смеси.

В промышленности в качестве адсорбентов применяются, главным образом, активные угли и минеральные адсорбенты (силикагель, цеолиты и др).

Адсорбенты характеризуются также *статической* и *динамической* активностью. Под статической активностью понимают количество вещества, поглощенное единицей массы или объема адсорбента от начала адсорбции до установления равновесия. Этот вид активности определяют в статических условиях, т.е. без движения смеси газов или раствора. При движении смеси сквозь слой адсорбента через определенный промежуток времени адсорбент перестает полностью поглощать извлекаемый компонент, и происходит «проскок» этого компонента с последующим увеличением концентрации компонента в уходящей из слоя смеси вплоть до наступлений равновесия. Количество вещества, поглощенного единицей массы или объема адсорбента до начала проскока, называют динамической активностью адсорбента. Динамическая активность всегда меньше статической, поэтому количество адсорбента определяют по его динамической активности.

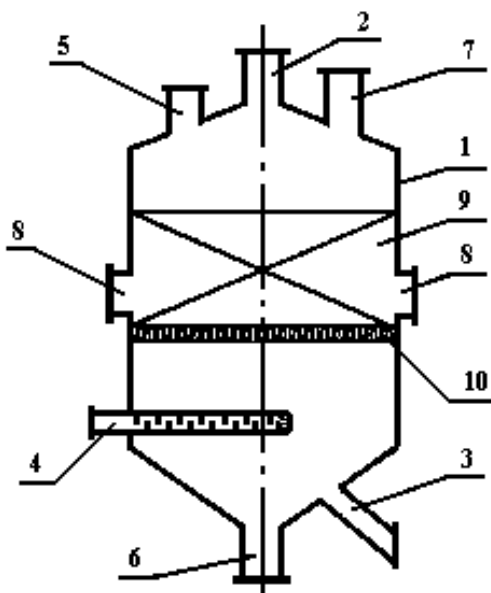
Периодическая адсорбция проводится, как правило, в вертикальных аппаратах с неподвижным слоем адсорбента (рис 1) и осуществляются в четыре стадии.

Первая стадия - собственно адсорбция, т.е. насыщение адсорбента поглощаемым компонентом. Исходная газовая смесь подается в корпус 1 аппарата через штуцер 2, проходит через слой адсорбента 9 и очищенные газы выходят через штуцер 3.

Вторая стадия - десорбция поглощенного компонента из адсорбента. Подача исходной смеси газов прекращается, и в аппарат подается водяной пар через барботер 4. Смесь паров десорбированного компонента и воды удаляется через штуцер 5. Конденсат водяного пара отводится из аппарата после десорбции через штуцер 6.

Третья стадия - сушка адсорбента. Перекрывается вход и выход водяного пара, после чего влажный адсорбент сушится горячим воздухом, поступающим в аппарат через штуцер 2 и выходящим из

аппарата через штуцер 3.



- 1 - корпус;
- 2 - штуцер для подачи исходной газовой смеси (при адсорбции) и воздуха (при сушке и охлаждении);
- 3 - штуцер для отвода очищенного газа (при адсорбции) и воздуха (при сушке и охлаждении);
- 4 - барботер при подаче острого водяного пара при десорбции;
- 5 - штуцер для отвода водяного пара при десорбции;
- 6 - штуцер для отвода конденсата водяного пара;
- 7 - люк для загрузки адсорбента;
- 8 - люки для выгрузки адсорбента;
- 9 - слой адсорбента;
- 10 - колосниковая решетка, на которую насыпан адсорбент.

Рис 1.Адсорбер с неподвижным слоем адсорбента:

Четвертая стадия - охлаждение адсорбента. Прекращается подача горячего воздуха, после чего адсорбент охлаждается холодным воздухом, поступающим в аппарат через штуцер 2 и выходящим через штуцер 3.

По окончании четвертой стадии цикл работы аппарата начинается снова со стадии адсорбции. Загрузку и выгрузку адсорбента

производят периодически через люки 7 и 8.

Равновесие при адсорбции

Равновесная концентрация X^* (кг адсорбата /кг чистого адсорбента) поглощаемого вещества в адсорбенте может быть представлена в виде функции концентрации c и температуры T :

$$X^* = f(c, T) \quad (1)$$

или в виде функции парциального давления p и температуры T

$$X^* = f_1(p, T),$$

где c – концентрация адсорбтива в газовой фазе, кг/м³, p – парциальное давление адсорбтива в газовой фазе, Н/м².

Зависимость $X^* = \varphi(c)$ или $X^* = \psi(p)$ при постоянной температуре ($T = \text{const}$) называется *изотермой адсорбции*.

Изотермы адсорбции (равновесия) определяются опытным путем. Вид изотермы адсорбции зависит от многих факторов: природы адсорбтива и адсорбента, удельной поверхности адсорбента, объема пор, их распределения по размерам, а также от температуры проведения процесса. В качестве примера на рис. 2 приведены виды типичных изотерм адсорбции для различных веществ, а на рис. 3 — изотермы адсорбции для одного вещества при различных температурах его проведения.

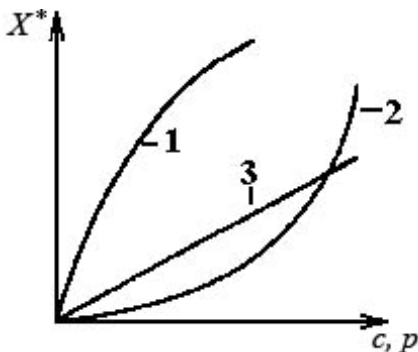


Рис. 2. Изотермы адсорбции для различных веществ: 1 – выпуклая, 2 – вогнутая, 3 – линейная

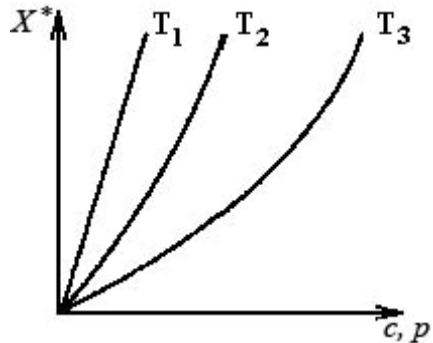


Рис. 3. Изотермы адсорбции для одного вещества при различных температурах $T_1 < T_2 < T_3$

Адсорбция сопровождается уменьшением парциального давления поглощаемого компонента в газовой смеси и заметным выделением тепла. Поэтому количество адсорбированного вещества возрастает с понижением температуры и повышением давления. Таким образом, повышение температуры и понижение давления отрицательно влияют на процесс адсорбции, способствуя десорбции поглощенного вещества из адсорбента.

Кинетика периодической адсорбции

Периодическая адсорбция является нестационарным процессом массообмена между потоком разделяемой газовой смеси, содержащей поглощаемый компонент (адсорбтив), и неподвижным слоем адсорбента. В общем случае этот процесс определяется последовательным массопереносом адсорбтива из ядра потока к поверхности частиц адсорбента (внешний массоперенос), характеризующимся коэффициентом массоотдачи β_y , и от этой поверхности - внутрь частиц (внутренний массоперенос). В отдельных случаях процесс может лимитироваться либо внешним, либо внутренним массопереносом.

Суммарная скорость массопередачи характеризуется коэффициентом массопередачи K_y . Уравнение массопередачи в данном случае имеет вид:

$$\frac{\rho_{\text{нас}}}{a} \frac{dX}{d\tau} = K_y (c - c^*(X)), \quad (2)$$

где a – удельная поверхность контакта фаз, а K_y – коэффициент массопередачи, определяемый по формуле:

$$K_y = \frac{1}{\frac{1}{\beta_y} + \frac{1}{\beta_t}} \quad (3)$$

В промышленности наиболее распространены адсорберы с неподвижным, а также с псевдооживленным и плотно движущимся слоями адсорбента. В аппаратах с неподвижным слоем адсорбента поток сплошной фазы, содержащей адсорбтив, периодически проходит через зернистый слой адсорбента.

Если пренебречь неравномерностью распределения концентрации по сечению аппарата, то концентрации внутри аппарата будут зависеть от двух переменных: времени τ и продольной

координаты x , отсчитываемой обычно от входа разделяемой смеси в слой сорбента.

Математическая модель процесса периодической адсорбции может быть представлена в виде следующей системы уравнений в предположении о движении газовой фазы, соответствующем идеальному вытеснению в изотермических условиях

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial \tau} + w \frac{\partial c}{\partial x} + r_m = 0, \quad (4)$$

$$\rho_{\text{нас}} \frac{\partial X}{\partial \tau} - r_m = 0, \quad (5)$$

$$r_m = K_{yV} (c - c^*(X)), \quad (6)$$

$$c^* = f(X), \quad (7)$$

где ε – порозность слоя; $\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность сорбента; w – фиктивная скорость движущейся через слой среды; c – концентрация адсорбируемого вещества в движущейся через слой среды, кг/м³, X – концентрация извлекаемого вещества в сорбенте кг/кг чистого сорбента, r_m – источник (сток) массы, обусловленный переносом адсорбтива из газовой фазы в твердую, $K_{yV} = K_y a$ – объемный коэффициент массопередачи. Система дифференциальных уравнений с частными производными должна быть дополнена соответствующими начальными и граничными условиями. Обычно предполагается, что начальная концентрация адсорбата равна нулю или некоторой остаточной после регенерации величине X_0 , а граничная концентрация адсорбтива в газовой фазе – c_n .

Уравнения (4) – (7) позволяют в принципе рассчитать зависимость концентраций в слое сорбента от продольной координаты к времени. Однако система уравнений (4) – (7) аналитического решения в общем случае не имеет. Имеются лишь решения в упрощенных частных случаях. Анализ решения системы уравнений (4) – (7) показывает, что для выпуклой изотермы адсорбции и постоянного значения коэффициента массопередачи K_V в течение определенного времени происходит формирование стационарного профиля концентрации $c(x)$ – стационарного фронта адсорбции, а затем осуществляется его параллельный перенос с постоянной скоростью u (рис. 4). Для

линейной и тем более вогнутой изотерм адсорбции профиль концентрации $c(x, \tau)$ с течением времени все более расширяется, что не позволяет говорить в этих случаях о параллельном переносе стационарного фронта адсорбции.

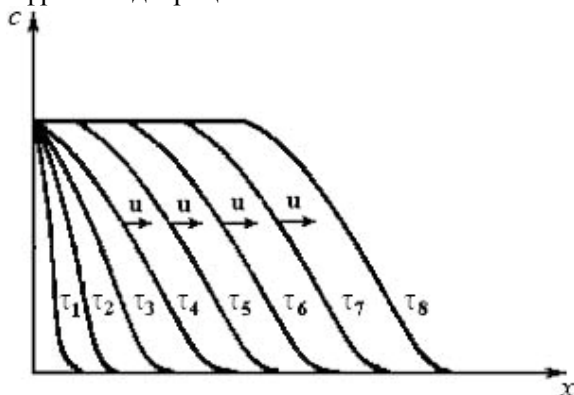


Рис. 4. Профили концентраций адсорбтива $c(x, \tau)$ при прохождении слоя адсорбента

Цель работы:

- 1) ознакомление с работой адсорбера с неподвижным слоем адсорбента
- 2) определение экспериментального и расчетного времени «проскока» (защитного действия слоя)
- 3) математическое моделирование процесса периодической адсорбции.

Описание установки

Лабораторная установка (рис.5) предназначена для проведения процесса адсорбции паров воды из смеси с воздухом слоем адсорбента – силикагеля. Она состоит из испытательной колонны 1 диаметром 90 мм. Колонна заполнена силикагелем (высота слоя 0,15-0,3 м).

Газ (влажный воздух) подается воздуходувкой 6 в верхнюю часть колонны, проходит через слой адсорбента и через штуцер 3 в нижней части сбрасывается в атмосферу. Расход газа $\dot{V}$ определяется при помощи диафрагмы 7 и дифманометра 8 и отображается прибором 19. Регулирование расхода осуществляется при помощи регулятора напряжения (ЛАТРа) 5, меняющего число оборотов электродвигателя. Относительная влажность φ на входе и выходе из колонны измеряется

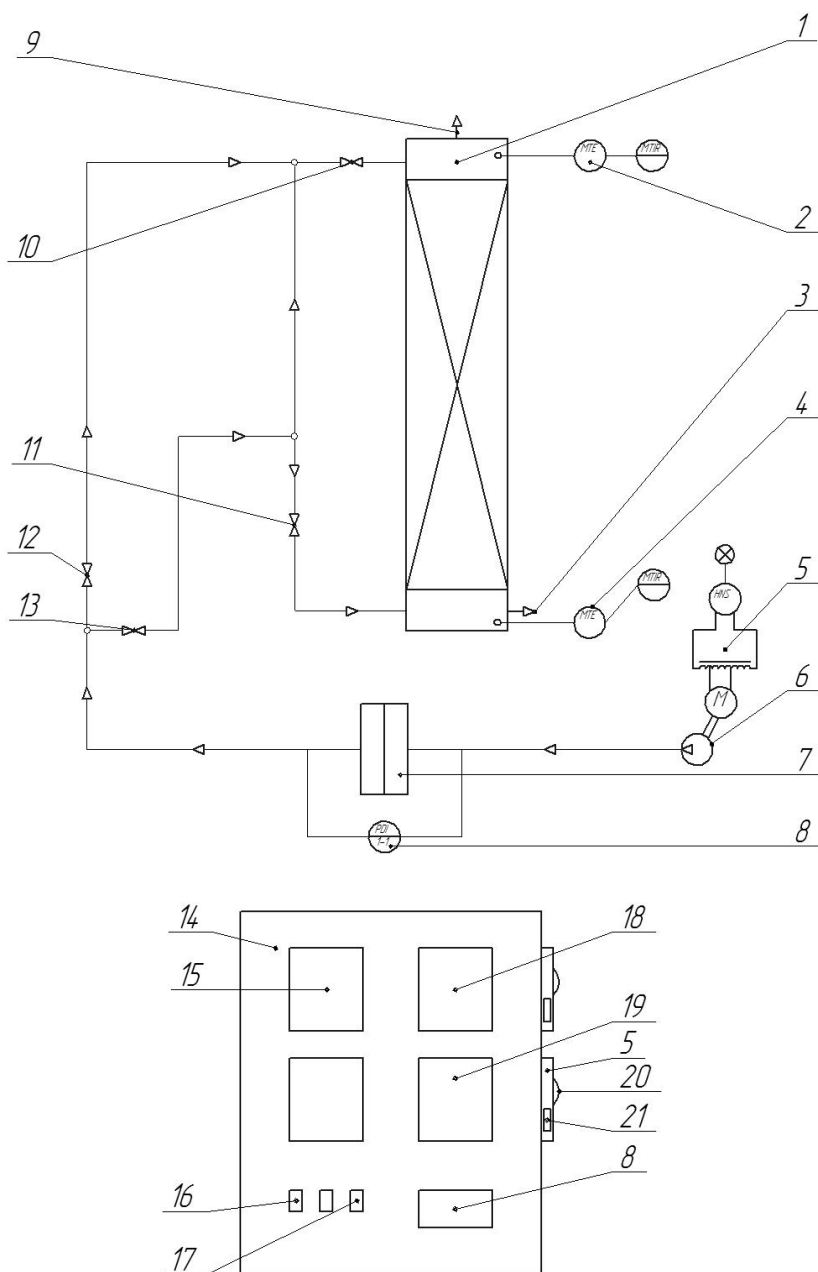


Рис. 5. Схема лабораторной установки

при помощи датчиков 2 и 4 соответственно и отображаются приборами 15 и 18. Выходные сигналы поступают на вторичные регистрирующие приборы. Все данные, поступающие с приборов, собираются и обрабатываются SCADA-системой и заносятся в память компьютера.

Порядок проведения работы

Убедиться, что в колонну засыпано необходимое количество адсорбента и включен компьютер. Тумблером «Сеть» 16 на электрическом щитке управления 14 включают электропитание вторичных приборов и преобразователей. Запускается программа ярлыком «Адсорбция», находящимся на рабочем столе компьютера. Открывают краны 10 и 12, убедившись, что краны 11 и 13 закрыты и заглушка на штуцере 9 закручена. Затем включают питание воздухоудвки тумблером 17 и ЛАТР тумблером 21 и, вращая ручку 20 ЛАТРа 5, устанавливают нужный расход (в диапазоне 0,005-0,008 м³/с) и засекают по часам на компьютере время начала эксперимента $\tau_{нач}$ (час, минута) Одновременно с включением воздухоудвки запускается сбор

информации компьютером с датчиков нажатием кнопки  на панели инструментов. Все необходимые данные, поступающие с приборов 15, 18, 19, собираются, обрабатываются и заносятся в память компьютера. По шкале, нанесенной на испытательной колонне, определяют высоту слоя адсорбента ($h_{сл}$). Эксперимент завершают по достижении «проскоковой» концентрации паров воды в воздухе (относительной влажности воздуха) $\varphi_{пр}$ на выходе из адсорбера, найденной по зависимости:

$$\varphi_{пр} = \varphi_n \cdot \chi,$$

где φ_n – относительная влажность воздуха на входе в колонну, а χ – доля проскоковой относительной влажности от начальной (задается преподавателем в диапазоне 0,07-0,1)

Время $\tau_{кон}$ (час, минута) фиксируют непосредственно в процессе эксперимента (это время достижения «проскоковой» концентрации $\varphi_{пр}$), наблюдая за влажностью воздуха на выходе из колонны (показания прибора 18), и проверяют по таблице экспериментальных данных сохраненных на компьютере. Вызов этой таблицы осуществляется



нажатием кнопки на панели инструментов. После нажатия на экране появляется окно с таблицей экспериментальных данных (см.рис. 6). В этой таблице необходимо найти начало своего эксперимента – строку «Запуск процесса» соответствующую времени начала эксперимента, т.к. подобный файл создается один раз в сутки и в нем могут находиться результаты других экспериментов. В последнем столбце «Значение» приведены в процентах значения относительной влажности воздуха на выходе из адсорбера.

Время проскока $\tau_{\text{пр}}^{\circ}$ – это время от начала работы до достижения «проскоковой» концентрации $\varphi_{\text{пр}}$ (т.е. от $\tau_{\text{нач}}$ до $\tau_{\text{кон}}$).

The screenshot shows the 'Owen Report Viewer' application window. It has a menu bar with 'Файл', 'Просмотр', and 'Справка'. Below the menu is a tabbed interface with 'Таблица' and 'График'. The 'Таблица' tab is active, displaying a table with the following data:

ДАТА	ВРЕМЯ	СОБЫТИЕ	ССЫЛКА	ОПИСАНИЕ	ЗНАЧЕНИЕ
01.02.2013	17:07:48	Запуск процесса			
01.02.2013	17:07:48	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,59233
01.02.2013	17:08:48	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,58241
01.02.2013	17:09:48	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,59461
01.02.2013	17:10:48	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,5847
01.02.2013	17:11:49	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,5946
01.02.2013	17:12:49	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,58241
01.02.2013	17:13:49	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,59461
01.02.2013	17:14:49	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,5847
01.02.2013	17:15:48	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,59233
01.02.2013	17:16:48	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,5847
01.02.2013	17:17:48	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,59233
01.02.2013	17:18:48	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,59004
01.02.2013	17:19:48	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,65737
01.02.2013	17:20:48	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,82896
01.02.2013	17:21:48	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	0,95872
01.02.2013	17:22:48	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	1,09076
01.02.2013	17:23:48	Сохранение значения	9	Влаж-ть2, %	1,20831
01.02.2013	17:24:08	Завершение процесса			

At the bottom of the window, there is a status bar with the following information:

- Дата: 01.02.2013
- Процесс: C:\DOCUMENTS AND SETTINGS\ADMINISTRATOR\РАБОЧИЙ СТОЛ\АДСОРБЦИЯ.DPM
- Кнопка: Выход

Рис. 6. Пример таблицы экспериментальных данных

После этого все окна на компьютере закрывают и при необходимости выключают компьютер. Выключают воздухоудвку, возвращая ручку 20 ЛАТРа 5 в исходное положение и выключая последовательно тумблеры 21 и 17. Затем выключают питание установки тумблером 16. Все необходимые данные заносятся в таблицу 1.

Таблица 1. Таблица экспериментальных данных

$\dot{V} \cdot 10^2$, м ³ /с	$h_{сл}$, м	φ_n , %	$\varphi_{пр}$, %	$\tau_{нач}$, ч:мин:сек	$\tau_{кон}$, ч:мин:сек	$\tau_{пр}^э$, с

Обработка опытных данных

При расчетах можно использовать пример 8.1 (п. 8.1.3., п. 8.1.4) книги [2].

В данной работе предполагается, что процесс адсорбции – изотермичен, поэтому расчет проводится для $T=20^\circ\text{C}$. Поскольку весь последующий расчет проводится для концентрации водяного пара в воздухе, а не для относительной влажности, необходимо перевести φ в c по формуле

$$c = \frac{\varphi}{100} \cdot \rho_{\text{нп}},$$

где $\rho_{\text{нп}}$ – плотность насыщенного водяного пара при $T=20^\circ\text{C}$, кг/м³.

Для силикагеля, используемого в данной лабораторной установке и достигаемых режимах (температуре и влажности), равновесная концентрация может быть описана линейным уравнением

$$X^* = 35c,$$

что позволяет найти аналитическое решение для системы (4)-(7). При других способах описания изотерм (более точных – изотермы Ленгмюра, Фрейндлиха и т.п.) система (4)-(7) решается только численными методами.

Коэффициент массотдачи в газовой фазе β_y определяется из критериального уравнения

$$\text{Nu}' = 0,355 \text{Re}^{0,641} (\text{Pr}')^{0,333} / \varepsilon,$$

$$\text{где } \text{Nu}' = \frac{\beta_y d_3}{D_y}; \quad \text{Re} = \frac{w d_3 \rho_y}{\mu_y}; \quad \text{Pr}' = \frac{\mu_y}{\rho_y D_y};$$

β_y – коэффициент массоотдачи в газовой фазе, м/с; d_3 – диаметр эквивалентного шара гранул адсорбента, м; D_y – коэффициент диффузии в газовой фазе в системе водяной пар-воздух, м²/с; w –

фиктивная скорость газа, м/с; ρ_y – плотность воздуха, кг/м³; μ_y – динамический коэффициент вязкости воздуха, Па·с; ε – порозность слоя.

Фиктивная скорость газа находится по формуле:

$$w = \frac{\dot{V}}{S}, \text{ где } S - \text{площадь поперечного сечения колонны, м}^2.$$

Коэффициент массоотдачи в адсорбенте (коэффициент внутренней массоотдачи) β_t находим по уравнению

$$\beta_t = \frac{10D_3}{d_3(1-\varepsilon)} \frac{\rho_{\text{нас}} X^*(c_n)}{c_n},$$

где D_3 – коэффициент эффективной диффузии водяного пара в адсорбенте, м²/с, c_n – начальная концентрация водяного пара в газовой смеси, кг/м³.

Справочный материал к расчетам:

$$\varepsilon = 0,3; \rho_{\text{нас}} = 850 \text{ кг/м}^3; d_3 = 0,0046 \text{ м}; D_3 = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}, T = 20^\circ\text{C}.$$

Коэффициент массопередачи K_y находим по формуле (3).

Снижение движущей силы процесса массопереноса в результате отклонения движения газа от режима идеального вытеснения учтем введением дополнительного диффузионного сопротивления продольного перемешивания. Коэффициент, учитывающий продольное перемешивание, определяем по уравнению:

$$\beta_{\text{прод}} = 0,0567 \frac{w}{1-\varepsilon} \left(\frac{\rho_y w d_3}{\mu_y} \right)^{0,22}$$

Коэффициент массопередачи с учетом продольного перемешивания:

$$K'_y = \frac{1}{\frac{1}{K_y} + \frac{1}{\beta_{\text{прод}}}}.$$

Находим объемный коэффициент массопередачи

$$K_{yV} = K'_y a,$$

где $a = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_3}$ – удельная поверхность адсорбента, м²/м³.

Продолжительность адсорбции определяется по выходной кривой, построение которой производится по уравнению Томаса для безразмерной концентрации в потоке

$$c / c_{\text{н}} = J(n_{oy}, n_{oy} T),$$

где $J(\alpha, \gamma)$ - функция двух переменных альфа и гамма (где $\alpha = n_{oy}$, а $\gamma = n_{oy} T$), определяемая по таблице 4 (см. приложение); $n_{oy} = \frac{K_y V h}{w}$ –

общее число единиц переноса для слоя высотой $h_{\text{сл}}$;

$$T = \frac{w c_{\text{нач}} (\tau - h \varepsilon / w)}{\rho_{\text{нас}} X^*(c_{\text{н}}) h_{\text{сл}}} - \text{безразмерное время.}$$

Выражая τ через безразмерное время T получим

$$\tau = \frac{h_{\text{сл}} (T \rho_{\text{нас}} X^*(c_{\text{н}}) + c_{\text{н}} \varepsilon)}{w c_{\text{н}}}$$

Результаты расчета выходной кривой сводятся в таблицу

Таблица 2. Результаты расчета выходной кривой

T	τ	$c / c_{\text{н}}$
T_1	τ_1	$c / c_{\text{н}_1}$
T_2	τ_2	$c / c_{\text{н}_2}$
...	...	...
T_n	τ_n	$c / c_{\text{н}_n}$

По выходной кривой определяется время достижения заданной «проскоковой» концентрации – это и будет временем проскока $\tau_{\text{пр}}^{\text{р}}$.

Результаты расчетов заносятся в таблицу 3

Таблица 3. Результаты расчетов

w , м/с	β_y , м/с	$\beta_{\text{т}}$, м/с	K_y , м/с	K'_y , м/с	$\tau_{\text{пр}}^{\text{р}}$, с

Необходимо сравнить расчетное $\tau_{\text{пр}}^{\text{р}}$ и экспериментальное $\tau_{\text{пр}}^{\text{э}}$ время проскока.

Моделирование на компьютере.

Для решения системы уравнений (4)–(7) была разработана компьютерная программа. Алгоритм основан на численном решении с помощью ядра программы Mathematica. Интерфейс ввода исходных данных представлен на рисунке 7.

Пользователю необходимо ввести следующие исходные данные: расход воздуха ($\text{м}^3/\text{с}$), влажность (начальная концентрация паров воды c_n) ($\text{кг}/\text{м}^3$), высоту слоя адсорбента (м), диаметр колонны (м), насыпную плотность адсорбента ($\text{кг}/\text{м}^3$), порозность слоя адсорбента, средний диаметр частиц сорбента (м), вид изотермы адсорбции (линейная (8) или Ленгмюра (9)), коэффициент эффективной диффузии паров воды в твердой фазе D_3 ($\text{м}^2/\text{с}$), концентрацию проскока (в % от начального значения концентрации).

$$X^* = 35c \quad (8) \quad X^* = \frac{44c}{1 + 81c} \quad (9)$$

После ввода исходных данных необходимо нажать кнопку расчет. Решение системы уравнений занимает некоторое время, этапы выполнения расчета указываются в поле статуса программы.

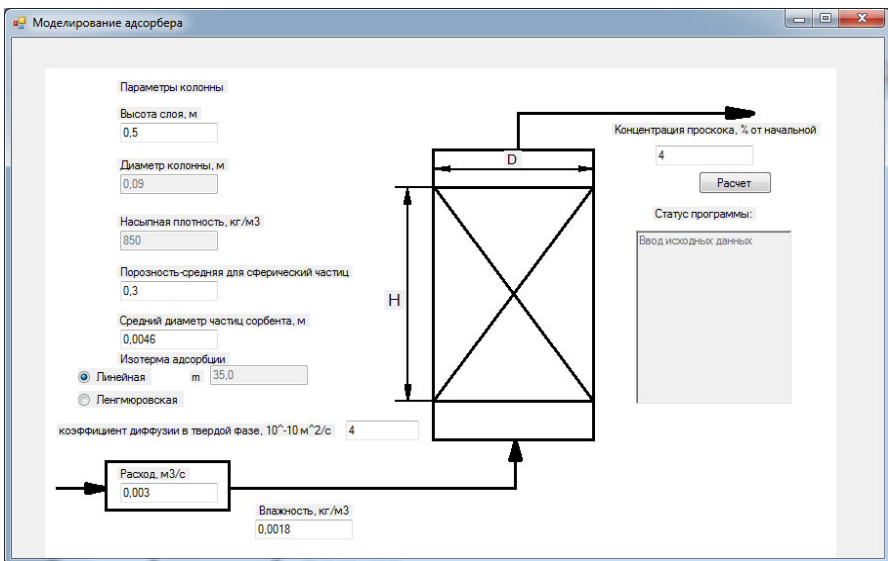


Рис 7. Интерфейс программы

После завершения расчета в окне программы выводятся следующие графики: зависимость концентрации адсорбтива в газе по высоте слоя $c(x)$, зависимость концентрации адсорбата в адсорбенте по высоте аппарата $X(x)$, концентрация адсорбтива в газе на выходе из аппарата в зависимости от времени $c(t)$ (рис 8). Кроме того, программа позволяет посмотреть изменение профилей концентрации $c(x)$ и $X(x)$ во времени, просто перемещая «бегунок» находящийся над графиком.

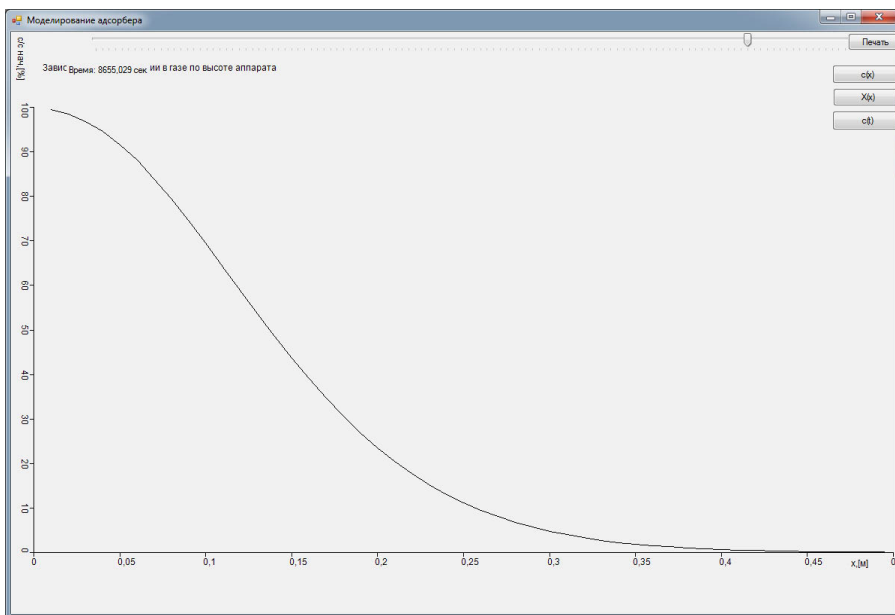


Рис 8. Результат работы программы

В окне изображается только один из графиков, переключение между графиками производится кнопками ($c(x)$, $X(x)$, $c(t)$), расположенными в правой части окна. Изменение времени производится ползунком, расположенным в верхней части окна.

В программе предусмотрен вывод результатов расчетов на печать (кнопка «печать» в правой части окна). На печать выводится 2 листа. На первом листе — исходная информация, результаты расчета: фиктивная скорость, критерий **Re**, коэффициент массоотдачи в газовой фазе, коэффициент массоотдачи в порах, коэффициент массопередачи с учетом обратного перемешивания, время проскока. Также на этом листе

находятся графики зависимости концентрации адсорбтива в газе по высоте слоя $c(x)$ в различные моменты времени.

На втором листе представлены графики концентрации адсорбата в адсорбенте по высоте аппарата $X(x)$ в различные моменты времени и концентрации адсорбтива в газе на выходе из аппарата в зависимости от времени $c(t)$. Графики зависимости концентрации по высоте аппарата представлены при значениях времени равных времени проскока, $\frac{1}{3}$ и $\frac{2}{3}$ времени проскока.

С помощью компьютера решают следующие задачи:

1. Сопоставить собственный расчет с компьютерным для линейной изотермы ($\tau_{пр}$, w , Re , β_y , β_t , K_y с учетом обратного перемешивания). Проанализировать графики $c(x)$, $X(x)$, сделать вывод о формировании стационарного фронта адсорбции.

2. Провести компьютерный расчет для ленгмюровской изотермы адсорбции, сопоставить с линейной.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения процесса адсорбции.
2. Какие виды адсорбентов вы знаете? Преимущества и недостатки различных видов адсорбентов.
3. Как описывается равновесие процесса адсорбции (в системах газ-твердое тело)?
4. Каков порядок расчета коэффициента массопередачи?
5. Объясните принцип работы адсорбционной установки.

Библиографический список

1. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: в 2 кн. / Ю.И.Дытнерский. – 3-е изд. – М.: Химия, 2002. – 768 с
2. Дытнерский, Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и др. Под ред. Ю. И. Дытнерского, 3-е изд., стереотипное. М.: ООО ИД «Альянс», 2007. – 496 с.
3. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г.Касаткин. – 12-е изд., стереотип., перераб. – М.: Альянс, 2006. – 750 с.
4. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф.Павлов, П.Г. Романков, А.А.Носков. –13-е изд., стереотип. – М.: Альянс, 2006. – 575 с.
5. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. – М.: Химия, 1980. – 248 с.

Приложение

Таблица 4. Функция $J(\alpha, \gamma)[2]$

α	γ/α						
	0,1	0,25	0,4	0,5	0,6	0,75	
0,01	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901	
0,02	0,9802	0,9803	0,9804	0,9804	0,9804	0,9805	
0,05	0,9515	0,9518	0,9522	0,9524	0,9526	0,9530	
0,10	0,9057	0,9071	0,9084	0,9093	0,9101	0,9114	
0,20	0,8220	0,8267	0,8314	0,8344	0,8374	0,8417	
0,50	0,6214	0,6427	0,6628	0,6756	0,6880	0,7056	
1	0,4038	0,4543	0,5010	0,5301	0,5578	0,5965	
1,5	0,2724	0,34251	0,4078	0,4487	0,4874	0,5415	
α	γ/α						
	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6	0,75	
2	0,2162	0,2690	0,3456	0,3943	0,4409	0,5064	
3	0,1235	0,1778	0,2633	0,3209	0,3777	0,4597	
4	0,0745	0,1234	0,2085	0,2700	0,3331	0,4269	
5	0,0463	0,0878	0,1686	0,2313	0,2982	0,4011	
α	γ/α						
	0,25	0,4	0,5	0,6	0,75	0,9	
6	0,0635	0,1380	0,2003	0,2695	0,3796	0,4891	
8	0,0341	0,0948	0,1535	0,2242	0,3446	0,4699	
10	0,0188	0,0665	0,1198	0,1894	0,3163	0,4547	
15	0,0045	0,0288	0,0674	0,1292	0,2627	0,4259	
20	0,0011	0,0130	0,0393	0,0909	0,2230	0,4040	
α	γ/α						
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
30	0,0028	0,0142	0,0472	0,1161	0,2268	0,3703	
40	0,0006	0,0053	0,0254	0,0808	0,1881	0,3440	
50	0,002	0,0021	0,0140	0,0572	0,1580	0,3221	
60	0,0000	0,0008	0,0078	0,0410	0,1339	0,3032	
80	0,0000	0,0001	0,0025	0,0215	0,0979	0,2714	
100	0,0000	0,0000	0,0008	0,0116	0,0727	0,2453	
α	γ/α						
	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	
150	0,0026	0,0110	0,0361	0,0931	0,1951	0,3412	
200	0,0006	0,0040	0,0185	0,0624	0,1585	0,3152	
300	0,0000	0,0006	0,0052	0,0293	0,1082	0,2744	
400	0,0000	0,0001	0,0015	0,0143	0,0759	0,2425	
α	γ/α						
	0,88	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	
500	0,0261	0,0541	0,1011	0,1717	0,2667	0,3814	
600	0,0166	0,0390	0,0808	0,1490	0,2466	0,3693	
800	0,0069	0,0207	0,0526	0,1139	0,2132	0,3485	
1000	0,0029	0,0112	0,0348	0,0883	0,1861	0,3306	

γ/α						
1	1,3	1,6	2	3	5	10
0,9901	0,9902	0,9902	0,9902	0,9903	0,9905	0,9910
0,9806	0,9807	0,9808	0,9810	0,9813	0,9821	0,9838
0,9536	0,9542	0,9549	0,9558	0,9579	0,9618	0,9701
0,9135	0,9159	0,9183	0,9213	0,9285	0,9408	0,9632
0,8487	0,8567	0,8643	0,8737	0,8946	0,9267	0,9704
0,7329	0,7624	0,7886	0,8193	0,8782	0,9451	0,9928
0,6543	0,7136	0,7634	0,8174	0,9061	0,9766	0,9994
0,6215	0,7018	0,7670	0,8341	0,9323	0,9902	0,9999

γ/α						
1	1,3	1,6	2	3	4	5
0,6035	0,7000	0,7764	0,8519	0,9512	0,9853	0,9958
0,5833	0,7052	0,7980	0,8828	0,9744	0,9952	0,9992
0,5717	0,7140	0,8183	0,9069	0,9863	0,9984	0,9998
0,5639	0,7236	0,8364	0,9256	0,9926	0,9995	0,9999

γ/α						
1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5
0,5582	0,7078	0,8187	0,8934	0,9403	0,9679	0,9833
0,5503	0,7229	0,8444	0,9194	0,9610	0,9822	0,9923
0,5449	0,7371	0,8658	0,9384	0,9742	0,9900	0,9964
0,5366	0,7683	0,9055	0,9677	0,9905	0,9975	0,9994
0,5316	0,7943	0,9323	0,9826	0,9964	0,9994	0,9999

γ/α						
1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
0,5258	0,6705	0,7885	0,8742	0,9304	0,9640	0,9825
0,5223	0,6884	0,8178	0,9043	0,9545	0,9803	0,9922
0,5200	0,7044	0,8419	0,9263	0,9698	0,9891	0,9965
0,5182	0,7188	0,8620	0,9428	0,9798	0,9938	0,9984
0,5158	0,7441	0,8934	0,9649	0,9907	0,9980	0,9996
0,5141	0,7657	0,9168	0,9781	0,9956	0,9993	0,9999

γ/α						
1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3
0,5115	0,6759	0,8088	0,9000	0,9536	0,9809	0,9930
0,5100	0,6980	0,8415	0,9295	0,9734	0,9906	0,9976
0,5081	0,7340	0,8879	0,9635	0,9907	0,9981	0,9997
0,5071	0,7630	0,9189	0,9806	0,9967	0,9996	0,9999

γ/α						
1	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12
0,5063	0,6295	0,7395	0,8291	0,8955	0,9405	0,9685
0,5058	0,6402	0,7581	0,8504	0,9151	0,9559	0,9790
0,5050	0,6593	0,7895	0,8839	0,9431	0,9753	0,9905
0,5045	0,6758	0,8151	0,9088	0,9613	0,9859	0,9956