**Бугульминский филиал**

**Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования**

**Казанский национальный исследовательский технологический университет**

**И.А. Мутугуллина**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к выполнению контрольной работы**

**по дисциплине**

**«Процессы и аппараты химической технологии»**

**для студентов направления подготовки 15.03.02**

**Бугульма, 2022**

Необходимо выполнить расчет насадочного декарбонизатора (десорбера). Варианты определяются по двум последним цифрам шифра (номера зачетной книжки). Работы, выполненные не по своему варианту, рассматриваться не будут. При выполнении контрольной работы необходимо:

- выписать условие задачи;

- решение сопровождать краткими пояснениями, в которых показать, какая величина определяется и по какой формуле, какие величины подставляются в формулу и откуда они берутся (например, из условия задачи, из справочника, определены ранее\*;

- проставить размерности (в системе СИ);

- сформулировать краткие выводы по результатам расчётов.

Выполненные задания должны быть сданы на проверку до начала сессии.

Контрольная работа принимается, если она не содержит ошибок принципиального характера, и защищается при личной беседе с преподавателем. Если работа выполнена неверно, она возвращается с указаниями для исправления. Не разрешается вносить исправления в первоначальный текст. Новое решение прилагается к выполненному ранее.

1. Общие положения

Наиболее эффективный способ удаления растворенных газов из воды – десорбция. Этот способ основан на известных законах Генри – Дальтона, характеризующих зависимость между концентрацией в воде растворенного газа и его парциальным давлением. Применение этих законов дает возможность определить концентрацию при том условии, что в паровом пространстве над водой находится лишь рассматриваемый газ и отсутствуют другие газы. Концентрация растворенного в воде газа выражается уравнением:

, (1)

где  – концентрация растворенного в воде газа;  – коэффициент абсорбции газа водой;  – общее давление; – парциальное давление водяного пара;  – парциальное давление газа.

Как видно из уравнения (1), понижение концентрации газа в воде происходит с уменьшением разности  – , т.е. в случае приближении парциального давления водяных паров к значению полного давления газовой смеси. Это достигается созданием над поверхностью воды, содержащей рассматриваемый газ, смеси газов, в составе которой практически отсутствует удаляемый из воды газ. Таким образом, для удаления газа из воды необходимо создать условия, при которых парциальное давление его над поверхностью воды было бы равно нулю.

Количество удаляемого газа  можно определить по уравнению массопередачи

, (2)

где  – коэффициент массопередачи,  – поверхность массопередачи,  – средняя движущая сила массопередачи,  – плотность газа.

Коэффициент массопередачи  связан с коэффициентами массоотдачи  выражением:

, (3)

где  – константа фазового равновесия.

Условно газы подразделяются на хорошо, умеренно и плохо растворимые в жидкостях. Так, в зависимости от константы фазового равновесия *m*, коэффициентов массоотдачи в жидкой  и газовой  фазах один и тот же газ может вести себя и как хорошо, и как плохо растворимый. В уравнении (3), член  выражает сопротивление газовой фазе, а  – сопротивление жидкой. В качестве приближенной ориентировки при *m*<1 газы можно рассматривать как хорошо растворимые, при *m* > 100, так плохо растворимые, а при *m* = 1 – 100 – как умеренно растворимые. Примерами хорошо растворимых газов являются NH3 и HCl, плохо растворимым СО2.

**2. Классификация декарбонизаторов**

По принципу образования межфазной поверхности все известные типы декарбонизаторов можно разделить на две группы: аппараты с *фиксированной* поверхностью контакта фаз и аппараты со *свободной* поверхностью контакта, образующейся в процессе взаимодействия воды и воздуха [1-4]. К первой группе относятся декарбонизаторы насадочного типа, ко второй – распылительные, эжекционные, пенные, барботажные декарбонизаторы. Отметим, что при определенных гидродинамических режимах, например, при возникновении в насадке барботажа, насадочные аппараты также могут быть отнесены ко второй группе декарбонизаторов.

Декарбонизаторы классифицируют также по применяемому в них способу распределения обрабатываемой воды в воздухе или воздуха в воде: *пленочные*, *капельные*, *барботажные*, *пенные*. Пленочные декарбонизаторы, в свою очередь, подразделяют по типу укладка насадки: с упорядоченной деревянной хордовой насадкой, с неупорядоченной насадкой из керамических колец Рашига, седел Инталокс и др. Из капельных декарбонизаторов наиболее известны вакуумно-эжекционные и распылительные аппараты. В качестве декарбонизаторов могут также применяться вакуумные деаэраторы со струйным и барботажным способами распределения воды и пара, который служит в них десорбирующим агентом.

Классификация декарбонизаторов по схеме движения воды и воздуха включает две группы аппаратов: *противоточные* и *прямоточные*. Противоточная схема движения воды и воздуха принята в насадочных, барботажных и пенных декарбонизаторах, а также в применяемых вместо декарбонизаторов струйно-барботажных вакуумных деаэраторах. К прямоточным декарбонизаторам относятся распылительные и вакуумно-эжекционные аппараты.

По числу ступеней десорбции СО2 декарбонизаторы подразделяются на *одноступенчатые* и *многоступенчатые*. Одноступенчатыми обычно выполняются насадочные и распылительные декарбонизаторы. Вакуумно-эжекционные, пенные и отдельные конструкции прямоточных распылительных декарбонизаторов являются многоступенчатыми аппаратами.

**Противоточные насадочные декарбонизаторы**

Декарбонизаторы насадочного типа представляют собой колонны, в которых на опорные решетки устанавливается упорядоченная (регулярная) или засыпается неупорядоченная насадка. Обрабатываемая вода стекает по насадке сверху вниз, а навстречу ей движется нагнетаемый вентилятором воздух (рис. 1). К наиболее широко применяемым простейшим регулярным насадкам относятся деревянная хордовая насадка и кольцевая (при правильной укладке колец). В некоторых зарубежных странах хордовую насадку выполняют из пластмасс и металла. В качестве элементов в неупорядоченной насадке обычно применяются кольца в виде полых цилиндров, высота которых равна наружному диаметру (кольца Рашига). Помимо колец Рашига существуют и другие виды насадочных тел.

В табл. 1 приведены характеристики некоторых типов неупорядоченной насадки [3].

Таблица 1. Характеристики насадок

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Насадки | , м2/м3 | , м3/м3 | , м | число штук в 1 м3 | масса  1 м3, кг |
| Керамические кольца Рашига  10×10×1,5 мм  15×15×2 мм  25×25×3 мм  35×35×4 мм  50×50×5 мм | 440  330  200  140  90 | 0,7  0,7  0,74  0,78  0,785 | 0,006  0,009  0,015  0,022  0,035 | 700000  220000  50000  18000  6000 | 700  690  530  530  530 |
| Стальные кольца Рашига  10×10×0,5 мм  15×15×0,5 мм  25×25×0,8 мм  50×50×1 мм | 500  350  220  110 | 0,88  0,92  0,92  0,95 | 0,007  0,012  0,017  0,035 | 770000  240000  55000  7000 | 960  660  640  430 |
| Керамические кольца Палля  25×25×3 мм  35×35×4 мм  50×50×5 мм  60×60×6 мм | 220  165  120  96 | 0,74  0,76  0,78  0,79 | 0,014  0,018  0,026  0,033 | 46000  18500  5800  3350 | 610  540  520  520 |
| Стальные кольца Палля  15×15×0,4 мм  25×25×0,6 мм  35×35×0,8 мм  50×50×1 мм | 380  235  170  108 | 0,9  0,9  0,9  0,9 | Продолжение табл. 1  0,01  0,015  0,021  0,033 | 230000  52000  18200  6400 | 525  490  455  415 |
| Керамические седла Берля  12,5 мм  25 мм  38 мм | 460  260  165 | 0,68  0,69  0,7 | 0,006  0,011  0,017 | 570000  78000  30500 | 720  670  670 |
| Керамические седла Инталокс  12,5 мм  19 мм  25 мм  38 мм | 625  335  255  195 | 0,78  0,77  0,775  0,81 | 0,005  0,009  0,012  0,017 | 730000  229000  84000  25000 | 545  560  545  480 |

Размер колец Рашига в декарбонизаторах традиционно принимается равным 25×25×3 мм. Кольца засыпаются на поддерживающую решетку, обеспечивающую равномерный слив воды по сечению насадки и равномерное распределение воздуха под решеткой. Решетка обычно располагается на расстоянии 600 мм от дна колонки. Обрабатываемая вода поступает на насадку через водораспределительное устройство, которое обычно представляет собой плиту, имеющую 48 патрубков для слива воды в насадку и 8 патрубков для выхода выпара (увлажненного воздуха, насыщенного десорбированным из воды диоксидом углерода). Высота патрубков для слива воды (над поверхностью плиты) принимается равной 100 мм, а для выпуска выпара – 400 мм. Диаметры патрубков зависят от производительности декарбонизатора.

3. Пример выполнения задания [4]

Рассчитаем насадочный десорбер с кольцами Рашига 25х25 для удаления растворенного углекислого газа из питательной воды системы водоснабжения. Расход исходной жидкости  = 79 832 кг/ч; давление в аппарате атмосферное; температура в аппарате  = 60 °С; начальное содержание поглощаемого компонента в исходной смеси = 47,72 мг/кг; конечное содержание  = 4 мг/кг. Начальное содержание поглощаемого компонента в потоке газа  = 0,00046 кг/кг. Насадка уложена внавал.



Рис. 1. Схема насадочного декарбонизатора:

1 – опорная решетка; 2 – слой насадки; 3 – распределитель жидкости

Необходимо определить диаметр аппарата , высоту слоя насадки  и расход газового поглотителя  при заданной конструкции и размерах насадочных элементов. Окончательный выбор насадки выполняется после технико-экономического анализа.

Схема рассчитываемого декарбонизатора представлена на рис. 1.

**Материальный баланс**

Степень извлечения (или отгонки) процесса десорбции определяется:

,

где ****= 47,72 мг/кг = 47,72 ⋅ 10-6 кг/кг, **** = 4 мг/кг = 4 ⋅ 10-6 кг/кг

Количество переданной массы *M* компонента из газовой фазы в жидкую равно:

кг/с,

*L* – массовый расход жидкой смеси на входе, кг/с, *L* = 79832 кг/ч = 22,175 кг/с

Расход газового поглотителя согласно известным рекомендациям, принимается равным

кг/с.

Коэффициент распределения (константа фазового равновесия) при постоянной температуре и давлении определяется по соотношению

**,**

где *E* = 2,59 ⋅ 10 6 мм.рт.ст – константа Генри, зависящая от температуры и от природы газа и жидкости. *P* = 760 мм рт.ст – общее давление смеси газов или паров равное сумме парциальных давлений всех компонентов.

Составы газа и жидкости выражены в относительных массовых концентрациях, поэтому коэффициент распределения умножается на поправочный множитель

,

где  – молекулярная масса газовой смеси, кмоль/кг; – молекулярная масса жидкой смеси, кмоль/кг.

Из уравнения материального баланса определяется значение *Y*к:

****кг/кг.

**Расчет скорости газа и диаметра аппарата**

Фиктивную скорость газа в точке захлебывания () можно определить из решения известного уравнения:

**,**

где  = 200 м2/м3 – удельная поверхность насадки м2/м3; g = 9,8 м/с2 – ускорение свободного падения;  = 0,74 м3/м3 – свободный объем насадки;  = 0,4688 мПа·с – динамический коэффициент вязкости жидкости;  = 1,293 ⋅ 273 / 333 = 1,06 кг/м3,  = 983 кг/м3 – плотность газа и жидкости, соответственно.

Значения коэффициентов *A*1 и *B*1 в зависимости от типа насадки даны в табл. 2 [5].

Таблица 2. Значения коэффициентов *A*1 и *B*1 в зависимости от типа насадки

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Тип насадки | *А*1 | *В*1 |
| Кольца Рашига внавал | - 0,073 | 1,75 |
| Кольца Палля внавал | - 0,49 | 1,04 |
| Седла размером 25 мм | - 0,33 | 1,04 |
| Седла размером 50 мм | - 0,58 | 1,04 |

Фиктивная скорость газа равна:

.

После вычислений имеем:

,

Отсюда находится:

** = 0,629 м/с.

Рабочая (фиктивная) скорость газа *W*:

 = 0,8 ⋅ 0,629 = 0,5032 м/с,

при *b* = 0,8.

Диаметр колонны :

м.

Из таблицы 3 выбирается ближайший стандартный диаметр колонны = 1,6 м и пересчитывается рабочая скорость газа:

****м/с,

** =** 2 м2 – площадь поперечного сечения колонны

Таблица 3. Нормальный ряд диаметров колонн для химической промышленности

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *D*гост , м | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,2 | 2,6 | 3 |

Расчет движущей силы массопередачи и числа единиц переноса

Первоначально рассчитываются движущие силы массопередачи внизу десорбера:

 = 0,00846 – 0,00046 = 0,008,

вверху десорбера:

= 0,1009 – 0,00147 = 0,09943,

где  = 0,1009 кг/кг – равновесная с жидкостью состава  концентрация компонента в газе,  = 2115,24⋅4⋅10-6 = 0,00846 – равновесная концентрация компонента в газовой фазе на входе в аппарат, кг/кг.

Средняя движущая сила массопередачи

 кг/кг.

Число единиц переноса  равно:

.

**Расчет коэффициента массопередачи**

Коэффициенты массоотдачи в газовой и жидкой фазах можно определить по теоретическим [4, 6] или эмпирическим зависимостям [3, 5], например вида:

Для газовой фазы:

,

*D*г – коэффициент диффузии поглощаемого компонента в газе, м2/с.

,

где *P* – абсолютное давление, кгс/см2, ,  – мольные объемы газов, , – мольные массы газов.

Критерий Рейнольдса:

**,**

где  – плотность газа;  – динамический коэффициент вязкости газа, мПа⋅с.

Диффузионный критерий Прандтля:

**.**

Подставляя значения, получаем значение числа Нуссельта:

**,**

и коэффициента масоотдачи:

м/с,

где эквивалентный диаметр:

** = 4⋅0,74 / 200 = 0,0148 м.

Для жидкой фазы используется критериальное выражение:

.

Коэффициент диффузии СО2 в жидкости:



Число Рейнольдса:

.

Число Прандтля:

.

Число Нуссельта:

.

Коэффициент массоотдачи:

м/с,

где приведенная толщина пленки жидкости:

 = ((0,4688 ⋅ 10-3) 2 / 9832 ⋅ 9,8)1/3 = 2,85 ⋅ 10-5 м.

При известных значениях  и  вычисляется коэффициент массопередачи (3):

 м/с.

Определение высоты и поверхности насадочного слоя

При известном значении *K*ог высота единиц переноса *h*ог вычисляется по выражению:

.

Коэффициент активной поверхности массопередачи:

,

 = 0,83 ⋅ = 0,535.

массовая скорость жидкости:

 кг/(м2с),

м3/(м2час) – плотность орошения,

σ = 0,0662. В расчете 66,2 мН/м – коэффициент поверхностного натяжения воды.

Значения параметров *А*3, *b*3 и p3 для различных типов насадок приводятся в табл. 4.

Таблица 4. Значения параметров в зависимости от типа насадки

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Тип насадки | *A*3 | *b*3 | *p*3 |
| Кольца | 2,26 | 0,83 | 0,48 |
| Седла | 0,767 | 0,495 | 0,98 |

Высота слоя насадки *H* в десорбере:

 = 27,8 ⋅ 0,03 = 0,8 м.

Поверхность массопередачи *F* равна:

= 200 ⋅ 0,715⋅ 2 ⋅ 0,8 = 235,66 м2.

Поверхность массопередачи по основному уравнению массопередачи (2):

м2.

Значения *F*, полученные по обоим выражениям, согласуются с погрешностью 1,31 %, следовательно, расчет выполнен правильно.

**Варианты для расчета**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вариант | , т/ч | **,**  °С | **,**  мг/кг | **,**  мг/кг | **,**  кг/кг | Размер насадки |
| 1 | 100 | 62 | 50 | 4,1 | 0,00047 | 35×35 |
| 2 | 120 | 64 | 45 | 3,9 | 0,00050 | 25×25 |
| 3 | 140 | 61 | 40 | 3,8 | 0,00048 | 35×35 |
| 4 | 160 | 63 | 35 | 3,7 | 0,00049 | 15×15 |
| 5 | 180 | 65 | 50 | 4,3 | 0,00051 | 10×10 |
| 6 | 200 | 59 | 45 | 4,2 | 0,00045 | 35×35 |
| 7 | 220 | 57 | 40 | 4,0 | 0,00044 | 25×25 |
| 8 | 240 | 66 | 35 | 3,6 | 0,00043 | 15×15 |
| 9 | 260 | 68 | 50 | 4,4 | 0,00052 | 10×10 |
| 10 | 280 | 55 | 45 | 4,3 | 0,00050 | 35×35 |
| 11 | 300 | 57 | 40 | 4,2 | 0,00049 | 25×25 |
| 12 | 320 | 56 | 35 | 3,5 | 0,00048 | 15×15 |
| 13 | 340 | 63 | 50 | 4,4 | 0,00047 | 10×10 |
| 14 | 360 | 65 | 45 | 4,0 | 0,00045 | 25×25 |
| 15 | 380 | 59 | 40 | 3,8 | 0,00047 | 15×15 |
| 16 | 115 | 61 | 50 | 4,1 | 0,00047 | 35×35 |
| 17 | 125 | 63 | 45 | 3,9 | 0,00050 | 25×25 |
| 18 | 135 | 64 | 40 | 3,8 | 0,00048 | 35×35 |
| 19 | 145 | 60 | 35 | 3,7 | 0,00049 | 15×15 |
| 20 | 155 | 65 | 50 | 4,3 | 0,00051 | 10×10 |
| 21 | 175 | 59 | 45 | 4,2 | 0,00045 | 35×35 |
| 22 | 210 | 58 | 40 | 4,0 | 0,00044 | 25×25 |
| 23 | 230 | 60 | 35 | 3,6 | 0,00043 | 15×15 |
| 24 | 250 | 61 | 50 | 4,4 | 0,00052 | 10×10 |
| 25 | 270 | 63 | 45 | 3,5 | 0,00048 | 15×15 |

**список использованных источников**

1. Шарапов В.И., Сивухина М.А. Декарбонизаторы. Ульян. гос. техн. ун-т. – Ульяновск: УлГТУ, 2000.

2. Лаптев А.Г., Шигапов И.М., Данилов В.А. Устройство и расчет насадочных декарбонизаторов в водоподготовке: Учеб. пособие / Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2002 г.

3. Рамм В.М. Абсорбция газов. Изд. 2-е. М.: Химия, 1976.

4. Лаптев А.Г., Минеев Н.Г. Разделение жидких и газовых гомогенных смесей в тарельчатых и насадочных аппаратах. Учеб. пособие / Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2005 г.

5. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1976.

6. Дьяконов С.Г., Елизаров В.И., Лаптев А.Г. Теоретические основы и моделирование процессов разделения веществ. Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 1993.