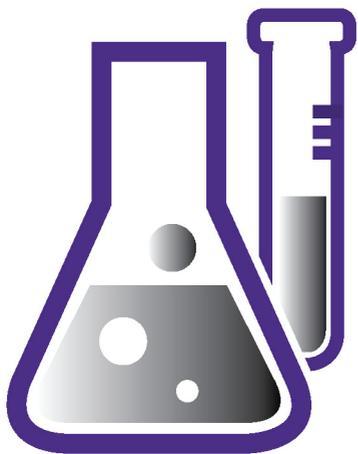


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Институт химии и энергетики

Ю.Н. Орлов, С.А. Соков

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ И БИОТЕХНОЛОГИИ



Практикум



© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2021

ISBN 978-5-8259-1514-2

УДК 661(075.8)

ББК 36

Рецензенты:

канд. техн. наук, директор ООО «Экохим Технологии»

П.П. Капустин;

канд. техн. наук, доцент кафедры «Химия, химические процессы и технологии» Тольяттинского государственного университета *О.С. Авдякова.*

Орлов, Ю.Н. Процессы и аппараты в химической технологии и биотехнологии : практикум / Ю.Н. Орлов, С.А. Соков. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2021. – 1 оптический диск. – ISBN 978-5-8259-1514-2.

Практикум представляет собой руководство к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Процессы и аппараты в химической технологии и биотехнологии». В нем приведены основные требования к организации лабораторных работ и оформлению результатов работы. Представлены наиболее существенные аспекты гидромеханических, теплообменных и массообменных процессов химической технологии.

Предназначен для студентов очной и заочной форм обучения по направлениям подготовки бакалавров 18.03.01 «Химическая технология» и 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».

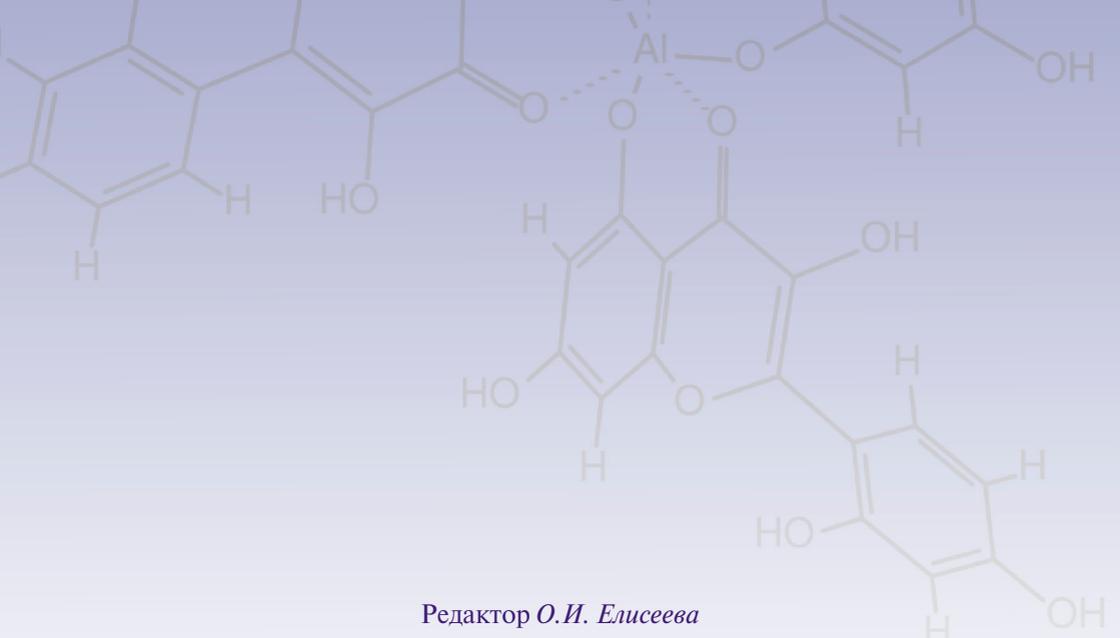
В издании использован иллюстративный материал из лабораторного практикума «Процессы и аппараты химической технологии» (Афанасьев Н.Д. (сост.). Тольятти, 2007).

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; ПИИ 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2021



Редактор *О.И. Елисеева*
Корректор *Е.В. Ахмадуллина*
Технический редактор *Н.П. Крюкова*
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*
Художественное оформление,
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

Дата подписания к использованию 12.03.2021.

Объем издания 4 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-49-19.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 53-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

Введение	5
Лабораторная работа 1. Гидростатическое давление и его измерение	6
Лабораторная работа 2. Осаждение твёрдых частиц в жидкой среде	11
Лабораторная работа 3. Определение констант фильтрации суспензии через пористую перегородку	16
Лабораторная работа 4. Механическое перемешивание в жидкой среде с определением мощности, необходимой для вращения мешалки	21
Лабораторная работа 5. Изучение гидродинамики зернистого слоя	28
Лабораторная работа 6. Изучение конструкции теплообменных аппаратов с определением их коэффициентов теплопередачи	36
Лабораторная работа 7. Изучение процесса теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе»	48
Лабораторная работа 8. Изучение процесса абсорбции углекислого газа водой в насадочной колонне	57
Лабораторная работа 9. Определение температуры кипения смеси четыреххлористого углерода, бензола и воды	62
Лабораторная работа 10. Изучение процесса ректификации	68
Лабораторная работа 11. Изучение гидродинамики насадочной колонны	79
Лабораторная работа 12. Изучение гидродинамики аппарата с ситчатыми тарелками	85
Лабораторная работа 13. Изучение гидродинамики колонны с колпачковыми тарелками	90
Приложение	95

Введение

Всё многообразие основных процессов химической технологии в зависимости от закономерностей их протекания можно свести к пяти основным группам: гидромеханические, теплообменные, массообменные, механические, химические.

Гидромеханические процессы — это процессы, скорость протекания которых определяется законами механики и гидродинамики. К ним относятся процессы перемещения жидкостей и газов по трубопроводам и аппаратам, перемешивания в жидких средах, разделения суспензий и эмульсий путем отстаивания, фильтрования, центрифугирования, псевдооживления зернистого материала.

Теплообменные процессы связаны с переносом теплоты от более нагретых тел (или сред) к менее нагретым. К ним относятся процессы нагревания, охлаждения, конденсации, выпаривания и т. п. Скорость тепловых процессов определяется законами теплопередачи.

Массообменные процессы связаны с переносом вещества в различных агрегатных состояниях из одной фазы в другую. К ним относятся абсорбция и десорбция, перегонка и ректификация, экстракция, адсорбция, растворение, кристаллизация, увлажнение, сушка, сублимация, ионный обмен и др. Скорость массообменных процессов определяется законами массопередачи.

Механические процессы — это процессы чисто механического взаимодействия тел. К ним относятся процессы измельчения, классификации сыпучих материалов, прессования и др.

Химические процессы связаны с изменением химического состава и свойств вещества. Скорость протекания химических процессов определяется законами химической кинетики.

Охватить всё многообразие процессов, осуществляемых в химических производствах, в одном или даже нескольких лабораторных практикумах не представляется возможным. В данном издании представлены лишь 13 лабораторных работ, выполнение которых предполагается осуществлять на простых лабораторных установках. В ходе их выполнения студенты получают представление о некоторых процессах и методах их расчетов, научатся самостоятельно делать выводы и обобщения по их проведению и протеканию. Согласно вышеуказанной классификации основных процессов в практикуме подобраны лабораторные работы, относящиеся к гидромеханическим, теплообменным и массообменным процессам.

Лабораторная работа 1

Гидростатическое давление и его измерение

Цель работы – определить избыточное давление, вакуум (разрежение) и абсолютное давление воздуха на поверхности жидкости по показаниям U -образного пьезометра; усвоить единицы измерения давления в различных системах (СИ, СГС, МКГСС) и их взаимосвязь.

Основные понятия и расчётные формулы

Полное или абсолютное гидростатическое давление в любой точке покоящейся жидкости определяется по основному уравнению гидростатики:

$$p = p_0 + \rho gh \quad \text{или} \quad p = p_0 + \gamma h, \quad (1.1)$$

где p – абсолютное (полное) гидростатическое давление; p_0 – абсолютное давление на свободной поверхности жидкости; γ – удельный (объёмный) вес жидкости; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; h – глубина погружения точки под уровень жидкости.

Согласно уравнению (1.1) расчёт абсолютного гидростатического давления сводится к определению абсолютного давления на поверхности жидкости p_0 в соответствующих единицах измерения (удельный вес γ или плотность ρ , а также глубина погружения точки h задаются исходными данными).

Абсолютное давление – это давление, отсчитанное от абсолютного нуля (полного вакуума) подобно тому, как отсчитывается температура по шкале Кельвина. В технике промышленных измерений давления отсчёт ведут от относительного нуля – атмосферного давления. Давление выше атмосферного измеряют манометрами и называют избыточным или манометрическим. Давление ниже атмосферного измеряют вакуумметрами и называют остаточным давлением.

На рис. 1.1 можно проследить пределы изменения и взаимосвязь абсолютного давления $p_{\text{абс}}$, избыточного $p_{\text{изб}}$ и вакуума $p_{\text{вак}}$:

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}}; \quad p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} - p_{\text{изб}}. \quad (1.2)$$

В открытых сосудах абсолютное давление на поверхности жидкости равно атмосферному давлению.

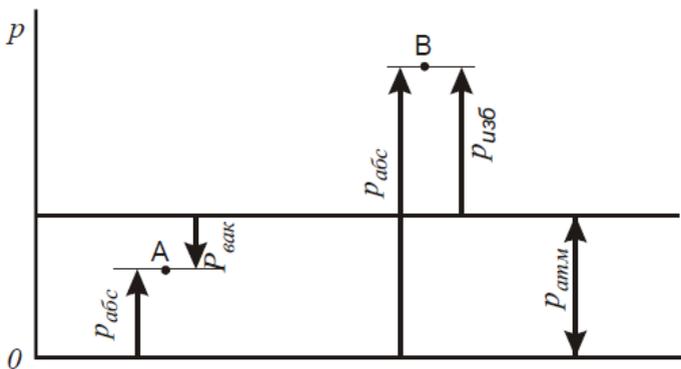


Рис. 1.1. Взаимосвязь избыточного, абсолютного давления и вакуума

Применяемые в гидротехнической практике единицы измерения давления взаимосвязаны следующим образом: $1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ ат}$ (техническая атмосфера) $= 10\,000 \text{ кгс/м}^2 = 98\,067 \text{ Н/м}^2 = 0,098 \text{ МПа} = 0,98 \text{ бар} = 0,9678 \text{ атм}$.

Абсолютное и избыточное давления, выраженные в технических атмосферах, обозначаются соответственно ата или ати (например, $p = 2 \text{ ата}$, $p = 3 \text{ ати}$ и т. п.).

Давление может быть выражено высотой столба жидкости над рассматриваемой точкой. Высота столба жидкости определяется по формуле

$$h = \frac{P}{\gamma} = \frac{P}{\rho g}. \quad (1.3)$$

Из формулы (1.3) следует, что одно и то же давление в зависимости от удельного веса жидкости может быть создано столбом различной высоты. Так, 1 ат (техническая атмосфера) соответствует 10 м вод. ст. (при удельном весе воды γ , равном 1000 кгс/см^3) или 735,56 мм рт. ст. (при удельном весе ртути $13\,600 \text{ кгс/см}^3$).

Описание лабораторной установки

Для измерения избыточного давления и вакуума в лабораторной установке (рис. 1.2) предусмотрен замкнутый резервуар 1 с крапом К, заполненный воздухом и соединённый резиновым шлангом с подвижным резервуаром 2, частично заполненным водой. Таким образом, резервуары 1 и 2 являются сообщающимися сосудами.

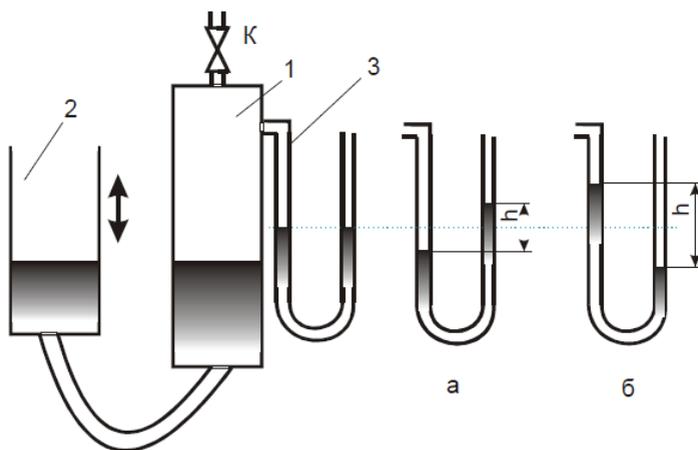


Рис. 1.2. Схема лабораторной установки для измерения избыточного давления и вакуума

Если кран K открыт, то давление в резервуаре равно атмосферному и положения уровней жидкости в правом и левом коленях U -образного пьезометра 3 одинаковы.

После закрытия крана и перемещения резервуара 2 вверх над жидкостью в резервуаре 1 создаётся избыточное давление за счёт перелива жидкости из резервуара 2 в резервуар 1 . Это избыточное давление измеряется разностью уровней жидкости в правом и левом коленях U -образного пьезометра (рис. 1.2, *а*).

При закрытом кране на резервуаре 1 и перемещении резервуара 2 вниз из-за перелива части жидкости из резервуара 1 в резервуар 2 в замкнутом пространстве резервуара 1 создаётся вакуум. Величина вакуума измеряется также U -образным пьезометром (рис. 1.2, *б*).

Порядок выполнения работы

1. При открытом кране K установить положение резервуаров 1 и 2 в соответствии с рис. 1.2.

2. Долить воды в U -образный пьезометр до нулевой отметки в обеих трубках. При переливе избыток удалить фильтровальной бумагой.

3. Закрыть кран K и создать избыточное давление в замкнутом пространстве резервуара 1 . Записать в журнал наблюдения величины

ну h (рис. 1.2, *a*), характеризующую избыточное давление. Провести 2–3 опыта, изменяя избыточное давление. Полученные результаты занести в табл. 1.1.

4. Перемещая резервуар 2, создать вакуум в замкнутой воздушной области резервуара 1; измерить его величину по пьезометру 3 (рис. 1.2, *б*). Так же, как и в случае избыточного давления, провести 2–3 опыта, меняя величину вакуума. Опытные данные занести в табл. 1.2.

5. Рассчитать абсолютное давление в замкнутой воздушной области внутри резервуара 1 для всех опытов по формулам (1.2), полученные значения занести в табл. 1.1 и 1.2. Атмосферное давление принять равным одной технической атмосфере.

Таблица 1.1

Расчёт абсолютного давления воздуха по избыточному давлению

Атмосферное давление			Избыточное давление				Абсолютное давление	
м вод. ст.	кгс/м ²	Н/м ²	мм вод. ст.	м вод. ст.	кгс/м ²	Н/м ²	кгс/м ²	Н/м ²

Таблица 1.2

Расчёт абсолютного давления воздуха при наличии вакуума

Атмосферное давление			Разрежение (вакуум)				Абсолютное давление	
м вод. ст.	кгс/м ²	Н/м ²	мм вод. ст.	м вод. ст.	кгс/м ²	Н/м ²	кгс/м ²	Н/м ²

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель и задачи работы, задание, экспериментальные результаты, расчётные материалы.

Экспериментальные результаты представляют в виде таблиц со всеми промежуточными значениями. Расчётные результаты приводят с подробным изложением всех рассуждений, допущений и ис-

пользуемых формул, подставляя все численные значения в формулы. Окончательные результаты оформляют в виде итоговой таблицы.

Заключительной частью отчета являются выводы обо всех результатах исследований (экспериментальных и расчётных).

Вопросы для самоконтроля

1. Цель лабораторного исследования.
2. Гидростатическое давление и его свойства.
3. Основное уравнение гидростатики.
4. Единицы измерения давления и их взаимосвязь.
5. Понятия абсолютного и избыточного давления, вакуума.
6. Устройство и принцип действия приборов для измерения атмосферного, избыточного давлений, вакуума, перепада давлений.

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. — 13-е изд. — М. : Альянс, 2006. — С. 21–29.
2. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды : учеб. пособие. — М. : ИНФРА-М, 2014. — С. 42–50.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : учеб. пособие для вузов. — 4-е изд. — СПб. : Химиздат, 2017. — С. 9–17.

Лабораторная работа 2

Осаждение твёрдых частиц в жидкой среде

Цель работы — приобрести навыки экспериментального определения режимов разделения неоднородных систем на примере осаждения твёрдых частиц в водоглицериновом растворе, углубить и закрепить теоретические знания об этих режимах и методах расчёта.

Основные понятия и расчётные формулы

Скорость осаждения частиц определяется условием равенства сил, действующих на частицу: силы сопротивления R и силы тяжести G .

Сила сопротивления среды в общем случае определяется по закону Ньютона

$$R = \xi F \rho_c \frac{w_{oc}^2}{2}, \quad (2.1)$$

где ξ — коэффициент сопротивления; F — площадь проекции поперечного сечения частицы на направление её движения, м²; ρ_c — плотность среды, кг/м³; w_{oc} — скорость осаждения, м/с.

Для частиц шарообразной формы

$$R = \xi \frac{\pi d^2}{4} \rho_c \frac{w_{oc}^2}{2}, \quad (2.2)$$

где d — диаметр частицы, м.

Сила тяжести, действующей на шарообразную частицу в газообразной или жидкой среде,

$$G = \frac{\pi d^3}{6} g (\rho - \rho_c), \quad (2.3)$$

где g — ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с²; ρ — плотность частицы, кг/м³.

Из равенства $R = G$ следует

$$w_{oc} = \sqrt{\frac{4gd(\rho - \rho_c)}{3\xi\rho_c}}. \quad (2.4)$$

Для частиц, форма которых отличается от шарообразной, в формулах (2.2)–(2.4) используют эквивалентный диаметр d_3 , который вычисляют по формуле

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} = 1,243 \sqrt[3]{\frac{M}{\rho}}, \quad (2.5)$$

где V – объём нешарообразной частицы, м^3 ; M – масса частицы, кг ; ρ – плотность частицы, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Осаждение может идти в одном из трёх режимов: ламинарном, переходном или турбулентном. Переход от одного режима осаждения к другому соответствует определённому значению безразмерной величины, называемой числом (или критерием) Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{w_o \cdot d_o \cdot \rho_c}{\mu_c}, \quad (2.6)$$

где μ_c – динамическая вязкость среды (жидкости или газа), $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Ламинарный режим характеризуется значением $\text{Re} \leq 2$; для переходного режима $2 < \text{Re} \leq 500$, а для турбулентного – $\text{Re} > 500$. Коэффициент сопротивления ξ является функцией критерия Рейнольдса и для указанных гидродинамических режимов составляет соответственно $24/\text{Re}$; $18,5/\text{Re}^{0,6}$ и $0,44$.

При ламинарном режиме осаждения формула (2.4) преобразуется в формулу Стокса:

$$w_{\text{ос}} = \frac{gd_o^2(\rho - \rho_c)}{18\mu_c}. \quad (2.7)$$

При турбулентном режиме

$$w_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{3,03gd_o(\rho - \rho_c)}{\rho_c}}. \quad (2.8)$$

В случае переходного режима

$$w_{\text{ос}} = 1,4 \sqrt{\frac{0,072gd_o^{1,6}(\rho - \rho_c)}{\rho_c^{0,4} \mu_c^{0,6}}}. \quad (2.9)$$

Однако установить режим осаждения по значению числа Re не представляется возможным, поскольку число Re является функцией скорости осаждения w_o , а численное значение последней неизвестно (её только требуется определить). Получается замкнутый круг: для нахождения скорости необходимо знать численное значение числа Рейнольдса, которое, в свою очередь, является функцией скорости осаждения. Поэтому для определения режима осаждения прибегают к другому числу, которое называется числом Архимеда:

$$\text{Ar} = \frac{g \cdot d_o^3 \cdot (\rho - \rho_c) \cdot \rho_c}{\mu_c^2}. \quad (2.10)$$

При значении $Ag \leq 36$ режим осаждения ламинарный. При $36 < Ag \leq 83\,000$ режим переходный, а при $Ag > 83\,000$ режим турбулентный.

Программа работы

Необходимо экспериментально найти скорость осаждения частиц неправильной формы в водоглицериновом растворе. Эту же скорость осаждения требуется рассчитать теоретически, используя формулы предыдущего подраздела. Для выполнения расчёта по формулам (2.7)–(2.9) необходимо предварительно установить эквивалентный диаметр d_e частицы, измерить плотность раствора и его вязкость. Эквивалентный диаметр частицы вычисляется по формуле (2.5), предварительно масса частицы измеряется на аналитических весах (плотность частицы задана). Значение числа Архимеда можно рассчитать по формуле (2.10).

Материал частицы и концентрация глицерина в водном растворе в соответствии с индивидуальными заданиями представлены в таблице.

Варианты индивидуальных заданий

Вариант	Концентрация глицерина в водном растворе, % об.	Материал частицы и его плотность, кг/м ³
1	50	Сталь, 7800
2	50	Цеолит, 2400
3	50	Стекло, 2500
4	50	Крупа, 1600
5	40	Сталь, 7800
6	40	Цеолит, 2400
7	40	Стекло, 2500
8	40	Крупа, 1600
9	60	Цеолит, 2400
10	60	Крупа, 1600

Рекомендации по выполнению работы

Концентрацию раствора и тип частиц выбирают согласно варианту (см. табл. 2.1). Измерение плотности раствора осуществляют с помощью ареометра. Вязкость раствора устанавливают с помощью вискозиметра Хепплера. С этой целью раствором заполняют калиброванную трубку вискозиметра, вносят в трубку шарик и закрывают её крышкой. Поворачивают трубку на 180° , заставляя тем самым шарик опускаться к противоположному концу, и с помощью секундомера отмечают время прохождения шарика между двумя метками, нанесёнными на трубке. Динамическую вязкость раствора рассчитывают по формуле

$$\mu = \tau (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{р}}) k, \quad (2.11)$$

где μ – динамическая вязкость раствора, $\text{Па} \cdot \text{с}$; τ – время падения шарика, с; $\rho_{\text{ш}}$ и $\rho_{\text{р}}$ – плотности шарика и раствора, $\text{кг}/\text{м}^3$; k – постоянная шарика, $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$.

Экспериментальное определение скорости осаждения частицы в растворе ведут следующим образом. Раствор находится в мерном цилиндре, высота его слоя должна быть не менее 200 мм. На поверхность слоя аккуратно, с помощью пинцета, помещают частицу и с помощью секундомера фиксируют время её осаждения на дно цилиндра. Затем рассчитывают скорость осаждения:

$$w_{\text{ос}} = \frac{H}{\tau_{\text{ос}}}, \quad (2.12)$$

где H – путь, пройденный частицей, м; $\tau_{\text{ос}}$ – время осаждения, с.

Расчётное определение скорости осаждения частицы ведут по формулам 2.2–2.10.

Результаты измерений и расчетов вносят в итоговую таблицу.

Плотность частицы, $\text{кг}/\text{м}^3$	Эквивалентный диаметр частицы, м	Плотность среды, $\text{кг}/\text{м}^3$	Динамическая вязкость среды, $\text{Па} \cdot \text{с}$	Число Архимеда	Скорость осаждения, м/с	
					экспериментальная	расчётная

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель и задачи работы, задание, экспериментальные результаты, расчетные материалы.

Экспериментальные результаты представляют в виде таблиц со всеми промежуточными значениями. Расчётные результаты приводят с подробным изложением всех рассуждений, допущений и используемых формул, подставляя все численные значения в формулы. Окончательные результаты оформляют в виде итоговой таблицы.

Заключительной частью отчёта являются выводы обо всех результатах исследований (экспериментальных и расчётных).

Вопросы для самоконтроля

1. Под действием каких сил происходит осаждение?
2. Назовите режимы осаждения. Каким образом они определяются?
3. Какому режиму осаждения шарообразной частицы в неподвижной неограниченной среде соответствует значение числа Рейнольдса 100?
4. Чему равен эквивалентный диаметр шарообразной частицы?
5. Как плотность среды влияет на скорость осаждения частиц?
6. Что характеризует число Архимеда в процессах осаждения твёрдых частиц в жидких средах?
7. Как изменится формула для расчёта числа Архимеда при осаждении твёрдых частиц в газовой фазе?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. — 13-е изд. — М. : Альянс, 2006. — С. 202–209.
2. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды : учеб. пособие. — М. : ИНФРА-М, 2014. — С. 132–137.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : учеб. пособие для вузов. — 4-е изд. — СПб. : Химиздат, 2017. — С. 89–94.

Лабораторная работа 3

Определение констант фильтрования суспензии через пористую перегородку

Цель работы – закрепить знания по разделению неоднородных систем, к одной из разновидностей которых относятся суспензии, методом фильтрования через пористую перегородку и экспериментально определить константы фильтрования.

Основные понятия и расчётные формулы

Процессом фильтрования называют разделение суспензий с помощью пористой перегородки (фильтра), способной задерживать взвешенные частицы, находящиеся в жидкости.

В процессе фильтрования отделяемые частицы могут отлагаться в фильтре либо в виде осадка, либо забивая постепенно его поры. В соответствии с этим различают фильтрование с отложением осадка и фильтрование с забивкой пор фильтра.

Движущей силой процесса фильтрования является разница давлений перед фильтром и после него.

На практике фильтрование можно проводить либо при постоянном перепаде давления, либо с постоянной скоростью. Соответственно различают режим постоянной разности давлений и режим постоянной скорости.

Общее уравнение фильтрования (без забивки пор) имеет следующий вид:

$$\frac{dV}{Fd\tau} = \frac{\Delta P}{R} = \frac{\Delta P}{rxV/F + R_{\phi}}, \quad (3.1)$$

где V – объём фильтрата, м³; F – площадь фильтрующей перегородки, м²; τ – время фильтрования, с; ΔP – перепад давлений на фильтре, Н/м²; R – сопротивление фильтрованию; r – удельное сопротивление осадка; x – объём осадка, приходящийся на 1 м³ фильтрата; R_{ϕ} – сопротивление фильтрующей перегородки, Н/м².

Для режима постоянной разности давлений ($\Delta P = \text{const}$) из уравнения (3.1) после интегрирования в пределах $0-V$ и $0-\tau$ получим

$$\left(\frac{V}{F}\right)^2 + \frac{2R_{\phi}}{rx} \cdot \frac{V}{F} = \frac{2\Delta P}{rx} \tau. \quad (3.2)$$

Уравнение (3.2) приводится к виду

$$V_F^2 + 2V_F C = K\tau, \quad (3.3)$$

где V_F – объём фильтрата, приходящийся на 1 м² фильтра, м³/м²; C – константа фильтрования, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки, м³/м²; K – константа фильтрования, учитывающая режим процесса фильтрования и физико-химические свойства осадка и жидкости, м²/с; τ – время фильтрования.

Константы K и C определяются опытным путем. Скорость фильтрования, м³/(м² · с), в данный момент определяется по формуле

$$\frac{dV_F}{d\tau} = \frac{K}{2(V_F + C)}. \quad (3.4)$$

Видоизменённое уравнение (3.4)

$$\frac{d\tau}{dV_F} = \frac{2}{K}V_F + \frac{2C}{K}, \quad (3.5)$$

выражающее прямолинейную зависимость между величинами $d\tau/dV_F$ и V_F , применяется для определения констант C и K по экспериментальным данным. Для этой цели откладывают на оси абсцисс измеренные значения V_{F1}, V_{F2}, \dots , а по оси ординат – соответствующие измеренные значения $\Delta\tau_1/\Delta V_{F1}, \Delta\tau_2/\Delta V_{F2}, \dots$. Проведя по экспериментальным точкам прямую, находят K и C из уравнений:

$$\operatorname{tg} \beta = 2/K; \quad m = 2C/K, \quad (3.6)$$

где m – отрезок на оси ординат, отсекаемый построенной прямой; β – угол наклона построенной прямой.

Программа работы

Нужно рассчитать продолжительность фильтрования 100 дм³ жидкости (воды) через 1 м² фильтра, предварительно экспериментально определив константы фильтрования K и C согласно рекомендациям, изложенным в предыдущем подразделе. Исходную суспензию, состоящую из воды и карбоната кальция или сульфата бария, готовят искусственно, используя навеску согласно выбранному варианту.

Варианты индивидуальных заданий

Вариант	Материал твердой части суспензии	Масса твердой части суспензии, г	Объем воды в суспензии, мл	Величина вакуума, атм
1	Карбонат кальция	10	200	0,5
2	Карбонат кальция	6	200	0,4
3	Карбонат кальция	14	200	0,5
4	Карбонат кальция	10	250	0,4
5	Карбонат кальция	6	250	0,5
6	Сульфат бария	14	250	0,4
7	Сульфат бария	10	200	0,5
8	Сульфат бария	6	200	0,4
9	Сульфат бария	14	200	0,5
10	Сульфат бария	18	250	0,4

Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка (рис. 3.1) состоит из фильтровальной стеклянной воронки 1 с пористой фильтрующей перегородкой (фильтр Шотта № 2), склянки 2 для сбора фильтра, ресивера 3. Зажим 4 установлен на линии, соединяющей склянку и ресивер 3. Зажим 5 отключает склянку от атмосферы.

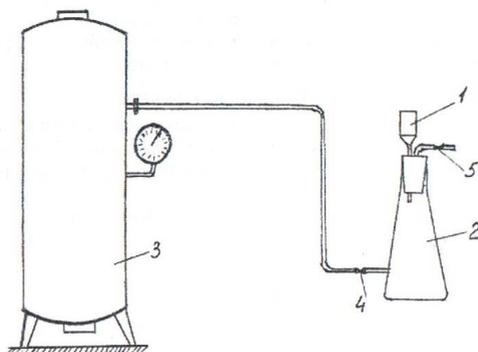


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки для определения скорости фильтрования

Порядок выполнения работы

1. Взять навеску карбоната кальция или сульфата бария (согласно варианту), приготовить суспензию смешением навески с водой и количественно перенести полученную суспензию в воронку 1.

2. Создать в склянке 2 вакуум, освободив зажим 4 (величина вакуума выбирается в соответствии с вариантом).

3. Профильтровать весь объём суспензии, при этом через каждые 1–2 мин делаются замеры объёма фильтрата (склянка 2 имеет шкалу).

4. Результаты измерений внести в итоговую таблицу.

Время t , с	Объём фильтрата V , м ³	Удельный объём V_F , м ³ /м ²	$\Delta\tau/\Delta V_F$, с · м ² /м ³

5. По результатам замера построить зависимость $\Delta\tau/\Delta V_F = f(V_F)$, по которой определить K и C , используя формулы (3.4)–(3.6).

6. По формуле (3.3) рассчитать время фильтрования 100 дм³ суспензии через 1 м² фильтра.

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель и задачи работы, задание, экспериментальные результаты, расчетные материалы.

Экспериментальные результаты представляют в виде таблиц со всеми промежуточными значениями. Расчётные результаты приводят с подробным изложением всех рассуждений, допущений и используемых формул, подставляя все численные значения в формулы. Окончательные результаты оформляют в виде итоговой таблицы.

Заключительной частью отчёта являются выводы обо всех результатах исследований (экспериментальных и расчётных).

Вопросы для самоконтроля

1. Что является движущей силой при фильтровании?
2. В чём сущность уравнения фильтрования при постоянной разности давлений?
3. В каких случаях используется основное дифференциальное уравнение скорости фильтрования?
4. Каким образом величина перепада давления ΔP влияет на скорость фильтрования?
5. Как изменяется перепад давления при проведении фильтрования в режиме постоянной скорости по мере увеличения продолжительности фильтрования?
6. Изменяется ли скорость промывки осадка после фильтрования в ходе её проведения?
7. Можно ли осуществлять фильтрование без забивки пор фильтрующей перегородки?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. — 13-е изд. — М. : Альянс, 2006. — С. 209–239.
2. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды : учеб. пособие. — М. : ИНФРА-М, 2014. — С. 150–167.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : учеб. пособие для вузов. — 4-е изд. — СПб. : Химиздат, 2017. — С. 94–97.

Лабораторная работа 4

Механическое перемешивание в жидкой среде с определением мощности, необходимой для вращения мешалки

Цель работы – закрепить знания по механическому перемешиванию в жидкой среде с помощью мешалок различных типов; экспериментально определить и рассчитать, используя теоретические зависимости, мощность, необходимую для вращения мешалки.

Основные понятия и расчётные формулы

Механическое перемешивание в жидкой среде осуществляется с помощью мешалок различного типа. Мешалки чаще всего представляют собой комбинацию лопастей, насаженных на вращающийся вал.

Лопастей мешалки могут иметь разнообразную геометрическую форму, в соответствии с которой различают типы мешалок: лопастные, пропеллерные, турбинные. Кроме этих основных мешалок существуют и другие, объединяемые в группу мешалок специального типа.

Интенсивность работы мешалок для обеспечения заданной эффективности перемешивания определяется на основании опытных данных. Поэтому основной задачей является подбор мешалок по типам, размерам и числу оборотов, с тем чтобы обеспечить требуемую интенсивность перемешивания, а также определить мощность двигателя для мешалки.

Как показывает опыт, при работе мешалок различного типа в аппарате возникают определённым образом направленные токи жидкости. Соответственно этому движение жидкости в аппарате с мешалкой можно рассматривать как движение жидкости по каналу, имеющему сложную геометрическую форму.

Движение жидкости по каналам в условиях, когда влиянием сил тяжести на движение можно пренебречь, характеризуется зависимостью $Eu_m = f(Re_m)$. Здесь Eu_m и Re_m – модифицированные числа Эйлера и Рейнольдса соответственно, которые определяют по формулам:

$$Eu_m = \frac{N}{\rho n^3 d^5}, \quad (4.1)$$

$$\text{Re}_M = \frac{nd^2\rho}{\mu}, \quad (4.2)$$

где d – диаметр мешалки, м; n – частота вращения мешалки, с^{-1} ; μ – вязкость жидкой среды, $\text{Па} \cdot \text{с}$; ρ – плотность жидкой среды, $\text{кг}/\text{м}^3$; N – мощность, потребляемая мешалкой, Вт.

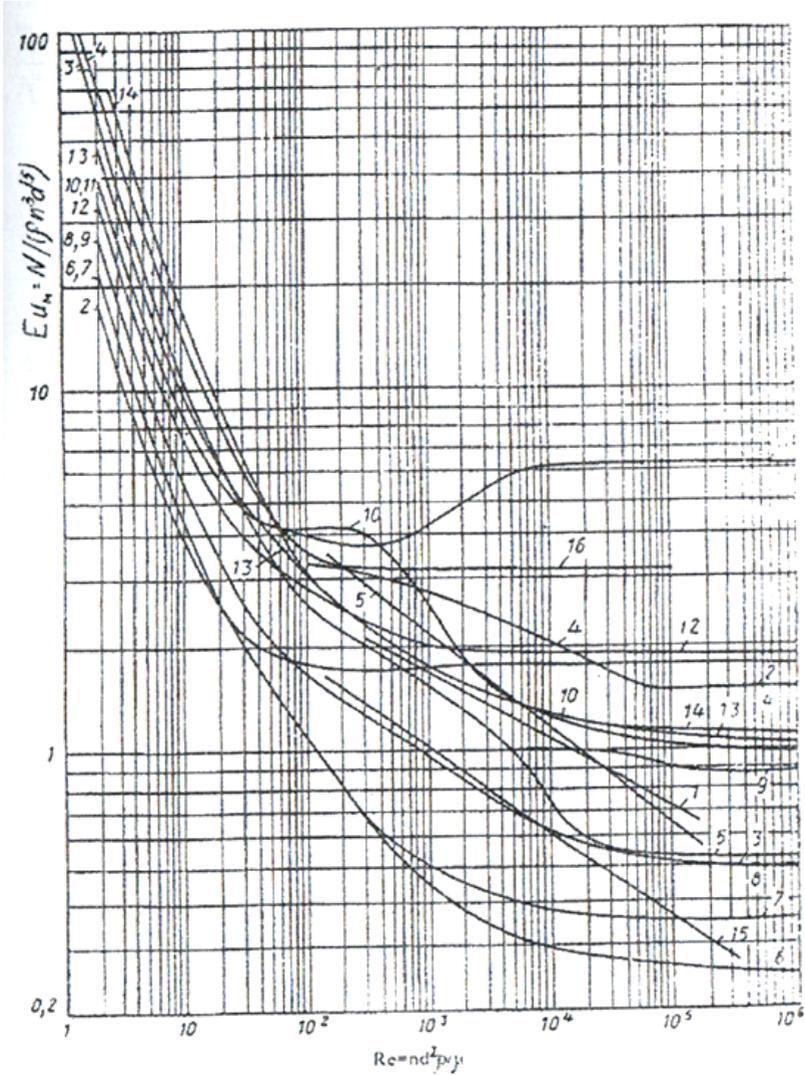


Рис. 4.1. Зависимости $Eu_m = f(Re_m)$ для мешалок различных типов

График зависимости $E_{u_m} = f(Re_m)$ (рис. 4.1) построен по опыт-ным данным многих исследований процесса перемешивания в жид-кой среде мешалками различных типов. Характеристики мешалок, а также аппаратов, в которых проводились исследования, приведе-ны в табл. 4.1 и на рис. 4.2.

Таблица 4.1

Характеристики мешалок, зависимости $E_{u_m} = f(Re_m)$
для которых приведены на рис. 4.1

Номер кривой на рис. 4.1	Тип мешалки	Характеристики мешалок				Характеристики сосудов
		D/d	H/D	b/d	S/d	
1	Двухлопастная	3	1	0,25	—	Без перегородок
2	Двухлопастная	3	1	0,167	—	С четырьмя пере-городками шири-ной $0,1D$
3	Двухлопастная	2	1	0,885	—	Без перегородок
4	Двухлопастная	2	1	0,885	—	Со змеевиком $d_{зм} = 1,9d$
5	Шестилопастная	1,11	1	0,066	—	Без перегородок
6	Пропеллерная	3	1	—	1	Без перегородок
7	Пропеллерная	3	1	—	1	С четырьмя пере-городками шири-ной $0,1D$
8	Пропеллерная	3	1	—	2	Без перегородок
9	Пропеллерная	3	1	—	2	С четырьмя пере-городками шири-ной $0,1D$
10	Открытая турбин-ная с шестью плоскими лопастями	3	1	0,2	—	Без перегородок
11	Открытая турбин-ная с шестью плоскими лопастями	3	1	0,2	—	С четырьмя пере-городками шири-ной $0,1D$
12	Открытая турбин-ная с шестью плоскими лопастями	3	1	0,125	—	С четырьмя пере-городками шири-ной $0,1D$
13	Закрытая тур-бинная с шестью лопастями	3	1	—	—	Без перегородок
14	Закрытая тур-бинная с шестью лопастями	3	1	—	—	Без перегородок

Номер кривой на рис. 4.1	Тип мешалки	Характеристики мешалок				Характеристики сосудов
		D/d	H/D	b/d	S/d	
15	Якорная	1,11	1	0,066	—	Без перегородок
16	Дисковая с шестью лопатками	2,5	1	0,1	—	С четырьмя перегородками шириной $0,1D$

Примечание: d – диаметр мешалки, м; D – диаметр аппарата, м; H – высота жидкости в аппарате, м; b – ширина лопасти мешалки, м; S – шаг винта, м.

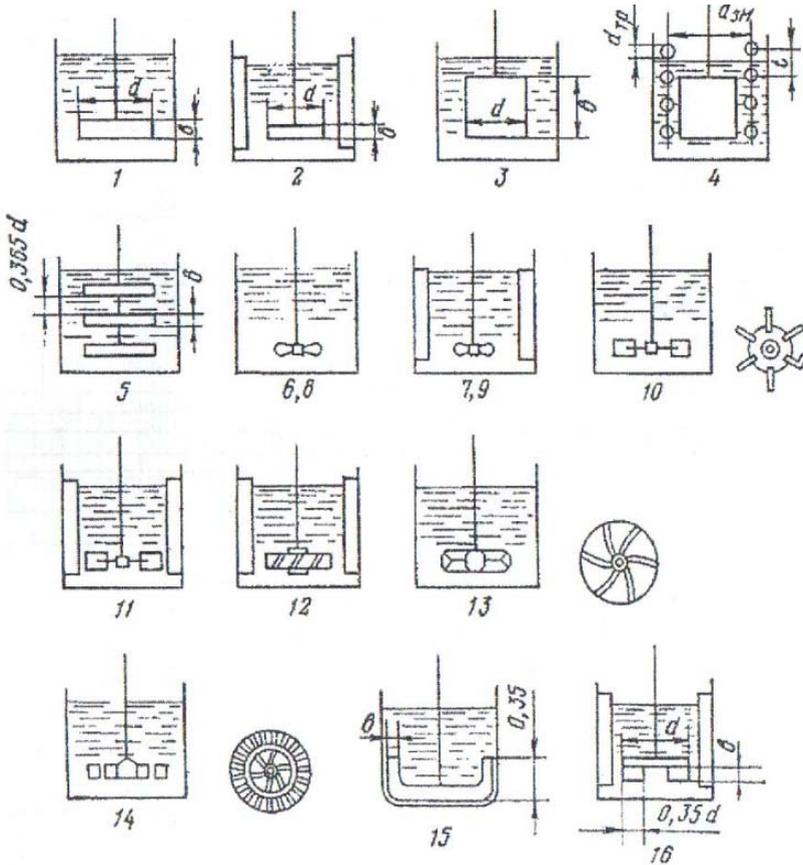


Рис. 4.2. Аппараты с мешалками, для которых приведены зависимости $Eu_m = f(Re_m)$

Мощность (кВт) двигателя мешалки определяют по формуле

$$N_{\text{д}} = \frac{N}{102\eta}, \quad (4.3)$$

где η – коэффициент полезного действия привода.

Программа работы

На лабораторной установке, предназначенной для перемешивания жидкой среды – водоглицеринового раствора различной концентрации – с помощью мешалок различных типов, определить потребляемую мощность двигателя мешалки по показаниям амперметра и вольтметра, а также рассчитать эту мощность, воспользовавшись зависимостью $E_{\text{ц}_m} = f(\text{Re}_m)$, приведённой на рис. 4.1.

Варианты индивидуальных заданий

Вариант	Тип мешалки (номер в табл. 4.1 и на рис. 4.2)	Частота вращения мешалки, с^{-1}	Концентрация глицеринового раствора, % об.	Отношение высоты слоя жидкости к диаметру аппарата
1	1	3,5	40	1
2	1	3,0	50	1
3	1	4,0	60	1
4	6	2,5	40	1
5	6	2,0	50	1
6	6	3,0	60	1
7	15	1,0	40	1
8	15	1,5	50	1
9	15	2,0	60	1
10	15	1,0	40	1

Описание лабораторной установки

Перемешивание жидкой среды осуществляют в цилиндрической ёмкости высотой 200 мм и диаметром 100 мм. Мешалки сменные, их вращение осуществляется двигателем постоянного тока. Частота вращения регулируется лабораторным трансформатором

(ЛАТР) и контролируется тахометром. Электрическая сеть включает ЛАТР, выпрямитель и электродвигатель. Напряжение и силу тока, поступающего к двигателю, измеряют вольтметром и амперметром соответственно, параллельно и последовательно подключёнными к электрической сети.

Порядок выполнения работы

1. Приготовить необходимое количество водоглицеринового раствора, концентрацию которого выбирают согласно варианту индивидуальных заданий.

2. Измерить вязкость водоглицеринового раствора на основании указаний к лабораторной работе 2.

3. Установить мешалку соответствующего типа сообразно варианту (мешалки являются сменными). В цилиндрическую ёмкость водоглицериновый раствор пока не заливать.

4. Включить двигатель мешалки и отрегулировать частоту вращения в соответствии с вариантом. Снять показания амперметра и вольтметра на холостом ходу и рассчитать потребляемую при этом мощность по формуле

$$N = I \cdot U, \quad (4.4)$$

где I – показания амперметра, A ; U – показания вольтметра, B .

5. Залить водоглицериновый раствор в ёмкость на высоту 100 мм.

6. Повторить п. 4, но только с залитым в ёмкость водоглицериновым раствором.

7. Вычислить потребляемую мощность при вращении мешалки, которая равна разности мощностей для заполненной ёмкости и на холостом ходу.

8. Найти численное значение критерия Рейнольдса Re_m по формуле (4.2), предварительно определив вязкость μ водоглицеринового раствора.

9. Пользуясь расчётным значением критерия Рейнольдса и графической зависимостью (рис. 4.1), определить численное значение критерия Эйлера.

10. Исходя из уравнения (4.1) рассчитать мощность, необходимую для вращения мешалки. Сравнить это значение мощности

со значением, которое найдено экспериментально (см. п. 7), определить относительное отклонение этих значений.

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель и задачи работы, задание, экспериментальные результаты, расчётные материалы.

Экспериментальные результаты представляют в виде таблиц со всеми промежуточными значениями. Расчётные результаты приводят с подробным изложением всех рассуждений, допущений и используемых формул, подставляя все численные значения в формулы. Окончательные результаты оформляют в виде итоговой таблицы.

Заключительной частью отчёта являются выводы обо всех результатах исследований (экспериментальных и расчётных).

Вопросы для самоконтроля

1. Для каких целей применяют перемешивание в химической технологии?
2. Что является мерой интенсивности перемешивания?
3. Чем характеризуется эффективность перемешивания?
4. Каковы основные способы перемешивания в жидкой среде?
5. Какие типы мешалок являются тихоходными, а какие – быстроходными?
6. Каково назначение перегородок в аппарате?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. – 13-е изд. – М. : Альянс, 2006. – С. 261–276.
2. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды : учеб. пособие. – М. : ИНФРА-М, 2014. – С. 178–192.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : учеб. пособие для вузов. – 4-е изд. – СПб. : Химиздат, 2017. – С. 104–106.

Лабораторная работа 5

Изучение гидродинамики зернистого слоя

Цель работы — закрепить знания по гидродинамике зернистого слоя при прохождении через него газового (воздушного) потока снизу вверх по качественному изменению свойств слоя в зависимости от скорости газового потока; экспериментально определить основные характеристики слоя и сравнить их с расчётными по справочным формулам.

Основные понятия и расчётные формулы

Если через слой твердых частиц, расположенных на поддерживающей перфорированной решетке аппарата, проходит поток газа, то состояние слоя оказывается различным в зависимости от скорости потока (рис. 5.1).

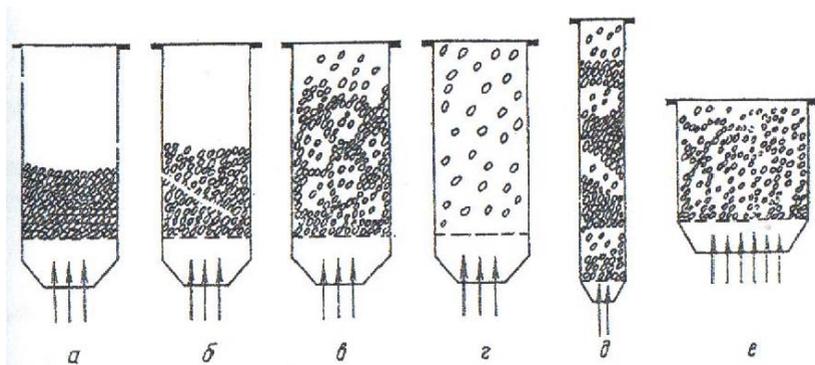


Рис. 5.1. Различные состояния слоя зернистого материала при прохождении через него потока газа: *a* — неподвижный слой (режим фильтрации); *б* — однородный псевдооживленный слой при $w \geq w_{nc}$; *в* — неоднородный псевдооживленный слой; *г* — унос твердых частиц; *д* — псевдооживленный слой с поршнеобразованием; *е* — псевдооживленный слой с каналообразованием

При плавном увеличении скорости потока от нуля до некоторого критического значения происходит обычный процесс фильтрации, при котором твердые частицы неподвижны (рис. 5.1, *a*). На графике процесса псевдооживления, называемом кривой псевдооживления и выражающем зависимость перепада статического давле-

ния в слое зернистого материала от скорости псевдоожижающего газа (рис. 5.1), процессу фильтрации соответствует входящая ветвь OA .

На кривой псевдоожижения переход от режима фильтрации к состоянию псевдоожижения соответствует критической скорости газа w_{nc} (точка A , рис. 5.2), называемой скоростью начала псевдоожижения. В момент начала псевдоожижения масса зернистого материала, приходящегося на единицу площади поперечного сечения аппарата, уравнивается силой гидравлического сопротивления слоя:

$$\Delta P_{сл} = \frac{G_{сл}g}{f}, \quad (5.1)$$

где $G_{сл}$ — масса материала в слое, кг; f — площадь поперечного сечения аппарата, m^2 .

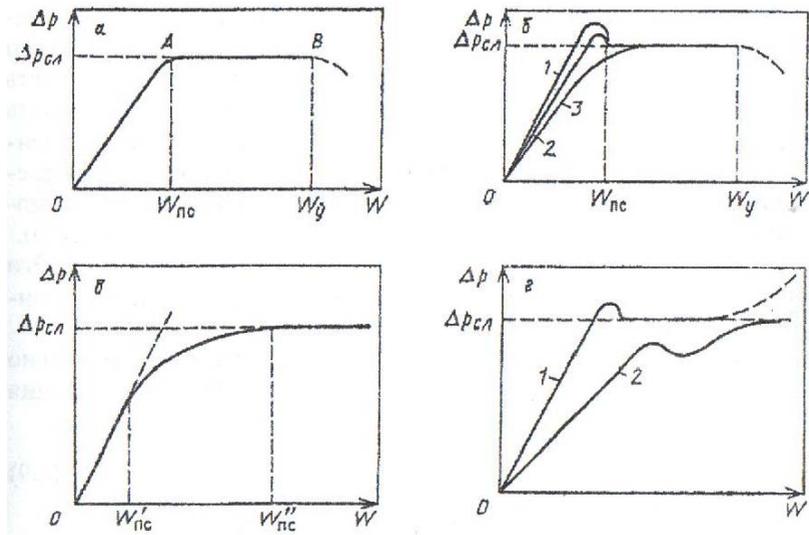


Рис. 5.2. Изменение перепада давления в слое зернистого материала в зависимости от скорости газового потока, проходящего через слой: a — кривая идеального псевдоожижения; $б$ — реальные кривые псевдоожижения; $в$ — кривая псевдоожижения полидисперсного материала; $г$ — кривые псевдоожижения для слоя с поршнеобразованием (кривая 1) и с каналообразованием (кривая 2)

С учетом архимедовых сил, действующих на частицы слоя, это выражение можно представить в виде

$$\Delta P_{\text{сл}} = g(\rho - \rho_0)(1 - \varepsilon_0)h_0, \quad (5.2)$$

где h_0 — высота неподвижного слоя, м; ρ и ρ_0 — плотности твёрдых частиц и газа (воздуха), кг/м³; ε_0 — порозность неподвижного слоя, т. е. относительный объем пустот в неподвижном слое,

$$\varepsilon_0 = \frac{V_{\text{сл}} - V}{V_{\text{сл}}} \approx 0,4, \quad (5.3)$$

где $V_{\text{сл}}$ и V — объём неподвижного слоя и объём частиц.

При скорости начала псевдооживления и выше сопротивление слоя $\Delta P_{\text{сл}}$ сохраняет практически постоянное значение, и зависимость $\Delta P = f(w)$ выражается прямой AB , параллельной оси абсцисс (рис. 5.2, *a*). При этом вырастает среднее расстояние (просветы) между частицами, т. е. увеличивается порозность слоя ε и, следовательно, его высота h . Так как перепад давления в псевдооживленном слое $\Delta P_{\text{сл}}$ остается, по сути, неизменным, высоту такого расширившегося слоя можно определить из условия

$$\Delta P_{\text{сл}} = g(\rho - \rho_0)(1 - \varepsilon_0)h_0 = g(\rho - \rho_0)(1 - \varepsilon)h, \quad (5.4)$$

откуда

$$h = h_0 \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon}. \quad (5.5)$$

Существует несколько стадий процесса псевдооживления. При скоростях газа, незначительно превышающих $w_{\text{пс}}$, наблюдается так называемое однородное (спокойное) псевдооживление. По мере роста скорости газа в слое начинают образовываться компактные массы газа («пузырьки») и у поверхности возникают всплески частиц. Такой характер гидродинамики слоя называют неоднородным псевдооживлением.

Наконец, при достижении некоторого второго критического значения скорости w_y , называемой скоростью уноса, твёрдые частицы начинают выноситься из слоя и их количество в аппарате уменьшается (рис. 5.1, *з*). Порозность такого слоя стремится к 1, и сопротивление слоя правее точки B (рис. 5.2, *a*) также падает. Рассмотренный график OAB называют кривой идеального псевдооживления.

На практике действительная кривая псевдооживления (рис. 5.2, б) отличается от идеальной. Крутизна восходящей ветви реальной кривой псевдооживления зависит от плотности первоначальной упаковки (засыпки) твёрдых частиц: при более плотной упаковке сопротивление слоя несколько выше и восходящая ветвь идет круче (рис. 5.2, б, кривая 1), при более рыхлой — не так круто (рис. 5.2, б, кривая 2). В момент перехода слоя в псевдооживленное состояние наблюдается пик давления, обусловленный необходимостью затраты дополнительной энергии на преодоление сил сцепления. Величина пика давления определяется плотностью первоначальной упаковки частиц, их формой и состоянием поверхности.

При постепенном уменьшении скорости газа и переходе слоя от псевдооживленного состояния к неподвижному кривая 3 располагается ниже кривых 1 и 2 (рис. 5.2, б), что соответствует более рыхлой структуре псевдооживленного слоя для этого случая.

Значение w_{nc} можно найти расчётным путем:

$$Re_{nc} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad (5.6)$$

где $Re_{nc} = \frac{w_{nc}d}{\nu}$ — число Рейнольдса; $Ar = \frac{gd^3}{\nu_2} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho}$ — число Архимеда; d — диаметр частиц, м; ν — кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

Скорость уноса w_y можно приблизительно определить по формуле

$$w_y = \frac{Re_y \nu}{d}. \quad (5.7)$$

Здесь

$$Re_y = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}. \quad (5.8)$$

Программа работы

1. На основании экспериментальных данных по взаимодействию восходящего потока воздуха со слоем частиц зернистого материала (тип материала, размер зерен, высоту первоначального слоя и плотность первоначальной упаковки выбирают по номеру варианта в таблице индивидуальных заданий) построить график кривой

реального псевдооживления $\Delta P_{\text{сл}} = f(w)$ при постоянном увеличении скорости воздуха вплоть до скорости уноса, одновременно измеряя высоту слоя. Также построить график этой зависимости при плавном уменьшении скорости (от скорости уноса до нуля).

2. Расчетным путем по формулам (5.6)–(5.8) найти $w_{\text{пс}}$ и $w_{\text{у}}$. Эти значения поместить на графике зависимости $\Delta P_{\text{пс}} = f(w)$, построенном на основании экспериментальных данных.

3. Вычислить по формуле (5.3) порозность слоя, предварительно определив объем неподвижного слоя (площадь внутреннего сечения аппарата, умноженная на высоту слоя) и объем частиц

$$V = \frac{G_{\text{сл}}}{\rho}, \quad (5.9)$$

где $G_{\text{сл}}$ – масса частиц в слое, кг; ρ – плотность частиц, кг/м³.

Плотность упаковки исходного слоя частиц регулируется с помощью лабораторного вибратора, укрепленного на корпусе аппарата. При вибрировании в течение 2–3 минут слой становится более плотным, а при свободной засыпке (без вибрирования) – рыхлым (менее плотным). Условно различают два типа упаковки исходного слоя: плотная (после вибрирования) и рыхлая (без вибрирования).

Варианты индивидуальных заданий

Вариант	Твердые частицы	Высота исходного слоя, мм	Тип упаковки исходного слоя
1	Силикагель	80	Плотная
2	Карбамид	80	Рыхлая
3	Полипропилен	100	Плотная
4	Силикагель	100	Рыхлая
5	Карбамид	120	Плотная
6	Полипропилен	80	Рыхлая
7	Силикагель	80	Плотная
8	Карбамид	100	Рыхлая
9	Полипропилен	120	Плотная
10	Силикагель	120	Рыхлая

Описание лабораторной установки

Схема экспериментальной установки показана на рис. 5.3. Установка состоит из колонны 1 с внутренним диаметром $D = 0,09$ м. Колонна заполняется зернистым материалом через загрузочный патрубок 6 с помощью воронки; после заполнения патрубков закрывается резиновой пробкой. В нижней части колонны в разъемном фланцевом соединении установлена поддерживающая перфорированная решетка или сетка 7. Воздух в колонну нагнетается воздуходувкой 2. Расход воздуха регулируется вентилем 3 и контролируется ротаметром 4. Гидродинамическое сопротивление зернистого слоя определяется по показанию дифференциального манометра 5. Для предотвращения выноса зернистого материала из аппарата в верхней его части установлена сетка 8. Опорожнение аппарата от зернистого материала (для замены его другим зернистым материалом) производится через выгрузочный патрубок 9. При работе аппарата патрубок закрыт резиновой пробкой. Уплотнение слоя зернистого материала производится с помощью вибратора 10.

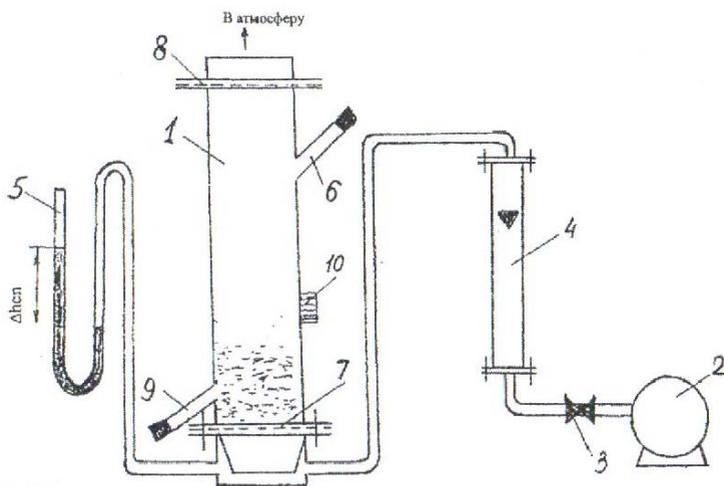


Рис. 5.3. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Согласно варианту выбрать тип зернистого материала и засыпать его через загрузочный патрубок в колонну. Высоту слоя также установить в соответствии с вариантом. В зависимости от варианта упаковка слоя может быть плотной или рыхлой. Для получения плотной упаковки после засыпки материала следует включить вибратор на 2–3 мин. После уплотнения слоя его высота уменьшается, поэтому следует досыпать зернистый материал до требуемого значения высоты слоя. После чего вновь включить вибратор на 2–3 мин. При необходимости произвести дополнительную досыпку зернистого материала. Рыхлая упаковка соответствует первоначальной засыпке зернистого материала без вибрирования.

2. Включить воздухоудвку при закрытом вентиле. Постепенно открывая вентиль, отрегулировать расход воздуха по ротаметру. Снять показания ротаметра и дифференциального манометра, измерив высоту слоя h (измерения провести для 8–10 значений расхода воздуха). Аналогично снять показания при уменьшении скорости воздуха от w_y до нуля.

3. Определить скорость воздуха, отнесённую к поперечному сечению колонны, по формуле

$$w = \frac{4Q}{\pi D^2}, \quad (5.10)$$

где Q – расход воздуха, м³/с; D – внутренний диаметр колонны, м.

4. Экспериментальные данные и расчётные значения внести в таблицу и построить соответствующие графические зависимости на основании рекомендаций подраздела основных понятий и расчётных формул.

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель и задачи работы, задание, экспериментальные результаты, расчётные материалы.

Заключительной частью отчёта являются выводы обо всех результатах исследований (экспериментальных и расчётных).

Вопросы для самоконтроля

1. В чём суть понятия псевдооживленного состояния зернистого слоя и пределов существования псевдооживленного слоя?
2. Что такое гидравлическое сопротивление зернистого слоя?
3. Что такое порозность зернистого слоя?
4. Как изменяется перепад давления в зернистом слое с увеличением скорости газа до величины, равной скорости начала псевдооживления?
5. Как изменяется перепад давления в зернистом слое с увеличением скорости газа выше второго критического значения скорости потока, называемого скоростью уноса?
6. В каких целях используют взаимодействие газов со слоем частиц, находящимся в псевдооживленном состоянии?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. — 13-е изд. — М. : Альянс, 2006. — С. 79–89.
2. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды : учеб. пособие. — М. : ИНФРА-М, 2014. — С. 167–177.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : учеб. пособие для вузов. — 4-е изд. — СПб. : Химиздат, 2017. — С. 101–104.

Лабораторная работа 6

Изучение конструкции теплообменных аппаратов с определением их коэффициентов теплопередачи

Цель работы — повышение уровня знаний в вопросах теплопередачи, изучение конструкции и приобретение навыков экспериментального исследования работы кожухотрубчатого (КТ), пластинчатого и змеевикового теплообменных аппаратов.

Основные понятия и расчётные формулы

Теплообменными аппаратами (теплообменниками) называются устройства, предназначенные для передачи тепла от одного теплоносителя к другому. По принципу действия теплообменные аппараты подразделяются на три вида: рекуперативные, регенеративные и смесительные.

В теплообменных аппаратах рекуперативного типа тепло передаётся от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку, которая называется поверхностью теплообмена. Теплопередача включает теплоотдачу от более горячей среды к стенке, теплопроводность стенки и теплоотдачу от стенки к более холодной среде.

Основной характеристикой теплообменного аппарата является его тепловая нагрузка Q , Вт · Дж/с, которая показывает возможное количество тепла, передаваемого в единицу времени, зависящее от теплофизических свойств теплоносителей (вязкости, теплопроводности, плотности, теплоёмкости) и режима их движения. Важное влияние на величину тепловой нагрузки оказывают конструктивные особенности аппарата (размеры, материал, состояние поверхности нагрева) и средняя по поверхности разность температур между греющей и нагреваемой средой.

При расчёте теплообменных аппаратов изменение температур теплоносителей при их движении по теплообменнику учитывается введением в расчётную формулу среднего температурного напора Δt_{cp} . Влияние остальных факторов учитывается коэффициентом теплопередачи K , который представляет собой количество тепла, передаваемого в единицу времени через единицу поверхности при разности температур между теплоносителями в один градус.

Формула для расчёта количества тепла, передаваемого в теплообменном аппарате, имеет вид

$$Q = KF\Delta t_{\text{cp}}. \quad (6.1)$$

Однако на практике расчёт теплообменного аппарата, как правило, сводится к определению теплопередающей поверхности аппарата F в зависимости от возможной тепловой нагрузки:

$$F = Q/(K\Delta t_{\text{cp}}). \quad (6.2)$$

Тепловую нагрузку в этом случае определяют из теплового баланса аппарата без учёта потерь тепла:

$$Q = G_1 c_1 (t_{1\text{н}} - t_{1\text{к}}) = G_2 c_2 (t_{2\text{к}} - t_{2\text{н}}), \quad (6.3)$$

где G_1 и G_2 – массовые расходы греющей (горячей) и нагреваемой (холодной) среды соответственно, кг/с; c_1 и c_2 – теплоёмкости греющей и нагреваемой среды соответственно, кДж/(кг · К).

Значение среднего температурного напора Δt_{cp} зависит от начальных $t_{1\text{н}}$, $t_{2\text{н}}$ и конечных $t_{1\text{к}}$, $t_{2\text{к}}$ температур сред в теплообменном аппарате, а также от схемы его подсоединения. Если греющая и нагреваемая среды движутся в каналах аппарата в одном направлении, то такая схема движения называется прямотоком, если в противоположных – противотоком.

Необходимо отметить, что противоточная схема является более эффективной по сравнению с прямоточной. Критерием для оценки эффективности служит как раз величина среднего температурного напора: в противоточной схеме она во многих случаях оказывается больше, чем в прямоточной. Следовательно, требуемая поверхность теплообмена при противоточной схеме движения будет меньше, чем при прямоточной. Значит, при прочих равных условиях теплообменник будет более компактным, затраты материалов на его изготовление меньшими. Кроме того, при осуществлении противоточной схемы можно получить более высокую конечную температуру нагреваемой среды.

В целях экономии пресной воды всё большее применение находят аппараты с воздушным охлаждением. Конструктивно такие аппараты состоят из нескольких секций, соединённых последовательно калачами и параллельно коллекторами. Секции представляют собой плоский оребренный змеевик из медных или стальных труб

диаметром от 6 до 20 мм. Рёбра стальные или алюминиевые, обычно прямоугольной формы. Шаг рёбер не менее 1 мм, в противном случае происходит быстрое загрязнение теплопередающей поверхности. При расчёте аппаратов с воздушным охлаждением возникает необходимость определения коэффициента теплопередачи от пучка оребренных труб. Здесь расчётные зависимости имеют более сложный характер, чем для гладкотрубных пучков. Это обусловлено влиянием формы, размеров, шага рёбер, их тепловой эффективности.

В аппаратах с воздушным охлаждением основное термическое сопротивление сосредоточено, как правило, со стороны воздуха. Однако при высокой степени наружного оребрения и интенсификации внешнего теплообмена внутреннее тепловое сопротивление со стороны охлаждающей среды может приближаться к наружному. Основными направлениями интенсификации теплообмена со стороны воздуха являются применение оребренных поверхностей определённых форм и размеров и турбулизация потока воздуха. Повышение коэффициента теплоотдачи (и, соответственно, теплопередачи) со стороны воздуха можно получить путём уменьшения диаметра трубок и шага рёбер. Первое для наружного теплообмена имеет меньшее значение, так как площадь поверхности труб составляет обычно 5–10 % от общей площади наружной оребренной поверхности.

При передаче теплоты от капельной жидкости через твёрдую стенку к газу суммарное термическое сопротивление $1/K$ определяется по формуле

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (6.4)$$

где α_1 , α_2 — коэффициенты теплоотдачи соответственно от капельной жидкости к внутренней поверхности трубы и от наружной поверхности трубы к газу (воздуху).

Наибольший вклад в суммарное термическое сопротивление вносит последнее слагаемое $\frac{1}{\alpha_1}$, оно на один, а иногда на два десятичных порядка меньше первого слагаемого $\frac{1}{\alpha_2}$. Обычно повысить α_2 за счёт увеличения движения скорости воздуха не удаётся, так как это приводит к значительному увеличению аэродинамических сопротивлений, и поэтому используют оребрение со стороны газа (воздуха).

Тогда коэффициент теплопередачи, приведённый к неоребрённой внутренней поверхности, можно определить по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{F_{\text{н}}}{F_{\text{вн}}}}, \quad (6.5)$$

где $F_{\text{н}}$ — наружная оребрённая поверхность, $F_{\text{вн}}$ — внутренняя.

Отношение оребрённой поверхности к гладкой (внутренней) называется коэффициентом оребрения β ,

$$\beta = \frac{F_{\text{н}}}{F_{\text{вн}}}.$$

Описание лабораторной установки

Основными элементами лабораторного стенда (рис. 6.1) являются теплообменные аппараты КТ, ПТ и ОХ. В качестве горячего и холодного теплоносителя используется вода. Теплофизические свойства воды приведены в табл. 6.4.

В кожухотрубчатом теплообменнике *КТ* движение горячего теплоносителя осуществляется по внутренним трубам, холодного теплоносителя — по межтрубному пространству. Для измерения температур теплоносителей служат температурные датчики, установленные в соответствии со схемой. Направление потока горячего теплоносителя во всех экспериментах остаётся постоянным. При изменении положения запорных трёхходовых кранов *ЗК1* и *ЗК2* холодный теплоноситель может менять направление движения на прямоток или противоток для кожухотрубчатого *КТ* и пластинчатого *ПТ* теплообменников. Воздушный охладитель *ОХ* с принудительной циркуляцией воздуха, обеспечиваемой вентилятором, предназначен для охлаждения холодного теплоносителя окружающим воздухом в замкнутом цикле. Воздушный охладитель состоит из z секций, соединённых последовательно калачами. Секция представляет собой последовательно расположенные оребрённые трубки диаметром d и толщиной стенки $\delta = 0,0004$ м. Рёбра алюминиевые прямоугольной формы с шагом u . Площадь наружной поверхности воздушного охладителя равна сумме площади поверхности змеевика и суммарной площади листов, выполняющих роль рёбер.

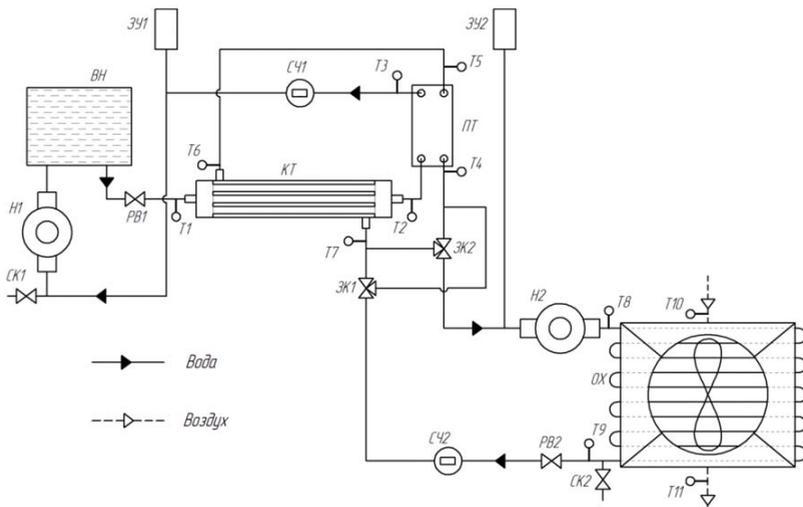


Рис. 6.1. Принципиальная схема лабораторного стенда
(источник: measlab.ru)

На рис. 6.1 обозначены:

ВН – проточный электронагреватель мощностью до 3,5 кВт с контролируемым по заданной температуре программным регулятором;

ЗУ1 – заливочное устройство горячего теплоносителя с краном Маевского;

ЗУ2 – заливочное устройство холодного теплоносителя с краном Маевского;

КТ – кожухотрубчатый теплообменный аппарат (количество внутренних труб $n = 4$, наружный диаметр $d_n = 12$ мм, длина $l = 280$ мм; диаметр трубной решётки $D_p = 50$ мм);

ПТ – пластинчатый теплообменный аппарат (количество пластин – 12 шт., ширина – 73 мм, высота – 192 мм; площадь теплообмена – 0,12 м²);

ОХ – воздушный охладитель холодного теплоносителя;

СЧ1 – счётчик расхода горячего теплоносителя с импульсным выходом;

СЧ2 – счётчик расхода холодного теплоносителя с импульсным выходом;

Н1 – циркуляционный насос горячего теплоносителя с тремя положениями переключателя (минимального, среднего и максимального расхода воды);

H2 – циркуляционный насос холодного теплоносителя с тремя положениями переключателя (минимального, среднего и максимального расхода воды);

PB1 – регулирующий вентиль горячего теплоносителя;

PB2 – регулирующий вентиль холодного теплоносителя;

ЗК1, ЗК2 – трёхходовые запорные краны;

СК1 – сливной кран для замены горячего теплоносителя;

СК2 – сливной кран для замены холодного теплоносителя;

T1 – температура горячего теплоносителя на входе в кожухотрубчатый теплообменный аппарат;

T2 – температура горячего теплоносителя на выходе из кожухотрубчатого теплообменного аппарата и, соответственно, на входе в пластинчатый теплообменник;

T3 – температура горячего теплоносителя на выходе из пластинчатого теплообменника;

T4 – температура холодного теплоносителя: при прямоточной схеме подключения – на входе в пластинчатый теплообменный аппарат; при противоточной схеме подключения – на выходе из пластинчатого теплообменного аппарата;

T5 – температура холодного теплоносителя: при прямоточной схеме подключения – на выходе из пластинчатого теплообменного аппарата; при противоточной схеме подключения – на входе в пластинчатый теплообменный аппарат;

T6 – температура холодного теплоносителя: при прямоточной схеме подключения – на выходе из кожухотрубчатого теплообменного аппарата; при противоточной схеме подключения – на входе в кожухотрубчатый теплообменный аппарат;

T7 – температура холодного теплоносителя: при прямоточной схеме подключения – на входе в кожухотрубчатый теплообменный аппарат; при противоточной схеме подключения – на выходе из кожухотрубчатого теплообменного аппарата;

T8 – температура холодного теплоносителя на входе в воздушный охладитель;

T9 – температура холодного теплоносителя на выходе из воздушного охладителя;

T10 – температура воздуха на входе в воздушный охладитель;

T11 – температура воздуха на выходе из воздушного охладителя.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки, составить её описание и заготовить табл. 6.1–6.3 для регистрации результатов испытаний. С помощью штангенциркуля и линейки определить конструктивные параметры воздушного охладителя: z – количество секций, шт.; N – количество трубок в секции, шт.; d – диаметр трубок, м; D – средний диаметр изгиба калача, м; L – длину трубок, м; d_k – диаметр трубок калача, м; n – количество рёбер, шт.; u – шаг рёбер, м; H – высоту рёбер, м; B – ширину рёбер, м.

2. Подготовить установку к испытаниям теплообменников. Удостовериться, что уровень воды в заливочном устройстве располагается не ниже его середины, в противном случае долить жидкость в систему.

3. Подключить стенд к сети 220 В; включить питание стенда кнопкой «Сеть».

4. Подключить автоматизированный стенд к USB-разъёму компьютера и запустить программу, последовательно выбирая в меню «Пуск» → «Программы» → «Meas LAB» → «Испытание теплообменников». При включении компьютерной системы измерений («Пуск» в программе) на цифровых индикаторах лицевой панели отображаются мгновенные значения температур, измеряемые всеми датчиками, и графики их изменения во времени.

5. Установить переключатель в положение «Прямоток».

6. Кнопкой $BK2$ запустить насос $H1$ и установить с помощью переключателя на насосе и регулировочного вентиля PB средний расход горячего теплоносителя.

7. Через 20–30 секунд кнопкой $BK1$ включить нагреватель в режим позиционированного регулирования.

8. Установить значение температуры $60 \div 70$ °С. Будьте внимательны: температура в системе не должна превышать 80 °С!

9. Запустить насос $H2$, включив кнопку $BK3$, и установить с помощью переключателя на насосе минимальный расход холодного теплоносителя.

10. После выхода температуры на заданный режим и установления стационарного теплового режима провести испытания, результаты занести в табл. 6.1 и 6.2.

11. Изменить расход воды переключением режима работы насоса и регулированием положения вентиля *PВ*. Снять показания в установившемся режиме, результаты занести в табл. 6.1–6.3.

12. Изменить направление подачи холодного теплоносителя. Установить переключатель в положение «Противоток» и повторить эксперимент. Снять показания и занести их в табл. 6.1–6.3.

13. Провести расчёты по методике, приведённой в разделе «Обработка экспериментальных данных», результаты занести в табл. 6.1–6.3.

14. Сделать выводы.

Обработка экспериментальных данных

Площадь теплопередающей поверхности кожухотрубчатого теплообменного аппарата, м^2 ,

$$F = \pi \cdot d_{\text{н}} \cdot l \cdot n,$$

где $d_{\text{н}}$ – наружный диаметр, м; l – длина, м; n – количество внутренних труб теплообменника.

Площадь поверхности теплопередачи пластинчатого теплообменника равна $0,12 \text{ м}^2$.

Наружная поверхность воздушного охладителя определяется с учётом оребрения:

$$F_{\text{н}} = F_{\text{тр}} + F_{\text{р}},$$

где $F_{\text{тр}}$ – площадь поверхности трубок, м^2 , $F_{\text{тр}} = \pi \cdot d \cdot N \cdot L \cdot z$; $F_{\text{р}}$ – площадь поверхности рёбер, м^2 , $F_{\text{р}} = H \cdot B \cdot n - \frac{\pi d^2}{4} \cdot N \cdot z$.

Внутренняя поверхность воздушного охладителя, м^2 ,

$$F_{\text{вн}} = \pi \cdot d_{\text{вн}} \cdot N \cdot L \cdot z + \left(\pi^2 \cdot d_{\text{вн}} \cdot D \cdot N \cdot z \right) / 2,$$

где $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубки, м, $d_{\text{вн}} = d - 2\delta$.

Массовые расходы горячего и холодного теплоносителей определяются по соотношению

$$M_{\text{г}} = V_{\text{г}} \rho_{\text{г}}; \quad M_{\text{х}} = V_{\text{х}} \rho_{\text{х}},$$

где $V_{\text{г}}$, $V_{\text{х}}$ – объёмные расходы горячего и холодного теплоносителей, определяются с помощью соответствующего счётчика, $\text{м}^3/\text{с}$;

ρ_r, ρ_x – плотности горячего и холодного теплоносителей, кг/м³, принимаются по средней температуре среды в аппарате (табл. 6.4).

Количество передаваемого тепла определяется по формуле (6.3) для каждого аппарата, при этом удельные теплоёмкости горячего и холодного теплоносителей c_r, c_x принимаются по средней температуре среды в аппарате (табл. 6.4).

Средняя разность температур (температурный напор) определяется по формулам:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_m}{2} \text{ при } \Delta t_6 / \Delta t_m \leq 2,$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} \text{ при } \Delta t_6 / \Delta t_m > 2,$$

где $\Delta t_6, \Delta t_m$ – значения большего и меньшего температурных напоров в начале и конце поверхности теплообмена (определяются с учётом подсоединения), °С.

Для прямотока $\Delta t_6 = t_{1н} - t_{2н}, \Delta t_m = t_{1к} - t_{2к}$; для противотока $\Delta t_6 = t_{1н} - t_{2к}, \Delta t_m = t_{1к} - t_{2н}$.

Коэффициент теплопередачи для каждого режима определяется по формуле

$$K = \frac{Q}{F \Delta t_{cp}} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Таблица 6.1

Результаты измерений и вычислений при испытаниях теплообменного кожухотрубного аппарата

№ п/п	Замеяемые						Вычисляемые					
	T1, °С	T2, °С	T6, °С	T7, °С	V _r , л/мин	V _x , л/мин	G _r , кг/с	G _x , кг/с	Q _r , Вт	Q _x , Вт	Δt _{cp} , °С	K, Вт/(м ² · К)
Прямоток												
1												
2												
3												
Противоток												
1												
2												
3												

Таблица 6.2

Результаты измерений и вычислений при испытаниях
теплообменного пластинчатого аппарата

№ п/п	Замеряемые						Вычисляемые					
	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$T_4, ^\circ\text{C}$	$T_5, ^\circ\text{C}$	$V_{\Gamma},$ л/мин	$V_{\text{X}},$ л/мин	$G_{\Gamma},$ кг/с	$G_{\text{X}},$ кг/с	$Q_{\Gamma},$ Вт	$Q_{\text{X}},$ Вт	$\Delta t_{\text{cp}},$ $^\circ\text{C}$	$K,$ Вт/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
Прямоток												
1												
2												
3												
Противоток												
1												
2												
3												

Таблица 6.3

Результаты измерений и вычислений при испытаниях
теплообменного змеевикового аппарата с воздушным охлаждением

№ п/п	Замеряемые					Вычисляемые				
	$T_8, ^\circ\text{C}$	$T_9, ^\circ\text{C}$	$T_{10},$ $^\circ\text{C}$	$T_{11},$ $^\circ\text{C}$	$V_{\text{X}},$ л/мин	$G_{\text{X}},$ кг/с	$Q,$ Вт	$\Delta t_{\text{cp}},$ $^\circ\text{C}$	$K,$ Вт/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)	β
Прямоток										
1										
2										
3										

Таблица 6.4

Теплофизические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{кДж/кг}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	999,8	4,237	0,551	1,790	13,7
5	999,7	4,224	0,563	1,540	11,3
10	999,6	4,212	0,575	1,300	9,56
15	998,9	4,208	0,586	1,100	8,15
20	998,2	4,204	0,599	1,000	7,06

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{кДж/кг}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
25	996,9	4,204	0,608	0,910	6,20
30	995,6	4,199	0,618	0,805	5,50
35	993,9	4,199	0,626	0,720	4,85
40	992,2	4,199	0,634	0,659	4,30
45	990,1	4,199	0,641	0,615	3,90
50	988,0	4,199	0,648	0,556	3,56
55	985,6	4,199	0,654	0,515	3,25
60	983,2	4,204	0,659	0,479	3,00
65	980,5	4,208	0,664	0,445	2,75
70	977,7	4,212	0,668	0,415	2,56
75	974,8	4,212	0,671	0,385	2,35
80	971,8	4,216	0,674	0,366	2,23
85	968,5	4,220	0,678	0,347	2,10
90	965,3	4,224	0,680	0,326	1,95
95	961,8	4,224	0,682	0,310	1,85
100	958,3	4,229	0,683	0,295	1,75
110	951,0	4,237	0,685	0,268	1,58
120	943,1	4,250	0,686	0,244	1,43
130	934,8	4,271	0,686	0,226	1,32
140	926,1	4,291	0,686	0,212	1,23

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель и задачи работы, задание, экспериментальные и расчётные результаты.

Заключительной частью отчёта являются выводы обо всех результатах исследований (экспериментальных и расчётных).

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите преимущества и недостатки испытанных теплообменных аппаратов.
2. Что называется коэффициентом теплопередачи? Каков его физический смысл и единицы измерения?

3. Какие факторы и параметры теплообменных аппаратов влияют на величину коэффициента теплопередачи?
4. В чём заключаются преимущества противоточной схемы по сравнению с прямоточной?
5. Может ли температура горячего теплоносителя на выходе из теплообменника быть меньше температуры холодного теплоносителя на выходе из теплообменника?
6. В каких случаях при расчёте теплообменника можно пользоваться средним арифметическим температурным напором?
7. В каких технологических процессах используются теплообменные аппараты?
8. Для чего применяют наружное оребрение труб?
9. Что показывает коэффициент оребрения?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. — 13-е изд. — Москва : Альянс, 2006. — С. 345–362.
2. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды : учеб. пособие. — М. : ИНФРА-М, 2014. — С. 244–276.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : учеб. пособие для вузов. — 4-е изд. — СПб. : Химиздат, 2017. — С. 165–169.

Лабораторная работа 7

Изучение процесса теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе»

Цель работы — закрепить знания по теплопередаче; экспериментально определить коэффициент теплопередачи и сравнить его значение с расчётным по справочным формулам.

Основные понятия и расчётные формулы

При прохождении горячего теплоносителя (например горячей воды по внутренней трубе) тепло передается холодному потоку (например холодной воде, движущейся в противотоке по межтрубному пространству). Тепловая нагрузка Q (Вт) при охлаждении горячей воды

$$Q = V_1 \rho_1 c_1 (t_{1\text{вх}} - t_{1\text{вых}}), \quad (7.1)$$

где V_1 — объёмный расход воды, м³/с; ρ_1 — плотность воды, равная 1000 кг/м³; c_1 — теплоёмкость воды, равная 4190 Дж/(кг · град); $t_{1\text{вх}}$ — температура горячей воды на входе в теплообменник, °С; $t_{1\text{вых}}$ — температура горячей воды на выходе из теплообменника, °С.

Температурный напор Δt_1 и Δt_2 в сечениях 1 и 2 теплообменника определяют по формулам:

$$\Delta t_1 = t_{1\text{вх}} - t_{2\text{вх}}; \quad \Delta t_2 = t_{1\text{вх}} - t_{2\text{вых}}, \quad (7.2)$$

где $t_{2\text{вх}}$ — температура холодной воды на входе в теплообменник, °С; $t_{2\text{вых}}$ — температура холодной воды на выходе из теплообменника, °С.

Средний температурный напор $\Delta t_{\text{ср}}$ (при $\Delta t_1 > \Delta t_2$) находят по следующим формулам:

$$\Delta t_{\text{ср}} = 0,5(\Delta t_1 + \Delta t_2) \quad \text{при} \quad \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \leq 2; \quad (7.3)$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,31 \lg \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad \text{при} \quad \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \geq 2. \quad (7.4)$$

Окончательное определение коэффициента теплопередачи $K_{\text{эксп}}$ по экспериментальным данным проводится по формуле

$$K_{\text{эксп}} = \frac{Q}{F \Delta t_{\text{ср}}}, \quad (7.5)$$

где F — площадь поверхности теплообменника, равная 0,151 м².

Расчётное определение коэффициента теплопередачи проводят следующим образом. Сначала находят средние температуры теплоносителей и стенки:

$$t_1 = \frac{t_{1\text{ВХ}} + t_{1\text{ВЫХ}}}{2}; \quad (7.6)$$

$$t_2 = \frac{t_{2\text{ВХ}} + t_{2\text{ВЫХ}}}{2}; \quad (7.7)$$

$$t_{\text{СТ}} = \frac{t_{1\text{СР}} + t_{2\text{СР}}}{2}, \quad (7.8)$$

где $t_{1\text{СР}}$ и $t_{2\text{СР}}$ — соответственно средние значения температуры горячей и холодной воды, °С; $t_{\text{СТ}}$ — средняя температура стенки, °С.

Расчётное значение коэффициента теплопередачи $K_{\text{расч}}$

$$K_{\text{расч}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{СТ}}}{\lambda_{\text{СТ}}} + 2r_{\text{загр}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (7.9)$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи для горячего теплоносителя, Вт/(м² · град); α_2 — коэффициент теплоотдачи для холодного теплоносителя, Вт/(м² · град); $\delta_{\text{СТ}}$ — толщина стенки, м; $\lambda_{\text{СТ}}$ — коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м · град); $r_{\text{загр}}$ — термическое сопротивление загрязнений стенки, м² · град/Вт.

В свою очередь, α_1 и α_2 определяются по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{\text{Nu}_1 \lambda_1}{d_{\text{ВН}}}; \quad (7.10)$$

$$\alpha_2 = \frac{\text{Nu}_2 \lambda_2}{d_{\text{ЭКВ}}}, \quad (7.11)$$

где Nu_1 и Nu_2 — числа Нуссельта для горячего и холодного теплоносителя соответственно; λ_1 и λ_2 — коэффициенты теплопроводности горячего и холодного теплоносителя соответственно, Вт/(м · град); $d_{\text{ВН}}$ — внутренний диаметр центральной трубы, м; $d_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентный диаметр канала межтрубного пространства, м.

Эквивалентный диаметр для некруглого сечения канала, в том числе и для сечения канала межтрубного пространства,

$$d_{\text{ЭКВ}} = \frac{4F_{\text{КАН}}}{\Pi}, \quad (7.12)$$

где $F_{\text{кан}}$ — площадь поперечного сечения канала, м²; Π — длина периметра сечения канала, м.

Значения числа Нуссельта в формулах (7.10) и (7.11) зависят от режима движения теплоносителей (в центральной трубе и межтрубном пространстве). Режим движения определяется численным значением числа Рейнольдса Re , которое определяется по формуле

$$Re = \frac{wd_{\text{ЭКВ}}}{\nu}, \quad (7.13)$$

где w — средняя скорость движения теплоносителя по каналу, м/с; $d_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентный диаметр сечения канала (для круглого сечения $d_{\text{ЭКВ}} = d_{\text{ВН}}$), м; ν — кинематическая вязкость теплоносителя, м²/с.

При значении числа Рейнольдса меньше 2300 режим движения является ламинарным. При значении числа Рейнольдса между 2300 и 10 000 режим переходный, при значениях более 10 000 — режим турбулентный.

При ламинарном режиме

$$Nu = 0,17 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{СТ}}} \right)^{0,25}, \quad (7.14)$$

при турбулентном режиме

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{СТ}}} \right)^{0,25}, \quad (7.15)$$

где Pr — число Прандтля, определяемое при температуре теплоносителя в середине потока; $Pr_{\text{СТ}}$ — число Прандтля, определяемое при температуре теплоносителя у стенки, т. е. при температуре самой стенки; Gr — число Грасгофа.

В условиях переходного режима теплоотдача рассчитывается с помощью функции K_0 :

$$K_0 = Nu \cdot Pr^{-0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{СТ}}} \right)^{-0,25}. \quad (7.16)$$

Значения K_0 для различных чисел Re приведены ниже:

$Re \cdot 10^{-3}$	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
K_0	3,6	4,9	7,5	10,0	12,2	16,5	20,0	24,0	27,0	30,0	83,0

Числа Прандтля Pr и $Pr_{ст}$ в формулах (7.14)–(7.16) определяются следующим образом:

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (7.17)$$

где a – коэффициент температуропроводности теплоносителя, m^2/c .

Число Грасгофа в формуле (7.14) находят по формуле

$$Gr = \frac{gd_{экв}^3 \beta \Delta t}{\nu^2}, \quad (7.18)$$

где g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$; β – температурный коэффициент объёмного расширения жидкости, $1/K$; Δt – разность средней температуры теплоносителя и средней температуры стенки, K .

Выражения (7.14)–(7.16) справедливы для прямолинейных каналов, длина которых более чем в 50 раз больше их $d_{экв}$.

Программа работы

1. На основе экспериментальных данных найти коэффициент теплопередачи $K_{эксп}$ для процесса передачи тепла от горячей воды, движущейся по центральной трубе теплообменника типа «труба в трубе», к холодной воде, движущейся в противотоке в межтрубном пространстве теплообменника. При определении $K_{эксп}$ использовать формулы (7.1)–(7.5); расход горячей и холодной воды, подаваемой в теплообменник, выбрать согласно варианту индивидуальных заданий.

2. На втором этапе выполнения работы для тех же значений расходов горячей и холодной воды расчётным путем найти значение коэффициента теплопередачи $K_{расч}$, воспользовавшись формулами (7.6)–(7.18). Сравнить расчётное и экспериментальные значения коэффициента теплопередачи, установив относительные отклонения в их значениях.

Варианты индивидуальных заданий

Вариант	Показания ротаметров подачи воды, деления	
	горячей	холодной
1	20	20
2	30	30
3	40	40
4	50	50
5	60	60
6	20	30
7	30	40
8	40	50
9	50	30
10	60	40

Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка (рис. 7.1) включает теплообменник 1, состоящий из внутренней трубы с наружным диаметром 32 мм и внешней трубы с наружным диаметром 57 мм, длиной 1500 мм, работающий по принципу противотока; горячий теплоноситель (вода) перемещается по внутренней трубе, холодный (вода) – по межтрубному пространству. Расход горячей воды контролируется ротаметром 2, холодной – ротаметром 3; расход воды регулируется вентилями 4 и 5. Термометры 6 и 7 служат для измерения температуры горячей воды на входе и выходе из теплообменника, термопары 8 и 9 – для измерения температуры холодной воды.

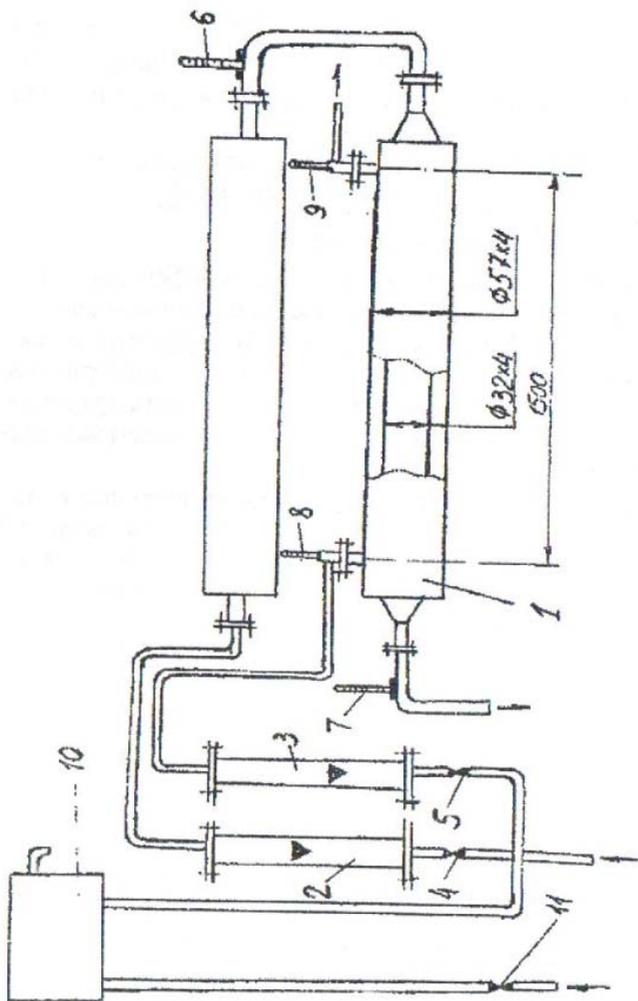


Рис. 7.1. Схема экспериментальной установки для изучения процесса теплопередачи

Порядок выполнения работы

1. Открыв вентиль *I*, заполнить напорный бак *10* холодной водой; вентилем *5* отрегулировать расход холодной воды согласно варианту (уровень воды в баке поддерживать постоянным).

2. Вентилем *4* отрегулировать расход горячей воды согласно варианту.

3. После достижения стандартного режима измерить температуру горячей и холодной воды на входе и выходе из теплообменника.

4. С помощью калибровочных графиков для ротаметров *2* и *3* (рис. 7.3) определить расход воды. Полученные данные внести в таблицу.

Показание ротаметра		Температура воды, °С				Расход воды, м ³ /с		Температурный напор, °С			Коэффициент теплопередачи $K_{\text{эксп}}$, Вт/м ² · град
		горячей		холодной		горячей	холодной				
<i>2</i>	<i>3</i>	$t_{1\text{вх}}$	$t_{1\text{вых}}$	$t_{2\text{вх}}$	$t_{2\text{вых}}$	V_1	V_2	Δt_1	Δt_2	$\Delta t_{\text{ср}}$	

5. По формулам (7.1)–(7.5) установить экспериментальное значение коэффициента теплопередачи $K_{\text{эксп}}$ и внести его в таблицу.

6. По формулам (7.6)–(7.18) рассчитать расчётное значение коэффициента теплопередачи $K_{\text{расч}}$.

Примечания к порядку выполнения работы

1. В расчётные формулы (7.6)–(7.18) входят теплофизические параметры воды: коэффициент объёмного расширения β , коэффициент теплопроводности λ , кинематическая вязкость и число Прандтля Pr . Значения этих параметров в зависимости от температуры приведены на рис. 7.2.

2. Коэффициент теплопроводности стенки $\lambda_{\text{ст}}$ материала трубы (стали) 46,5 Вт/(м · град).

3. Численное значение термического сопротивления загрязнений стенки $r_{\text{загр}}$ при расчёте по формуле (7.9) выбрать равным 0,0005 м² · град/Вт.

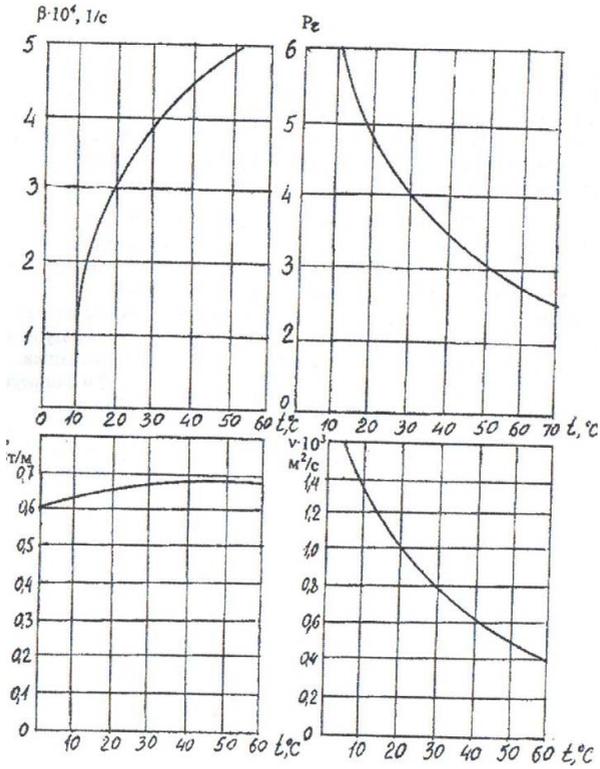


Рис. 7.2. Зависимость теплофизических свойств воды от температуры



Рис. 7.3. Калибровочный график ротаметров 2 и 3

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель и задачи работы, задание, экспериментальные и расчётные результаты.

Заключительной частью отчёта являются выводы обо всех результатах исследований (экспериментальных и расчётных).

Вопросы для самоконтроля

1. В чём сущность теплоотдачи при вынужденном движении жидкости в трубах и колоннах?
2. В чём заключаются различия между коэффициентами теплоотдачи и теплопередачи?
3. При какой температуре определяют термодинамические свойства теплоносителей?
4. В каких случаях для расчёта коэффициента теплопередачи используют среднелогарифмическую разность температур?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. — 13-е изд. — М. : Альянс, 2006. — С. 326–337.
2. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды : учеб. пособие. — М. : ИНФРА-М, 2014. — С. 209–219.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : учеб. пособие для вузов. — 4-е изд. — СПб. : Химиздат, 2017. — С. 148–165.

Лабораторная работа 8

Изучение процесса абсорбции углекислого газа водой в насадочной колонне

Цель работы — закрепить знания по процессу абсорбции на примере поглощения углекислого газа водой в насадочной колонне; рассчитать коэффициент массоотдачи в жидкой фазе по основному уравнению массопереноса на основе экспериментальных данных.

Описание лабораторной установки

Абсорбер 3 (рис. 8.1) диаметром 40 мм и высотой 0,4 м заполнен насадкой из стеклянных колец 10×10×1 мм. Вода поступает в абсорбер из напорного бака 1, стекает по насадке, накапливается в стакане 4, сливается в канализацию. Расход воды регулируется вентилем 10 и измеряется ротаметром 2.

Углекислый газ поступает в нижнюю часть абсорбера из ресивера 5 через ротаметр 6. Расход газа регулируется ротаметром 7. Температура газа и абсорбента измеряется термометрами 8 и 9. Манометр 18 служит для измерения давления в нижней части абсорбера.

Порядок выполнения работы

1. Установить заданный согласно варианту индивидуальных заданий расход воды с помощью вентиля 10 (вентили 12 и 17 закрыты).

2. Открыв вентиль 16, соединить ресивер с абсорбером, зафиксировать (в соответствии с вариантом) заданный расход газа с помощью вентиля 14 и 15. Спустя 2–3 мин снять показания всех ротаметров, обоих термометров и манометра.

3. С помощью калибровочных графиков определить расход воды, а также расход газа в нижней и верхней частях колонны.

4. Рассчитать скорость растворения углекислого газа в воде M , м³/с:

$$M = G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}}, \quad (8.1)$$

где $G_{\text{вх}}$ и $G_{\text{вых}}$ — объёмный расход CO_2 соответственно на входе в колонну и на выходе из колонны, м³/с.

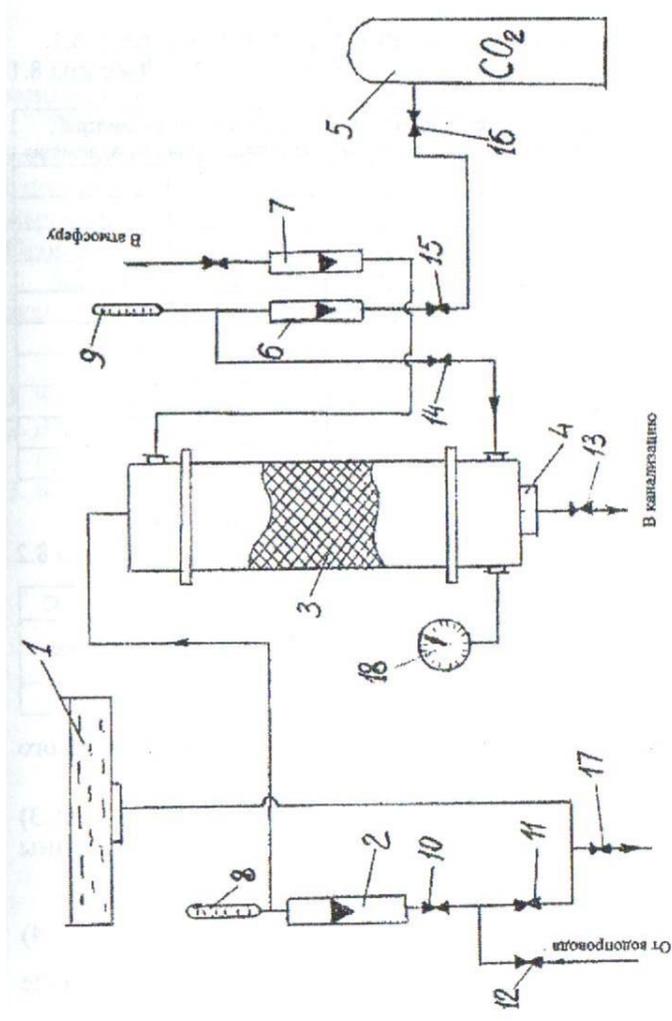


Рис. 8.1. Схема экспериментальной установки для изучения абсорбции углекислого газа

5. Вычислить среднюю по высоте абсорбера движущую силу процесса по формуле

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{\Delta_{\text{верх}} - \Delta_{\text{низ}}}{\ln \frac{\Delta_{\text{верх}}}{\Delta_{\text{низ}}}}, \quad (8.2)$$

где $\Delta_{\text{ср}}$, $\Delta_{\text{верх}}$, $\Delta_{\text{низ}}$ — соответственно средняя движущая сила, движущая сила в верхней части колонны, движущая сила в нижней части колонны.

Движущая сила Δ равна разности растворимости C^* углекислого газа в воде и рабочей концентрации CO_2 в воде C :

$$\Delta = C^* - C. \quad (8.3)$$

Концентрацию углекислого газа в воде на выходе из колонны $C_{\text{низ}}$ определить на основе уравнения материального баланса:

$$C_{\text{низ}} = C_{\text{верх}} + \frac{G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}}}{L}, \quad (8.4)$$

где L — расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; $C_{\text{верх}}$ — концентрация CO_2 в воде на входе в колонну (в условиях проведения опыта $C_{\text{верх}} = 0$).

6. Рассчитать коэффициент массоотдачи в жидкой фазе для всех режимов работы аппарата по уравнению массоотдачи:

$$\beta_{\text{ж}} = \frac{M}{\Delta_{\text{ср}} S H a}, \quad (8.5)$$

где S — площадь поперечного сечения колонны, равная $0,0012 \text{ м}^2$; H — высота слоя насадки, равная $0,4 \text{ м}$; a — удельная поверхность насадки, равная $570 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Варианты индивидуальных заданий

Вариант	Показания ротаметра на линии подачи воды, деления	Показания ротаметра на линии подачи газа, деления
1	20	4
2	30	4
3	40	4
4	50	4
5	60	4
6	20	7

Вариант	Показания ротаметра на линии подачи воды, деления	Показания ротаметра на линии подачи газа, деления
7	30	7
8	40	7
9	50	7
10	60	7

Результат экспериментальных замеров

Показания ротаметров, деления			Расход, м ³ /с		Температура, °С		
			воды	углекислого газа			
2	6	7		вход	выход	воды	газа

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель и задачи работы, задание, экспериментальные результаты, расчётные материалы.

Экспериментальные результаты представляют в виде таблиц со всеми промежуточными значениями. Расчётные результаты приводят с подробным изложением всех рассуждений, допущений и используемых формул, подставляя все численные значения в формулы. Окончательные результаты оформляют в виде итоговой таблицы.

Заключительной частью отчёта являются выводы обо всех результатах исследований (экспериментальных и расчётных).

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое равновесие в системе «газ – жидкость»?
2. Какой процесс называется абсорбцией?
3. Какими законами описывается состояние равновесия в процессах абсорбции?
4. Какой переход осуществляет распределяемое вещество в процессе абсорбции?
5. В каких условиях процесса абсорбции абсорбент обладает большой поглотительной способностью?

6. В чём заключаются особенности уравнения материального баланса противоточного абсорбера непрерывного действия?
7. Как определяется средняя по высоте аппарата движущая сила?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. — 13-е изд. — М. : Альянс, 2006. — С. 478–484.
2. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды : учеб. пособие. — М. : ИНФРА-М, 2014. — С. 294–322.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : учеб. пособие для вузов. — 4-е изд. — СПб. : Химиздат, 2017. — С. 271–284.

Лабораторная работа 9

Определение температуры кипения смеси четырёххлористого углерода, бензола и воды

Цель работы — закрепить знания по фазовому равновесию в системе «жидкость — пар» для взаимно растворимых и нерастворимых жидкостей; в частности, оценить влияние на температуру кипения бинарной смеси содержания каждой ее составляющей на примере четыреххлористого углерода и бензола, а также определить температуру кипения неоднородной системы, состоящей из вышеназванной бинарной смеси и воды, являющихся взаимно нерастворимыми.

Основные понятия и расчётные формулы

Различные смеси значительно отличаются по своим свойствам. Простейший случай — равновесие бинарной смеси, состоящей из компонентов A и B . Для изучения фазового равновесия целесообразно предварительно изучить поведение так называемых идеальных смесей, с которыми сравнивают поведение реальных растворов.

Если жидкую идеальную бинарную смесь в течение значительного времени выдерживать в замкнутом объёме при кипении в условиях постоянной температуры и постоянного давления, то система, состоящая из пара и жидкости, придёт в состояние равновесия.

В условиях равновесного состояния потоки компонентов из фазы в фазу будут одинаковы; при этом состав пара будет отличаться от состава жидкости. Идеальные смеси подчиняются закону Рауля:

$$p_A = P_A \cdot x; \quad p_B = P_B(1 - x), \quad (9.1)$$

где p_A и p_B — парциальные давления компонентов A и B ; x и $(1 - x)$ — мольные доли компонентов A и B в жидкой смеси; P_A и P_B — давления паров чистых компонентов A и B .

В то же время парциальные давления компонентов в системе следуют закону Дальтона:

$$p_A = P \cdot y; \quad p_B = P(1 - y), \quad (9.2)$$

где P — общее давление в системе; y и $(1 - y)$ — мольные доли компонентов A и B в паровой смеси.

Смесь будет кипеть при такой температуре, при которой сумма парциальных давлений p_A и p_B будет равна внешнему давлению.

Если сосуд со смесью открыт, то внешнее давление будет равно барометрическому давлению B , которое измеряют барометром.

Всё изложенное выше, в том числе и формулы, справедливо для идеальных смесей. Реальные газы и жидкости отличаются от идеальных. При этом, чем больше отклонения от идеальных жидкостей и газов, тем выше разница в расчётных и экспериментальных значениях параметров. Отклонения характеризуются поправками на неидеальность жидкой фазы.

Смесь четырёххлористого углерода и бензола является бинарной с неограниченной растворимостью компонентов друг в друге. Свойства смеси в большей степени зависят от содержания каждого из них.

На рис. 9.1 изображена зависимость давления насыщенного пара четырёххлористого углерода и бензола от температуры. По формулам (9.1), (9.2) и приведённой зависимости рассчитывают температуру кипения смеси при барометрическом давлении. Фактическая температура кипения смеси (определённая экспериментально) будет, несомненно, отличаться от расчётной, из-за того что смесь не является идеальной.

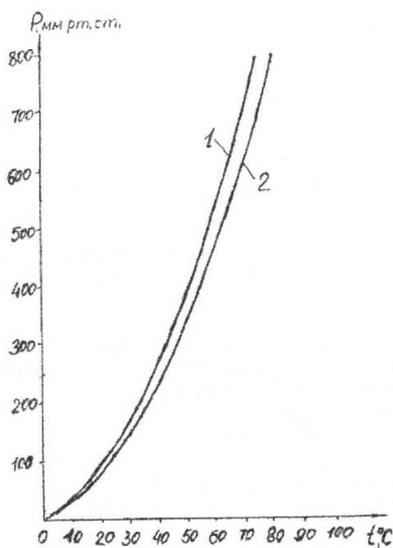


Рис. 9.1. Давление насыщенного пара органических жидкостей в зависимости от температуры: 1 — четырёххлористого углерода; 2 — бензола

При смешении жидких компонентов A и B , полностью нерастворимых друг в друге, и при условии, что паровая фаза является идеальной, каждый компонент ведёт себя независимо. Рассматриваемая смесь закипает при давлении

$$P = P_A + P_B. \quad (9.3)$$

Таким образом, при нерастворимости компонентов парциальное давление каждого компонента равно давлению насыщенного пара при той же температуре. Температура кипения смеси $t_{\text{см}}$ остаётся постоянной независимо от состава жидкой смеси.

Смеси четырёххлористого углерода с водой и бензола с водой в определённой степени можно считать взаимно нерастворимыми, так как абсолютно нерастворимых друг в друге компонентов не существует. К нерастворимым можно отнести и смесь воды со смесью четырёххлористого углерода и бензола. В данном случае также можно рассчитать температуру кипения данной смеси, используя зависимости на рис. 9.1 и формулы (9.1)–(9.3). Экспериментально определённая температура кипения будет отличаться от расчётной из-за отличия смеси от идеальной. Разница экспериментально определённого значения температуры кипения и расчётного её значения характеризует степень отклонения смеси от идеальности.

Программа работы

1. Согласно варианту индивидуальных заданий выбрать соотношение четырёххлористого углерода и бензола в исходной смеси.
2. Рассчитать температуру кипения бинарной смеси по формулам (9.1) и (9.2) с использованием графических зависимостей давления насыщенного пара четырёххлористого углерода и бензола от температуры (рис. 9.1).
3. После нахождения расчётной температуры кипения экспериментально замерить температуру кипения указанной смеси и определить относительное отклонение расчётной температуры кипения от экспериментального её значения.
4. Во второй части выполнения лабораторной работы указанную смесь в соотношении 1:1 (по объёму) смешать с водой. Для данной

смеси также найти температуру кипения, используя график зависимости давления от температуры (рис. 9.1) и формулы (9.1)–(9.3).

Варианты индивидуальных заданий

Вариант	Соотношение четырёххлористого углерода и бензола в смеси (по объёму)	Соотношение воды и бинарной смеси (четырёххлористого углерода и бензола)
1	0,9:0,1	1:1
2	0,8:0,2	1:1
3	0,7:0,3	1:1
4	0,6:0,4	1:1
5	0,5:0,5	1:1
6	0,4:0,6	1:1
7	0,3:0,7	1:1
8	0,2:0,8	1:1
9	0,1:0,9	1:1
10	0,45:0,55	1:1

Рекомендации по выполнению работы

Количество бинарной смеси (четырёххлористого углерода и бензола) составляет 50 мл. Смесь (согласно варианту) приготавливают в мерном цилиндре, после чего приготовленную смесь выливают в стакан объёмом 150 мл.

Нагрев бинарной смеси с целью определения температуры кипения ведут на водяной бане. Температуру замеряют термометром.

При выполнении второй части работы указанную смесь разбавляют водой в соотношении 1:1. При нагреве полученной смеси её постоянно перемешивают стеклянной палочкой.

Определение температуры кипения расчётным методом ведут в соответствии с рекомендациями, изложенными в предыдущем подразделе.

Указания по технике безопасности

Все этапы работы по приготовлению, разбавлению смеси и её нагреву выполняются в вытяжном шкафу при включенной вытяжке. Следует помнить, что четырёххлористый углерод и бензол обладают высокой летучестью, вследствие этого их содержание в газовой фазе достаточно высокое.

Бензол является горючим веществом, поэтому необходимо соблюдать меры противопожарной безопасности. При его воспламенении нужно накрыть очаг возгорания асбестовым одеялом либо засыпать его песком.

Четырёххлористый углерод и его смеси с бензолом (при его содержании в смеси более 50 %) не являются горючими.

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель и задачи работы, задание, экспериментальные результаты, расчётные материалы.

Экспериментальные результаты представляют в виде таблиц со всеми промежуточными значениями. Расчётные результаты приводят с подробным изложением всех рассуждений, допущений и используемых формул, подставляя все численные значения в формулы. Окончательные результаты оформляют в виде итоговой таблицы.

Заключительной частью отчёта являются выводы по полученным результатам исследований (экспериментальным и расчётным).

Вопросы для самоконтроля

1. В реальных бинарных смесях жидких компонентов с неограниченной растворимостью друг в друге отклонение от закона Рауля происходит в сторону увеличения или уменьшения парциальных давлений компонентов?
2. Что такое азеотропная точка?
3. Каким образом содержание каждого из нерастворимых друг в друге компонентов влияет на температуру кипения смеси?
4. Какой закон выражает зависимость между парциальным давлением компонента и мольной долей этого компонента в паровой смеси?
5. Какое влияние на температуру кипения смеси оказывает повышение давления в системе?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. — 13-е изд. — М. : Альянс, 2006. — С. 547–556.
2. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды : учеб. пособие. — М. : ИНФРА-М, 2014. — С. 342–353.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : учеб. пособие для вузов. — 4-е изд. — СПб. : Химиздат, 2017. — С. 271–274.

Лабораторная работа 10

Изучение процесса ректификации

Цель работы — закрепить знания по процессу ректификации бинарных смесей на примере ректификации смеси «этиловый спирт – вода». В задачу работы входит расчёт числа теоретических тарелок и определение высоты теоретической тарелки ректификационной колонны на установке периодического действия.

Основные понятия и расчётные формулы

Ректификация — процесс разделения жидких гомогенных систем путём взаимного обмена компонентами между жидкостью и паром, получаемым путем нагревания разделяемой смеси. Этот процесс основан на различной летучести компонентов, составляющих смесь, т. е. на различии температур их кипения при одном и том же давлении.

Процесс ректификации осуществляют в колоннах, представляющих собой вертикальные цилиндрические аппараты с контактными устройствами. Наибольшее распространение в промышленности получили ректификационные колонны, в которых в качестве контактных устройств используются колпачковые, ситчатые и провальные тарелки. В ректификационной колонне навстречу друг другу проходят неравновесные по составу потоки пара и жидкости. Пар в колонне идёт снизу вверх, а жидкость стекает сверху вниз. В результате контактного взаимодействия пар обогащается более летучим (низкокипящим) компонентом, а жидкость — менее летучим (высококипящим). Развитая поверхность контакта фаз на тарелках образуется пузырьками и струями пара при многократном его прохождении (барботаже) через слои жидкости.

Основной задачей ректификационных установок в пищевой промышленности является получение из 40-процентного спирта-сырца спирта-ректификата с концентрацией спирта не менее 96 % при минимальном содержании посторонних примесей. Известно, что этиловый спирт хорошо растворяется в воде, образуя бинарную водно-спиртовую смесь с различным содержанием спирта. Температура кипения 100-процентного этилового спирта (78,3 °С при давлении 760 мм рт. ст.) значительно отличается от свойств ди-

стиллированной воды, и это различие используется при разделении компонентов различных спиртосодержащих материалов для получения спирта высокой концентрации.

Выделение из водно-спиртовой смеси спирта должно осуществляться при температуре кипения, соответствующей концентрации смеси, и при постоянном давлении паров над смесью. При давлении 760 мм рт. ст. температура кипения различных по концентрации водно-спиртовых смесей практически непрерывно уменьшается от 100 °С при концентрации спирта 0 % до 78,3 °С при 100 % (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Равновесные составы жидкости x и пара y (% мол.)
и температуры кипения t (°С) смеси «этиловый спирт – вода»
при давлении 760 мм рт. ст.

x	y	t
0	0	100
10	44,2	86,5
20	53,1	83,2
30	57,6	81,7
40	61,3	80,8
50	65,4	80
60	69,9	79,4
70	75,3	79
80	81,8	78,6
90	89,8	78,4
100	100	78,3

Исключение составляет некоторая область концентраций вблизи точки азеотропы (94,6 % об.), где температура кипения становится несколько ниже температуры кипения 100-процентного этилового спирта. Азеотропными или нераздельно кипящими называют смеси, у которых пар, находящийся в равновесии с жидкостью, имеет тот же состав, что и кипящая смесь. Разделение таких смесей ректификацией невозможно, так как при конденсации паров получается жидкость такого же состава, что и исходная смесь. Температура кипения азеотропной смеси, которую называют этиловый спирт-ректификат, равна 78,15 °С, а концентрация спирта – от 96 до 96,4 % об.

Описание экспериментальной установки и рекомендации по выполнению работы

Экспериментальная установка для изучения процесса ректификации (рис. 10.1) состоит из испарительного куба 1, вертикально установленной на его крышке ректификационной колонны и электрического нагревателя 9.

Основная часть установки представляет собой составную колонну, которая делится на верхнюю 3 и нижнюю 2 ректификационные части. Верхняя часть состоит из конденсирующего устройства 4, холодильника 5, регулятора отбора спирта 6 и системы связывающих их патрубков 10. При проведении ректификации в конденсатор 4 и теплообменник 5 конструкции «труба в трубе» противоток постоянно поступает охлаждающая вода.

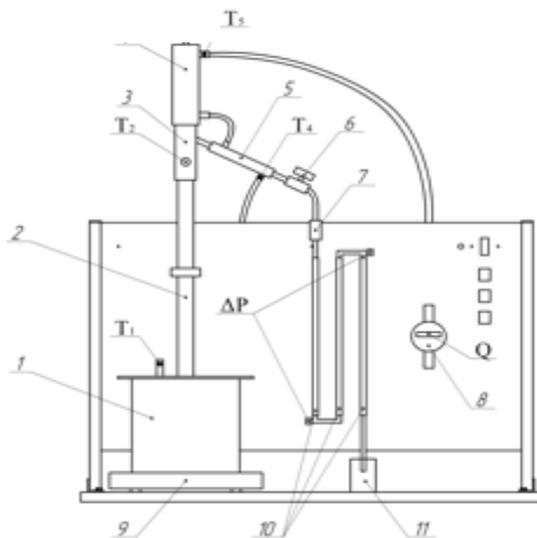


Рис. 10.1. Схема экспериментальной установки для изучения процесса ректификации: T_1 – температура в испарительном кубе; T_2 – температура в конденсирующем устройстве; T_3 – температура воды на выходе из охлаждающего контура; T_4 – начальная температура охлаждающей воды (источник: measlab.ru)

В верхней части испарительной ёмкости сделаны выводы манометрической трубки для измерения давления образующегося пара и перепада давления в колонне. Измерение перепадов давления пара

на ректификационной колонне и гидростатическом ареометре, температур пара и жидкости в колонне и воды в охлаждающем контуре производится с помощью датчиков давления и термопар, электрические выводы которых заведены на многоканальный измеритель. Измерения основных параметров, характеризующих процесс, регистрируются компьютерной системой измерения и в режиме реального времени отображаются на экране, как и результаты машинной обработки полученных данных.

Процесс ректификации водно-этанольной смеси на учебной установке производительностью 0,5 л этанола в час осуществляется следующим образом:

1) кубовая жидкость с помощью электрического нагревателя, работающего в стартовом режиме с мощностью 1 кВт, доводится до кипения;

2) образующийся в кубе пар поднимается по ректификационной колонне и поступает в конденсатор, где конденсируется с образованием дистиллята;

3) часть дистиллята (флегма) возвращается в верхнюю царгу, а оставшаяся часть через холодильник поступает в приёмную ёмкость *II*. Соотношение между расходами флегмы и отбираемого дистиллята называется флегмовым числом. Его изменение осуществляется вручную регулятором отбора дистиллята. При этом по всей высоте колонны происходит непрерывный процесс тепломассообмена между стекающей вниз флегмой и поднимающимся вверх паром. В результате в верхней части колонны в составе пара и флегмы накапливаются легкокипящие компоненты исходной смеси;

4) с помощью управляемого вручную регулятора отбора дистиллята организуется медленный и последовательный отбор этих веществ в приёмную ёмкость № 1 с последующей их идентификацией по компьютерным записям температуры паров, поступающих в конденсатор, с учётом фактического атмосферного давления;

5) после выхода легкокипящих компонентов и при достижении температуры паров 78,3 °С начинается наиболее продолжительный период работы по отгону этилового спирта, который осуществляется при замене приёмной ёмкости на новую (ёмкость № 2);

6) для получения спирта-ректификата требуемого качества флегмовое число должно быть не менее трёх. Это означает, что из четырех частей дистиллята в приёмную ёмкость отбирается одна часть, а три остальных должны быть возвращены в ректификационную колонну для орошения её контактных элементов;

7) при полностью открытом отборе дистиллята флегмовое число становится равным нулю. При этом контактные элементы ректификационной колонны полностью «иссушаются» и ректификационная установка превращается в перегонную;

8) отбор спирта-ректификата завершается при достижении температуры его паров $78,4^{\circ}\text{C}$. Условно считается, что количество низкокипящих примесей, находящихся в этот момент в получаемом спирте, соответствует допустимым нормам;

9) выключение установки производится после отбора фракции примесей. Этот отбор не является ответственным этапом ректификации и не предполагает изменение настройки колонны, а лишь замену приёмной ёмкости № 2 на ёмкость № 3. Отбор хвостовых фракций завершается при достижении температуры пара в конденсаторе порядка $82\text{--}85^{\circ}\text{C}$.

В ходе лабораторного эксперимента концентрацию получаемого спирта определяют по текущим значениям его плотности (статическому давлению тарированного столба жидкости, отводимой в приёмную ёмкость, с учётом её температуры).

Во время проведения работы важно не допустить режима захлёбывания колонны, который наступает при превышении предельной скорости подъёма пара по колонне. В этом случае гравитационные силы, обеспечивающие стекание флегмы вниз, не в состоянии преодолеть противодействующий им динамический напор пара. Тогда флегма сначала замедляет свою скорость течения вниз, затем просто останавливается, повисая в колонне, и накапливается в её внутренней полости и дефлегматоре. В таком состоянии колонна может находиться не более 30–60 с. Затем происходит аварийный выброс флегмы через верхний штуцер дефлегматора. Начало захлёбывания можно определить по возникновению характерных пульсаций на записи перепада давления в колонне и появлению «булькающего» шума при работе установки.

Предельная скорость пара зависит от конструкции контактных элементов, заполнения ими внутреннего сечения колонны. Обычно она находится в пределах от 0,5 до 1,2 м/с. При этом максимальная эффективность разделения смеси реализуется при работе колонны вблизи состояния захлёбывания. Однако колонну с любыми контактными элементами можно нагружать и меньшими потоками пара, уменьшая мощность, подводимую к нагревателю. На установке для этого реализуются два режима работы нагревателя: стартовый — для доведения кубовой жидкости до кипения (1,0 кВт) — и технологический (0,5 кВт) — для проведения ректификации.

Захлёбывание колонны может наступить и при правильно подведённой к нагревателю технологической мощности. Существует несколько причин такого явления: пенообразование в нижней части колонны при использовании сырья, содержащего ПАВ; переполнение испарительной ёмкости перерабатываемой жидкостью; резкое снижение атмосферного давления; повышенное напряжение в сети, приводящее к заметному увеличению мощности, выделяемой нагревателем.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки и расположением приборов. Составить её описание и заготовить таблицу для регистрации результатов испытаний.
2. Заполнить испарительную ёмкость на $\frac{3}{4}$ исходной смесью с концентрацией этанола не более 45 % об.
3. Полностью перекрыть отбор дистиллята регулятором его отбора.
4. Проверить правильность сборки и герметичность системы патрубков.
5. Подключить подвод и отвод охлаждающей воды из водопроводной сети, убедиться в правильности последовательного подключения холодильника отводимого конденсата и конденсатора для работы в режиме противотока охлаждающей жидкости.
6. Подключить стенд к сети 220 В и включить питание сети.
7. Подключить автоматизированный стенд к USB-разъёму компьютера и запустить программу, последовательно выбирая в меню

«Пуск» → «Программы» → «MeasLAB» → «Ректификация». Ознакомиться с руководством по работе с программным обеспечением.

8. Включить нагреватель испарительной ёмкости (кнопка ВК1).

9. После стабилизации показаний измерительных приборов запустить в работу компьютерную систему автоматического измерения параметров процесса и по показаниям приборов проследить изменения температуры жидкости и парогазовой среды.

10. Проконтролировать последовательное поступление образующегося в испарительной ёмкости пара в ректификационную колонну и конденсатор, начало конденсации паров и образования дистиллята. Зафиксировать температуру кипения раствора, температуру и давление парогазовой среды в испарительной ёмкости, суммарное количество энергии, затраченной на нагрев жидкости, конструкции установки и потери тепла в окружающую среду, и занести полученные данные в таблицу.

11. Полностью открыть отбор дистиллята и сосчитать количество капель, поступающее в приёмную ёмкость за 20 секунд.

12. Задать флегмовое число не менее 4, установив регулятор отбора дистиллята на уменьшенное в 5 раз число капель за то же время.

13. До достижения температуры паров $78,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ осуществлять приём легкокипящих компонентов смеси в приёмную ёмкость № 1.

14. При достижении температуры паров $78,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ заменить приёмную ёмкость на новую, с помощью управляемого вручную регулятора отбора дистиллята установить большее флегмовое число (но не менее 3).

15. Зафиксировать и занести в таблицу значения параметров теплообмена:

- показание счётчика расхода воды, поступающей в холодильник и конденсатор;
- температуру воды, поступающей в конденсатор;
- температуру воды на выходе из конденсатора.

16. Завершить отбор спирта-ректификата при достижении температуры его паров $78,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зафиксировать время окончания отбора и показание счётчика расхода воды.

17. После окончания отбора выключить нагреватель испарительной ёмкости (кнопка ВК1). После того как колонна остынет,

прекратить подачу воды на конденсатор и холодильник. Выключить систему измерения и цифровые измерительные приборы на лицевой панели установки.

18. Отключить установку от электрической сети.

19. После слива кубового остатка и очистки испарительной ёмкости привести установку в исходное состояние.

20. Произвести обработку полученных данных, определить концентрацию этилового спирта в кубовом остатке и дистилляте. Занести результаты в таблицу.

21. Определить число теоретических тарелок ректификационной колонны и высоту теоретической тарелки.

Обработка экспериментальных данных

Флегмовое число R — отношение расхода флегмы к расходу дистиллята — определяют по количеству капель отбираемого дистиллята за 20 с, а также рассчитывают его из уравнения теплового баланса дефлегматора:

$$Q = (R + 1)G_p r_p = W_b c_b (t_b'' - t_b'),$$

где G_p — расход дистиллята, кмоль/с; r_p — теплота конденсации дистиллята, кДж/кмоль; W_b — расход охлаждающей воды, кг/с; c_b — её теплоёмкость, кДж/(кг · К); t_b' и t_b'' — температуры воды на входе в конденсатор и выходе из него.

Таблица 10.2

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	Наименование параметров и единицы их измерения	Текущие значения контролируемых параметров	Среднее значение
1. Начальный период ректификации. Отбор головных фракций			
1.1	Время испарения легкокипящих фракций, мин		
1.2	Температура кипения жидкости, °С		
1.3	Температура пара и флегмы в колонне, °С		
1.4	Температура пара в конденсаторе, °С		
1.5	Давление парогазовой смеси на входе в колонну, кПа		

Окончание табл. 10.2

№ п/п	Наименование параметров и единицы их измерения	Текущие значения контролируемых параметров	Среднее значение
1.6	Давление столба дистиллята в гидростатическом плотномере, кПа		
1.7	Расход отбираемого дистиллята, кол-во капель за 20 с		
1.8	Флегмовое число в начальный период ректификации		
2. Основной период ректификации. Отбор этилового спирта			
2.1	Время испарения фракции, мин		
2.2	Температура кипения жидкости, °С		
2.3	Температура пара и флегмы в колонне, °С		
2.4	Температура пара в конденсаторе, °С		
2.5	Давление парогазовой смеси на входе в колонну, кПа		
2.6	Давление столба дистиллята в гидростатическом плотномере, кПа		
2.7	Расход отбираемого дистиллята, кол-во капель за 20 с		
2.8	Электрическая энергия, выделяемая нагревателем, кол-во импульсов счётчика		
2.9	Расход воды, поступающей в холодильник и конденсатор, л/с		
2.10	Температура воды, поступающей в конденсатор, °С		
2.11	Температура воды на выходе из конденсатора, °С		
2.12	Флегмовое число в основной период ректификации		
3. Окончание ректификации			
3.1	Концентрация дистиллята, % об.		
3.2	Концентрация кубового остатка, % об.		

По объёмным концентрациям вычисляют мольные концентрации этилового спирта в дистилляте x_p и кубовом остатке $x_{\text{к}}$. По данным табл. 10.1 строят на миллиметровой бумаге кривую равновесия $y = f(x)$, отмечают на оси абсцисс значения x_p , $x_{\text{к}}$.

Зная рабочее флегмовое число R и состав дистиллята x_p , находят на диагонали диаграммы $y - x$ точку a с абсциссой x_p и на оси ординат точку d по отрезку $B = \frac{x_p}{R+1}$ (рис. 10.2).

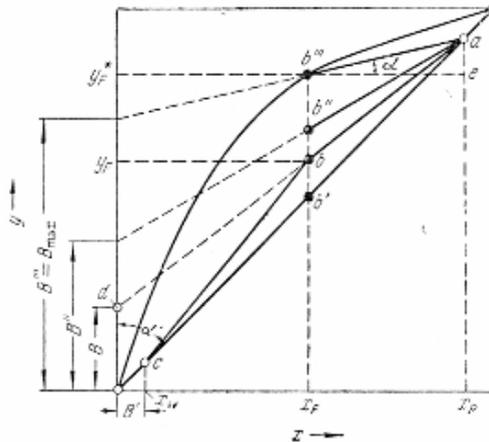


Рис. 10.2. Построение рабочей линии ректификационной колонны

Проводя через точки a и d линию рабочих концентраций, находят число ступеней изменения концентраций N путём построения ломаной линии между линиями равновесия и рабочих концентраций в пределах от x_p до x_w .

Каждая ступень соответствует одной теоретической тарелке. Определив число теоретических ступеней N и зная высоту насадки в колонне, находят высоту теоретической тарелки ВТТ.

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель и задачи работы, задание, экспериментальные результаты, расчетные материалы.

Экспериментальные результаты представляют в виде таблиц со всеми промежуточными значениями. Расчётные результаты приводят с подробным изложением всех рассуждений, допущений и используемых формул, подставляя все численные значения в формулы. Окончательные результаты оформляют в виде итоговой таблицы.

Заключительной частью отчёта являются выводы обо всех результатах исследований (экспериментальных и расчётных).

Вопросы для самоконтроля

1. Какой процесс называется ректификацией?
2. Какие смеси называют азеотропными?
3. Как устроена ректификационная колонна?
4. Какие устройства используются в ректификационной колонне в качестве элементов для увеличения контактного взаимодействия движущихся в колонне фаз?
5. С чем связано захлёбывание ректификационной колонны?
6. Какая величина называется флегмовым числом?
7. Как работает ректификационная колонна при равенстве флегмового числа нулю?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. — 13-е изд. — М. : Альянс, 2006. — С. 572–581.
2. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды : учеб. пособие. — М. : ИНФРА-М, 2014. — С. 353–365.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : учеб. пособие для вузов. — 4-е изд. — СПб. : Химиздат, 2017. — С. 310–316.

Лабораторная работа 11

Изучение гидродинамики насадочной колонны

Цель работы — закрепить знания по гидродинамике массообменных аппаратов на примере насадочной колонны, определив гидравлическое сопротивление сухой и орошаемой насадок.

Насадочные массообменные аппараты

Широкое распространение в промышленности в качестве массообменных аппаратов получили колонны, заполненные насадкой — твердыми телами различной формы.

В насадочной колонне жидкость течет по элементу насадки главным образом в виде тонкой пленки, поэтому поверхностью контакта фаз является в основном смоченная поверхность насадки, и насадочные аппараты можно рассматривать как разновидность пленочных. При перетекании жидкости с одного элемента насадки на другой пленка жидкости разрушается и на нижележащем элементе образуется новая пленка.

Основными характеристиками насадки являются ее удельная поверхность a ($\text{м}^2/\text{м}^3$) и свободный объем ε ($\text{м}^3/\text{м}^3$).

Насадочные абсорберы могут работать в различных гидродинамических режимах.

Плёночный режим наблюдается при небольших плотностях орошения и малых скоростях газа. Количество задерживаемой в насадке жидкости при этом режиме практически не зависит от скорости газа.

Режим *подвисяния* начинается, когда при противотоке фаз вследствие увеличения сил трения газа о жидкость на поверхности соприкосновения фаз происходит торможение жидкости газовым потоком. В результате этого скорость течения жидкости уменьшается, а толщина ее пленки и количество в насадке увеличиваются.

Режим *эмульгирования* возникает в результате накопления жидкости в свободном объеме насадки. Накопление жидкости происходит до тех пор, пока сила трения между стекающей жидкостью и поднимающимся по колонне газом не уравновесит силу тяжести жидкости, находящейся в насадке. Режим эмульгирования соответствует максимальной эффективности контакта фаз, которая в этом случае определяется не только (и не столько) геометриче-

ской поверхностью насадки, сколько поверхностью пузырьков и струй газа в жидкости, заполняющей весь свободный объём насадки. Однако при работе колонны в таком режиме её гидравлическое сопротивление относительно велико.

Режим *уноса* иначе называется режимом обратного движения жидкости, выносимой из аппарата газовым потоком. Этот режим на практике не используется.

Тип применяемых насадок достаточно широк. Наиболее распространёнными являются кольца Рашига – насадка в виде тонкостенных керамических колец высотой, равной диаметру, который изменяется в пределах 15–150 мм. Кольца малых размеров засыпают в аппарат навалом.

Программа работы

1. На первом этапе при фиксированном значении высоты насадки, которая задаётся согласно варианту индивидуальных заданий, на основе экспериментальных данных снять показатели зависимости гидравлического сопротивления сухой насадки от скорости воздуха. Результаты занести в таблицу и построить графическую зависимость. Аналогичную зависимость зафиксировать на основе расчётных данных (результаты занести в таблицу и отразить на графике). Использовать расчётные формулы:

$$w_r = \frac{V_r}{F}, \quad (11.1)$$

где w_r – скорость воздуха, отнесённая к полному сечению колонны, м/с; V_r – объёмный расход воздуха, м³/с; F – площадь сечения колонны, м²;

$$\text{Re} = \frac{w_r \cdot d_3 \cdot \rho_r}{\mu_r}, \quad (11.2)$$

где d_3 – эквивалентный диаметр каналов, равный $0,73 \cdot 10^{-2}$ м; ρ_r – плотность воздуха, равная 1,2 кг/м³; μ_r – динамическая вязкость воздуха, равная 10^{-3} Па · с;

$$\Delta P_r = \lambda \frac{l}{d_3} \cdot \frac{\rho_r w_r^2}{2\varepsilon^2}, \quad (11.3)$$

где ΔP_r – гидравлическое сопротивление сухой насадки, Н/м²; l – высота слоя насадки, м; λ – коэффициент трения; ε – порозность слоя, равная 0,6 м³/м³;

$$\lambda = \frac{140}{\text{Re}} \quad (\text{при } \text{Re} < 50); \quad (11.4)$$

$$\lambda = \frac{16}{\text{Re}^{0,2}} \quad (\text{при } 50 < \text{Re} < 7200). \quad (11.5)$$

2. На втором этапе выполнения работы установить согласно варианту фиксированное значение подачи воды на насадку, снять показания и рассчитать те же зависимости, но для орошаемой насадки. Использовать расчётную формулу для орошаемой насадки:

$$\Delta P_{\Gamma\text{-ж}} = \Delta P_{\Gamma} \left[1 + 34 \left(\frac{V_{\text{ж}}}{V_{\Gamma}} \right)^{0,405} \right], \quad (11.6)$$

где $\Delta P_{\Gamma\text{-ж}}$ – гидравлическое сопротивление орошаемой насадки, Н/м²; $V_{\text{ж}}$ – объёмный расход воды, подаваемой на насадку, м³/с.

Формулу (11.6) можно представить в другом виде:

$$\Delta P_{\Gamma\text{-ж}} = \Delta P_{\Gamma} \left[1 + 8,4 \left(\frac{G_{\text{ж}}}{G_{\Gamma}} \right)^{0,405} \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,225} \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\Gamma}} \right)^{0,045} \right], \quad (11.7)$$

где $G_{\text{ж}}$ – массовый расход жидкости, кг/с; G_{Γ} – массовый расход газа, кг/с; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости (воды), равная 1000 кг/м³; $\mu_{\text{ж}}$ – вязкость жидкости (воды), равная 10⁻³ Па · с.

Варианты индивидуальных заданий

Вариант	Высота слоя насадки, м	Показания ротаметра подачи воздуха, деления	Показания ротаметра подачи воды, деления
1	0,5	10; 20; 30; 40; 50	10
2	0,5	10; 20; 30; 40; 50	20
3	0,5	10; 20; 30; 40; 50	30
4	0,5	10; 20; 30; 40; 50	40
5	0,5	10; 20; 30; 40; 50	50
6	0,9	10; 20; 30; 40; 50	10
7	0,9	10; 20; 30; 40; 50	20
8	0,9	10; 20; 30; 40; 50	30
9	0,9	10; 20; 30; 40; 50	40
10	0,9	10; 20; 30; 40; 50	50

Описание лабораторной установки

Сжатый воздух, нагнетаемый компрессором (рис. 11.1) через вентиль 1 и ротаметр 2, поступает в насадочную колонну 3 и затем выбрасывается в атмосферу. Диаметр колонны оставляет 0,25 м.

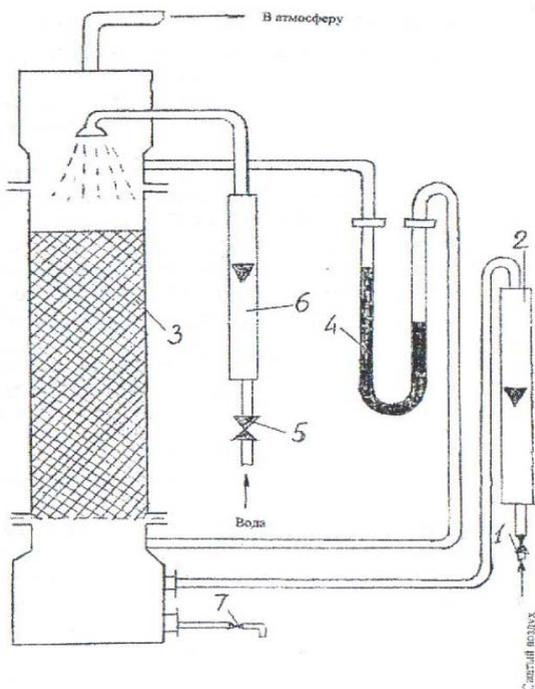


Рис. 11.1. Схема экспериментальной установки для изучения гидродинамики насадочной колонны

Насадка – кольца Рашига размером $15 \times 15 \times 2$ мм. Геометрические параметры слоя насадки: порозность слоя $\varepsilon = 0,6 \text{ м}^3/\text{м}^3$; удельная поверхность насадки $a = 330 \text{ м}^2/\text{м}^3$; эквивалентный диаметр каналов $d_3 = 0,73 \cdot 10^{-2}$ м. Гидравлическое сопротивление в колонне определяется манометром 4. Расход воды регулируется вентилем 5 и контролируется ротаметром 6. Расход воздуха и воды определяется по градуированным графикам ротаметров. Слив воды в канализацию регулируется вентилем 7.

Порядок выполнения работы

1. После включения компрессора (с разрешения преподавателя) установить вентилем 1 заданный расход воздуха и снять показания манометра. Опыт повторить для различных расходов воздуха (10; 20; 30; 40; 50 делений по ротаметру 2). Результаты измерений занести в таблицу.

2. Рассчитать по формулам (11.1)–(11.5) для значений расхода воздуха по п. 1 значения гидравлического сопротивления сухой насадки. Результаты расчётов занести в ту же таблицу.

3. При исследовании гидродинамики орошаемой насадки установить вентилем 5 расход воды по ротаметру согласно варианту. При постоянных значениях расхода воздуха (10; 20; 30; 40; 50 делений по ротаметру 2) снять показания манометра. Результаты измерений занести в таблицу.

4. Вычислить по формулам (11.6) и (11.7) для значений расходов воды по п. 3 значения гидравлического сопротивления орошаемой насадки. Результаты расчетов занести в ту же таблицу.

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель и задачи работы, задание, экспериментальные результаты, расчётные материалы.

Экспериментальные результаты представляют в виде таблиц со всеми промежуточными значениями. Расчётные результаты приводят с подробным изложением всех рассуждений, допущений и используемых формул с подстановкой всех численных значений в формулы. Окончательные результаты оформляют в виде итоговой таблицы.

Заключительной частью отчета являются выводы обо всех результатах исследований (экспериментальных и расчётных).

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы параметры основных характеристик насадок?
2. Какой вид имеет зависимость гидравлического сопротивления насадки от скорости газа в колонне?
3. Каким образом влияет пристеночный эффект на порозность слоя и распределение скоростей потока по сечению аппарата?

4. При каком гидродинамическом режиме работы насадочной колонны количество задерживаемой в насадке жидкости практически не зависит от скорости газа?
5. При каком гидродинамическом режиме работы насадочной колонны достигается максимальная эффективность работы колонны по массообмену, но гидравлическое сопротивление колонны при этом резко возрастает?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. — 13-е изд. — М. : Альянс, 2006. — С. 484—500.
2. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды : учеб. пособие. — М. : ИНФРА-М, 2014. — С. 323—342.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : учеб. пособие для вузов. — 4-е изд. — СПб. : Химиздат, 2017. — С. 279—283.

Лабораторная работа 12

Изучение гидродинамики аппарата с ситчатыми тарелками

Цель работы — закрепить знания по гидродинамике колонны с ситчатыми тарелками путем визуального наблюдения режимов работы ситчатой тарелки, экспериментального определения сопротивления сухой и орошаемой тарелки, а также сравнения опытных и расчётных данных.

Аппараты с ситчатыми тарелками

Аппараты с ситчатыми тарелками широко применяются в химической, нефтехимической и других отраслях промышленности для проведения процессов абсорбции, ректификации, очистки газов от токсичных составляющих, а также в других технологических процессах. Эффективность работы ситчатой тарелки определяется гидродинамическими режимами и зависит от расходов газа и жидкости и их физических свойств. Различают три основных гидродинамических режима работы тарелок: пузырьковый, пенный и струйный.

Пузырьковый режим наблюдается при небольших скоростях газа, когда он движется сквозь слой жидкости в виде отдельных пузырьков. При этом тарелка работает неполным сечением.

С увеличением расхода газа выходящие из отверстий отдельные пузырьки сливаются в сплошную струю, которая на определённом расстоянии от места истечения разрушается вследствие сопротивления барботажного слоя с образованием большого количества пузырьков. При этом на тарелке образуется ячеистая пена. Поверхность контакта фаз на тарелке, работающей в *пенном* режиме, максимальна.

При дальнейшем увеличении скорости газа длина газовых струй увеличивается, и они выходят на поверхность барботажного слоя, разрушаясь и образуя большое количество крупных брызг. Поверхность контакта фаз в условиях *струйного* режима резко снижается.

Гидравлическое сопротивление орошаемой тарелки ($\Delta P_{\text{оп}}$) вычисляется по формуле

$$\Delta P_{\text{оп}} = \Delta P_{\text{сух}} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{\text{ст}}, \quad (12.1)$$

где $\Delta P_{\text{сух}}$ – гидравлическое сопротивление сухой тарелки, Па; ΔP_{σ} – гидравлическое сопротивление, вызванное силами поверхностного натяжения, Па; $\Delta P_{\text{ст}}$ – гидравлическое сопротивление столба жидкости, Па.

Гидравлическое сопротивление сухой тарелки

$$\Delta P_{\text{сух}} = \xi \rho_{\text{г}} w^2 / 2, \quad (12.2)$$

где w – скорость газа (воздуха) в отверстиях тарелки, м/с; $\rho_{\text{г}}$ – плотность воздуха, кг/м³; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления, равный 1,8.

Скорость газа w в формуле (12.2)

$$w = \frac{V_{\text{г}}}{F_0}, \quad (12.3)$$

где $V_{\text{г}}$ – объёмный расход газа, м³/с; F_0 – площадь живого сечения тарелки, м².

Гидравлическое сопротивление, вызванное силами поверхностного натяжения, рассчитывается по формуле

$$\Delta P_{\sigma} = \frac{K\sigma}{d_0}, \quad (12.4)$$

где K – безразмерный коэффициент, равный 2–6; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; d_0 – диаметр отверстия, м.

Гидравлическое сопротивление столба жидкости на тарелке

$$\Delta P_{\text{ст}} = \rho_{\text{ж}} g h_{\text{ж}}, \quad (12.5)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; $h_{\text{ж}}$ – высота слоя жидкости, м.

Описание лабораторной установки

Установка (рис. 12) состоит из колонного аппарата 1 с тремя ситчатыми тарелками, средняя из которых является рабочей, ротаметра 2 для измерения расхода жидкости, диафрагмы 3, соединённой с дифманометром 4 для измерения расхода воздуха, указателя уровня жидкости 5 на тарелке, дифманометра 6 для измерения гидравлического сопротивления тарелки. Расход воздуха регулируется изменением числа оборотов вентилятора с помощью ЛАТР 7. Расход жидкости регулируется вентилем 8.

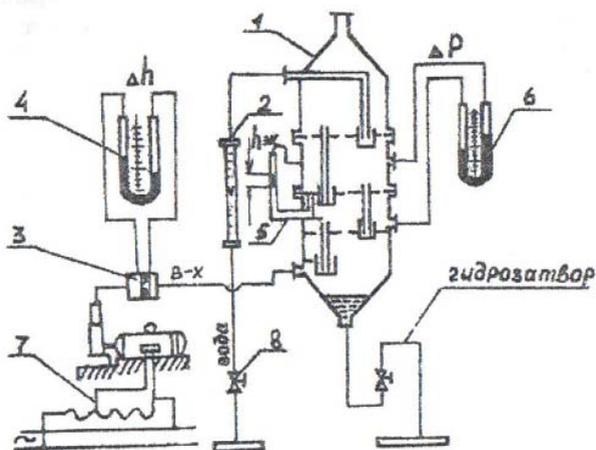


Рис. 12.1. Схема лабораторной установки для изучения гидродинамики ситчатых тарелок

Основные размеры колонного аппарата и тарелки: диаметр аппарата – 100 мм; диаметр отверстий – 3,0 мм; суммарная площадь сечения отверстий $F_0 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Порядок выполнения работы

1. Визуальное наблюдение режимов работы тарелки

Установить по ротаметру расход жидкости, равный 40 делениям, и включить воздуходувку, периодически изменяя расход воздуха. При каждом постоянном расходе воздуха наблюдать состояние газожидкостной системы на тарелке. Обратит внимание:

- 1) на пузырьковое движение газа через слой жидкости;
- 2) струйное истечение газа из отверстий, когда струйки дробятся на пузырьки в массе жидкости, образуя ячеистую пену.

2. Определение гидравлического сопротивления сухой тарелки

Отключить подачу воды, включить воздуходувку и в течение 10 мин пропускать воздух через колонну до полного удаления воды с тарелки. Измерить гидравлическое сопротивление тарелки по перепаду давления дифманометром 6 для 5–7 значений скорости газа с таким расчётом, чтобы охватить весь диапазон шкалы дифманометра.

3. Определение гидравлического сопротивления орошаемой тарелки

Открыть вентиль и установить расход воды, соответствующий 4–6 большим делениям ротаметра. Включить воздуходувку и, постепенно увеличивая расход воздуха, добиться стабильного уровня жидкости на тарелке, определяемого высотой переливной трубы, которая выступает над тарелкой. Замерить гидравлическое сопротивление тарелки для 4–6 значений расхода воздуха. Данные измерений свести в таблицу.

4. Обработка опытных данных

По опытным данным построить графики зависимостей гидравлического сопротивления сухой и орошаемой тарелок от скорости газа в отверстиях тарелки.

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель и задачи работы, задание, экспериментальные результаты, расчётные материалы.

Экспериментальные результаты представляют в виде таблиц со всеми промежуточными значениями. Расчётные результаты приводят с подробным изложением всех рассуждений, допущений и используемых формул, подставляя все численные значения в формулы. Окончательные результаты оформляют в виде итоговой таблицы.

Заключительной частью отчёта являются выводы обо всех результатах исследований (экспериментальных и расчётных).

Вопросы для самоконтроля

1. От чего зависит эффективность работы ситчатой тарелки?
2. Из каких величин складывается гидравлическое сопротивление тарелки?
3. Как образуется поверхность раздела фаз в тарельчатых колоннах?
4. Какой режим работы тарельчатых колонн является наиболее рациональным?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. — 13-е изд. — М. : Альянс, 2006. — С. 516–522.
2. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды : учеб. пособие. — М. : ИНФРА-М, 2014. — С. 323–342.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : учеб. пособие для вузов. — 4-е изд. — СПб. : Химиздат, 2017. — С. 342–349.

Лабораторная работа 13

Изучение гидродинамики колонны с колпачковыми тарелками

Цель работы — закрепить знания по гидродинамике колонны с колпачковыми тарелками путём визуального наблюдения режимов работы колпачковой тарелки, экспериментального определения сопротивления сухой и орошаемой тарелок, а также сравнения опытных и расчётных данных.

Аппараты с колпачковыми тарелками

Аппараты с колпачковыми тарелками широко применяются в химической, нефтехимической и других отраслях промышленности для проведения процессов ректификации, абсорбции и др. Эффективность работы этих аппаратов зависит от гидродинамических режимов их функционирования, которые определяются расходом и физическими свойствами газа и жидкости. Гидравлическое сопротивление орошаемой тарелки ($\Delta P_{\text{оп}}$) складывается из гидравлического сопротивления сухой тарелки ($\Delta P_{\text{сух}}$), гидравлического сопротивления, вызываемого силами поверхностного натяжения (ΔP_{σ}), и гидравлического сопротивления слоя жидкости на тарелке ($\Delta P_{\text{ст}}$):

$$\Delta P_{\text{оп}} = \Delta P_{\text{сух}} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{\text{ст}}. \quad (13.1)$$

Гидравлическое сопротивление сухой тарелки

$$\Delta P_{\text{сух}} = \xi \rho_{\text{г}} w^2 / 2, \quad (13.2)$$

где w — скорость газа (воздуха) в прорезях колпачка, м/с; $\rho_{\text{г}}$ — плотность газа, кг/м³; ξ — коэффициент гидравлического сопротивления, равный 5,0.

Скорость газа (w) в формуле (13.2)

$$w = \frac{V_{\text{г}}}{F_0}, \quad (13.3)$$

где $V_{\text{г}}$ — объёмный расход газа, м³/с; F_0 — площадь свободного сечения колпачка, м².

Гидравлическое сопротивление, вызванное силами поверхностного натяжения, рассчитывается по формуле

$$\Delta P_{\sigma} = \frac{4\sigma}{d_3}, \quad (13.4)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; d_3 – эквивалентный диаметр прорези, м.

Эквивалентный диаметр прорези в формуле (13.4)

$$d_3 = \frac{4f}{\Pi}, \quad (13.5)$$

где Π – периметр прорези, м; f – площадь свободного сечения прорези, м².

Гидравлическое сопротивление столба жидкости на тарелке

$$\Delta P_{ст} = \rho_{ж} g h_{ж}, \quad (13.6)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; $h_{ж}$ – высота слоя жидкости, м.

Описание лабораторной установки

Установка (рис. 13.1) состоит из колонны 1 с тремя колпачковыми тарелками (из них средняя рабочая); ротаметра 2 для измерения расхода жидкости; диафрагмы 3, соединённой с дифманометром 4 для измерения расхода воздуха; указателя уровня жидкости 5 на тарелке; дифманометра 6 для определения гидравлического сопротивления тарелки.

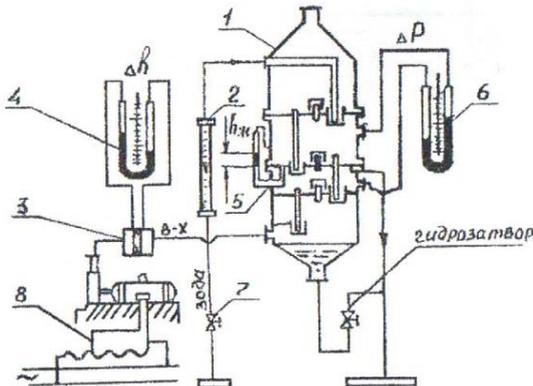


Рис. 13.1. Схема лабораторной установки для изучения гидродинамики колпачковых тарелок

Подача воды регулируется вентилем 7, подача воздуха — изменением числа оборотов вентилятора с помощью ЛАТР 8.

Основные размеры аппарата и тарелки (рис. 13.2): диаметр аппарата 100 мм; расстояние между тарелками 220 мм; диаметр переливной трубы 20 мм; размеры прорези колпачка 2×12 мм; число прорезей колпачка 20; площадь свободного сечения прорези $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$; живое (свободное) сечение тарелки (колпачка) $4,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

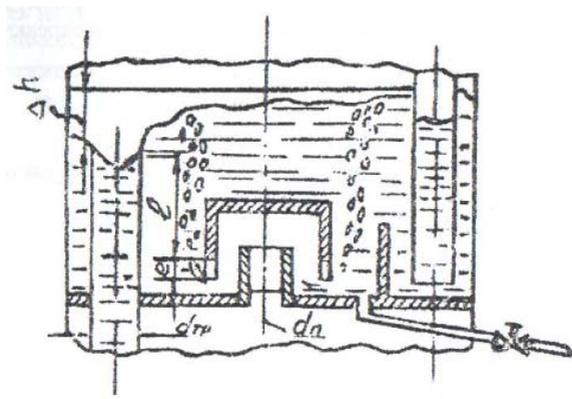


Рис. 13.2. Схема колпачковой тарелки

Порядок выполнения работы

1. Визуальное наблюдение режимов работы тарелки

Установить по ротаметру расход жидкости (воды), равный 40 делениям, включить воздухоподувку и с помощью ЛАТР регулировать расход воздуха (расход определяется по градуировочным графикам, размещенным на стенде установки). При каждом постоянном расходе газа отмечать состояние газожидкостной системы на тарелке.

Следует обратить внимание:

- 1) на пузырьковое движение газа (воздуха) через слой жидкости;
- 2) струйное истечение газа из прорезей, когда струйки дробятся на пузырьки в массе жидкости, образуя ячеистую пену (рис. 13.3).

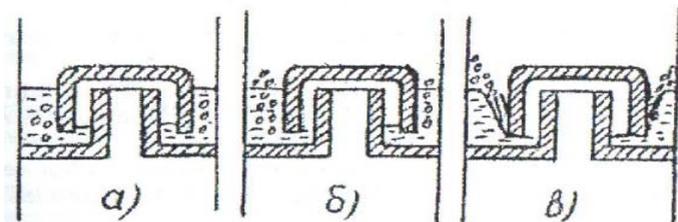


Рис. 13.3. Режим работы колпачковых тарелок:
a – пузырьковый; *б* – пенный; *в* – струйный

2. Определение гидравлического сопротивления сухой тарелки

Открыв зажим на трубочке, слить жидкость с тарелки и снова закрыть зажим. Включить воздуходувку и в течение 10 мин пропустить воздух через колонну до полного удаления воды с тарелки. Измерить дифманометром *б* гидравлическое сопротивление тарелки по перепаду давления для 7–8 значений скоростей газа с таким расчётом, чтобы охватить весь диапазон шкалы дифманометра. Все данные свести в таблицу.

3. Определение гидравлического сопротивления орошаемой тарелки

Открыть вентиль для воды и установить её расход, соответствующий 4–6 большим делениям ротаметра. Включить воздуходувку и, постепенно увеличивая расход воздуха, добиться выхода тарелки на пенный режим работы. Замерить гидравлическое сопротивление тарелки для 4–5 значений расхода воздуха в пенном режиме. Данные измерений свести в таблицу.

4. Обработка опытных данных

По опытным данным построить график зависимостей гидравлического сопротивления сухой и орошаемой тарелки от скорости газа в прорезях тарелки.

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать цель и задачи работы, задание, экспериментальные результаты, расчётные материалы.

Заключительной частью отчёта являются выводы обо всех результатах исследований (экспериментальных и расчётных).

Вопросы для самоконтроля

1. Гидродинамические режимы работы колпачковой тарелки.
2. Из каких величин складывается гидравлическое сопротивление тарелки?
3. Какой гидродинамический режим работы тарельчатой колонны с переливными устройствами наблюдается при низких скоростях газа (пара)?
4. Какой гидродинамический режим работы тарельчатой колонны с переливными устройствами соответствует максимальной поверхности контакта фаз на тарелке?

Рекомендуемая литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов. — 13-е изд. — М. : Альянс, 2006. — С. 516–522.
2. Таранцева К.Р., Таранцев К.В. Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды : учеб. пособие. — М. : ИНФРА-М, 2014. С. 323–342.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) : учеб. пособие для вузов. — 4-е изд. — СПб. : Химиздат, 2017. — С. 342–349.

Образец оформления титульного листа

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ ХИМИИ И ЭНЕРГЕТИКИ
Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»

**ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ
И БИОТЕХНОЛОГИИ»**

на тему « _____ »
(наименование)

Выполнил: _____
(Ф. И. О., группа)

Преподаватель: _____
(должность, Ф. И. О)

(личная подпись и дата)

Тольятти
20__ г.