

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ БАКАЛАВРОВ
ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ПРОФЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Направление подготовки/специальность	21.03.01 Нефтегазовое дело
Направленность (профиль)/специализация	«Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта, хранения и переработки нефти и газа»
Форма обучения	Очная
Год начала обучения	2026
Реализуется в	5-6 семестре

Ставрополь 2026

Содержание

Введение	5
Цели и задачи самостоятельной работы бакалавров	6
Виды самостоятельной работы бакалавров	6
Самостоятельное изучение теоретического материала	7
Самостоятельное выполнение заданий	8
Иные формы самостоятельной работы	8
Контроль самостоятельной работы бакалавров преподавателями	8
Критерии оценки результатов самостоятельной работы	9
Список рекомендуемой литературы	10

Введение

Целью освоения дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» является формирование компетенций ПК-1 и ПК-2 будущего бакалавра по направлению подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело; профиль - «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта, хранения и переработки нефти и газа».

Дисциплина "Процессы и аппараты химической технологии" относится к базовой части Б1.О.19. Ее освоение происходит в 5 и 6 семестрах.

Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины:

Индекс	Формулировка:
ПК-1	Способен обеспечить технологическое сопровождение процесса переработки нефти, газа и химического сырья
ПК-2	Способен обеспечить документационное сопровождение разработки и внедрения мероприятий по повышению эффективности технологического процесса переработки нефти, газа и химического сырья

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРОВ

Реализация образовательной программы подготовки бакалавров должна обеспечиваться доступом каждого обучающегося к библиотечным фондам и базам данных, формируемым по полному перечню дисциплин образовательной программы. Библиотека вуза должна иметь достаточное количество современных учебников и учебных пособий по всем циклам дисциплин и постоянно пополняться научной литературой и периодическими изданиями химико-технологического профиля. Во время самостоятельной подготовки обучающиеся должны быть обеспечены доступом к сети Интернет.

Объем времени, отведенный на внеаудиторную самостоятельную работу, находит отражение:

- в рабочем учебном плане – в целом по образовательной программе, по каждому блоку, по дисциплине (модулю);
- в рабочих программах учебных дисциплин (модулей) с распределением по разделам или конкретным темам.

Под самостоятельной работой бакалавров понимается планируемая учебная, учебно-исследовательская, а также научно-исследовательская работа, которая выполняется во внеаудиторное время по инициативе бакалавра или по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

Самостоятельная работа проводится с целью:

- систематизации и закрепления полученных теоретических знаний и практических умений обучающихся;
- углубления и расширения теоретических знаний;
- формирования умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развития познавательных способностей и активности: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности, организованности;
- формирования практических умений и навыков;
- развития исследовательских умений.

Задачи самостоятельной работы:

- овладение теоретическими знаниями о современных научно-технических и практических проблемах технологии переработки нефти;
- формирование опыта собственной поисковой, творческой, научно-исследовательской деятельности.

Самостоятельная работа способствует развитию ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального (в том числе научного) уровня.

ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРОВ

Основными видами самостоятельной учебной деятельности бакалавров являются:

- 1) предварительная подготовка к аудиторным занятиям, в том числе к тем, на которых будет изучаться новый, незнакомый материал;
- 2) своевременная проработка конспектов лекций;
- 3) подбор, изучение, анализ и, при необходимости, конспектирование рекомендованных литературных источников;
- 4) выяснение наиболее сложных, непонятных вопросов и их уточнение во время консультаций;
- 5) подготовка к зачету или экзамену;
- 6) выполнение собственных научных исследований, либо участие в научных исследованиях, проводимых на кафедре;
- 7) систематическое изучение периодической печати, научных монографий, поиск и анализ дополнительной информации по учебным дисциплинам.

На самостоятельную работу бакалавров, обучающихся по направлению 18.03.01 «Химическая технология», по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» отводится 131 академический час.

Виды самостоятельной работы по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» могут быть разделены на основные (аудиторные) и дополнительные

(внеаудиторные).

Основные виды самостоятельной работы выполняются в обязательном порядке с последующим контролем результатов преподавателем, который проводит практические занятия.

Дополнительные (внеаудиторные) виды самостоятельной работы выполняются по выбору бакалавра и заданию преподавателя без его непосредственного участия. Дополнительные виды самостоятельной работы по дисциплине рекомендуются тем бакалаврам, которые наиболее заинтересованы в изучении дисциплины.

К основным (обязательным) видам самостоятельной работы бакалавров при изучении дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» относятся:

- а) самостоятельное изучение теоретического материала;
- б) подготовка к практическим занятиям;
- в) подготовка к лабораторным работам;
- г) выполнение курсовой работы.

Дополнительными видами самостоятельной работы являются:

- а) подготовка презентаций по практическим занятиям;
- б) подготовка докладов и сообщений для выступления на занятиях;
- в) участие в ежегодной научно-технической конференции.

Дополнительные виды самостоятельной работы не являются обязательными и выполняются бакалаврами по собственной инициативе с предварительным согласованием с преподавателем, либо при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

Виды и содержание самостоятельной работы, формы их контроля:

Коды реализованных компетенций	Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии и оценки	Объем часов, в том числе		
				СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего
5 семестр						
ПК-1 ПК-2	Самостоятельное изучение литературы по темам 1 – 3	Конспект	Собеседование	24	12	36
ПК-1 ПК-2	Подготовка к практическим занятиям	Индивидуальные занятия	Собеседование	24	12	36
Итого за 5 семестр				48	24	72
6 семестр						
ПК-1 ПК-2	Самостоятельное изучение литературы по темам 4-6	Конспект	Собеседование	24	12	36
ПК-1 ПК-2	Подготовка к практическим занятиям	Индивидуальные занятия	Собеседование	24	12	36
ПК-1 ПК-2	Подготовка к экзамену	экзамен	Собеседование	14	6	20
УК-2; ОПК-4 ОПК-6	Подготовка курсового проекта	Курсовой проект	Защита курсового проекта	14	6	20
Итого за 6 семестр				76	36	112
Итого				124	60	184

САМОСТОЯТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Самостоятельное изучение теоретического материала по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» предусмотрено на всём протяжении курса. Такая работа сопровождает лекционные, практические и лабораторные занятия, текущий контроль и промежуточную аттестацию, и в то же время является отдельным видом самостоятельной работы.

Источники для самостоятельного изучения теоретического материала по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии»:

- учебники по предмету;
- курсы лекций по предмету;
- учебные пособия по отдельным темам;
- научные статьи в периодической печати и рекомендованных сборниках;
- научные монографии.

Умение бакалавров быстро и правильно подобрать литературу, необходимую для выполнения учебных заданий и научной работы, является залогом успешного обучения. Самостоятельный подбор литературы осуществляется при подготовке к практическим занятиям, при написании научных рефератов.

Выполнение самостоятельной работы на занятиях с проверкой результатов преподавателем позволяет бакалаврам усваивать изучаемый материал более глубоко, меняется отношение к лекциям, так как без понимания теории предмета, без хорошего конспекта трудно рассчитывать на успех в решении заданий. Это улучшает посещаемость как практических, так и лекционных занятий.

Для успешного освоения дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» необходимо самостоятельно детально изучить представленные темы по рекомендуемым источникам информации.

САМОСТОЯТЕЛЬНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ ЗАДАНИЙ

Задания для самостоятельной работы преимущественно содержатся в учебно-методическом комплексе дисциплины (практикум). Сдача выполненного задания производится преподавателю, ведущему практические занятия, в установленные сроки.

ИНЫЕ ФОРМЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

К иным формам самостоятельной работы бакалавров относятся: подготовка сообщений, докладов, выступлений на «круглых столах», семинарах, конференциях. Если преподаватель поручил бакалавру подготовить доклад к семинару, сообщение или иное выступление, то самостоятельная работа по их написанию может проходить в следующей последовательности.

1. Нужно подобрать литературу, проконсультироваться у преподавателя по содержанию предстоящего доклада (выступления).
2. Необходимо изучить литературу, сгруппировать материал и составить подробный план доклада (выступления).
3. Следует написать полный текст доклада (выступления). Для выступления с докладом обычно отводится 10-12 минут, поэтому все содержание доклада должно быть не более 7-10 страниц.
4. Бакалавру рекомендуется продумать методику чтения доклада. При возможности следует подготовить доклад с презентацией или раздаточным материалом.
5. Важно потренироваться в чтении доклада.

КОНТРОЛЬ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРОВ ПРЕПОДАВАТЕЛЯМИ

Оценка самостоятельной работы бакалавра влияет на итоговую оценку по дисциплине дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» следующим образом: во-первых, оценка самостоятельной работы учитывается в такой форме текущего контроля, как опрос на практических занятиях; во-вторых, самостоятельная работа по предмету поощряется, и преподаватель может использовать (и, как правило, использует) оценку самостоятельной работы в качестве поощрительной составляющей на зачете или экзамене; в спорных моментах оценка самостоятельной работы может разрешить ситуацию в пользу обучающегося.

Контроль самостоятельной работы бакалавров предусматривает:

- соотнесение содержания контроля с целями обучения;
- объективность контроля;
- валидность контроля (соответствие предъявляемых заданий тому, что предполагается проверить);
- дифференциацию контрольно-измерительных материалов.

Основные формы контроля самостоятельной работы бакалавра преподавателем:

1. просмотр и проверка продукта самостоятельной работы преподавателем;
2. самопроверка, взаимопроверка выполненного задания в группе;
3. обсуждение результатов выполненной работы на занятии;
4. письменный опрос;
5. индивидуальное собеседование.

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Независимо от вида самостоятельной работы критериями оценки могут считаться:

- уровень освоения бакалавром учебного материала;
- умение бакалавра использовать теоретические знания при выполнении практических задач;
- умение бакалавра активно использовать электронные образовательные ресурсы, находить информацию, изучать ее и применять на практике;
- умение ориентироваться в потоке информации, выделять главное;
- обоснованность и четкость изложения материала;
- оформление материала в соответствии с требованиями.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>

Дополнительная литература

1. Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». – 2-е изд., испр. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. – 608 с.
2. Леонтьева, А. И. Оборудование химических производств : учеб. / А. И. Леонтьева. – Москва : Химия : КолосС, 2008. – 479 с.
3. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / В.М. Потехин, В.В. Потехин. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. - 940 с.
4. Технология переработки нефти : в 2 ч. : учеб.пособие / [О. Ф. Глаголева, В. М. Капустин, Т. Г. Гюльмисарян [и др.]] ; под ред. О. Ф. Глаголевой, В. М. Капустина, Ч.1, Первичная переработка нефти. – М. : Химия : КолосС, 2005. – 400 с. – Гриф: Доп. МО.
5. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / [Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Барабаш и др.] / [под ред. Г. М. Островского], Ч.1. – СПб. : Проффессионал, 2004. – 848 с.
6. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии : учебник для вузов / А. И. Скобло, Ю. К. Молоканов, А. И. Владимиров, В. А, Щелкунов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 2000. – 677 с.
7. Основные процессы и аппараты химической технологии : пособие по проектированию / [Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и др.] ; под ред. Ю. И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1991. – 496 с.
8. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии : учеб.пособие : в 2 кн. / Ю.И. Дытнерский, Ч.1, Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М. : Химия, 2002. – 400 с.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ БАКАЛАВРОВ
ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Ставрополь, 2026

Содержание

Введение	5
Практическая работа №1. Определение режима течения жидкости	6
Практическая работа №2. Изучение поля скоростей в трубопроводе	10
Практическая работа № 3. Изучение работы дифманометра «Кольцевые весы»	13
Практическая работа №4. Графическое построение «профиля скоростей»	16
Практическая работа №5. Определение гидравлических сопротивлений трубопроводов .	19
Практическая работа №6. Определение средней скорости потока. Определение эквивалентной шероховатости трубы	23
Практическая работа №7. Определение характеристик центробежного насоса	25
Практическая работа №8. Определение характеристик центробежного вентилятора	32
Практическая работа №9. Изучение гидравлики взвешенного слоя. Изучение работы циклона	39
Практическая работа №10. Изучение работы циклона	45
Практическая работа №11. Изучение процесса теплоотдачи в кожухотрубном теплообменнике	53
Практическая работа №12. Изучение процесса ректификации и его компьютерное моделирование	61
Практическая работа №13. Определение коэффициента массопередачи в процессе абсорбции	72
Практическая работа № 14. Расчет циклонов	79
Практическая работа №15. Расчет рукавного фильтра	90
Практическая работа №16. Расчет электрофильтра	98
Практическая работа №17. Расчет абсорбера	102
Практическая работа №18. Расчет адсорбера	109
Практическая работа №19. Расчет теплообменных аппаратов	114
Практическая работа №20. Расчет коэффициента теплоотдачи при конденсации теплоносителя	118
Практическая работа №21. Расчет кипятильника	121
Практическая работа №22. Расчет массообменных аппаратов	123
Практическая работа №23. Расчет высоты аппаратов со ступенчатым контактом фаз	132
Практическая работа №24. Теплопередача в поверхностных теплообменниках	142
Практическая работа №25. Теплоизлучение (лучеиспускание)	150
Практическая работа №26. Уравнение движения идеальной жидкости Эйлера	154
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	159

Введение

Введение

Целью освоения дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» является формирование компетенций ПК-1 ПК-2 будущего бакалавра по направлению подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело; профиль «Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта, хранения и переработки нефти и газа»

Дисциплина "Процессы и аппараты химической технологии" относится к базовой части Б1.О.19. Ее освоение происходит в 5 и 6 семестрах.

Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины:

Индекс	Формулировка:
ПК-1	Способен обеспечить технологическое сопровождение процесса переработки нефти, газа и химического сырья
ПК-2	Способен обеспечить документационное сопровождение разработки и внедрения мероприятий по повышению эффективности технологического процесса переработки нефти, газа и химического сырья

Практическая работа №1. Определение режима течения жидкости

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

При расчетах технологических процессов, связанных с движением газов и жидкостей, необходимо учитывать характер движения потока. На примере жидкости, пропускаемой по трубопроводу, можно установить существование двух режимов течения — ламинарного и турбулентного. Обычно при малых скоростях (и малых диаметрах трубопровода) элементарные струйки жидкости движутся параллельно, как бы скользят друг по другу, не перемешиваясь. Такое течение называется ламинарным или слоистым (вязким). При больших скоростях наблюдается поперечное перемешивание струек жидкости за счет образованных вихрей. Этот вид течения называется турбулентным. Для установившегося потока при ламинарном течении скорость постоянна в каждой точке жидкости, а при турбулентном течении — колеблется около некоторого среднего значения (за счет пульсаций). Распределение скоростей по поперечному сечению трубопровода при ламинарном течении происходит по параболе, причем средняя скорость потока составляет 0,5 от максимальной (по оси потока). При турбулентном течении изменение скоростей в поперечном сечении трубопровода идет по более пологой кривой и средняя скорость составляет 0,8—0,9 от максимальной. Характер движения жидкости (газа) зависит, как показали опыты, не только от средней скорости потока, но и от геометрических размеров потока (эквивалентного диаметра), вязкости и плотности жидкости (газа). Влияние перечисленных физических параметров потока на характер движения определяется величиной критерия (числа) Рейнольдса:

$$Re = \frac{w d_s \rho}{\mu} = \frac{w d_s}{\nu} \quad (1-1)$$

где w — средняя скорость потока, м/с;
 d_s — эквивалентный диаметр трубопровода, м;
 ρ — плотность жидкости (газа), кг/м³;
 μ — динамический коэффициент вязкости, Па·с;
 $\nu = \mu/\rho$ — кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

Критерий Рейнольдса показывает соотношение сил инерции, характеризующихся скоростью потока и его размерами, и сил внутреннего трения, характеризующихся вязкостью потока. Отсюда следует, что турбулентное течение свойственно потокам, обладающим развитыми силами инерции, а ламинарное — характерно для потоков, в которых силы внутреннего трения преобладают над силами инерции. Установлено, что

для ламинарного режима численное значение критерия Рейнольдса всегда меньше, а для турбулентного режима — всегда больше некоторого определенного «критического» значения. Например, для прямых труб критическое значение критерия Рейнольдса $Re_{кр} = 2300$. Необходимо отметить, что приведенное критическое значение является в известной степени условным, так как трудно обнаружить резкий переход от ламинарного режима к турбулентному. В действительности обычно наблюдается так называемая «переходная» область исчезновения ламинарного режима и установления турбулентного состояния потока. Численные значения критерия Рейнольдса для переходной области находятся в пределах $2300 - 10\,000$. При значении Re более $10\,000$ режим потока становится развитым (устойчивым) турбулентным. Для змеевиков значение $Re_{кр}$ повышается в зависимости от отношения диаметра d трубы к диаметру D змеевика $\{d/D\}$ и может достигать $7000 - 8000$. Цель работы — изучение изменений, происходящих в потоке при различных режимах течения.

Описание установки
Схема установки приведена на рис. 1-1. Воду из городского водопровода подают в бак 1 по трубе 5, регулируя подачу вентилем 4. Для предупреждения переполнения бака установлена переливная труба 5. Слив воды при промывке бака производят по грязевой трубе 6 через вентиль 7. Для наблюдения за поступлением и сливом воды из бака установлена воронка 8 на трубе 9 (линия канализации).

В трубах с очень гладкими стенками ламинарное течение может существовать и при $Re > 2300$, однако такое течение неустойчиво и небольшие возмущения вызывают переход к турбулентному движению

Во время работы установки вода из бака 1 по питательной трубе 13 через вентиль 22 поступает в расходный бак 16. Излишек воды через воронку 17 и переливную трубу 24 сливается в канализацию. Для предупреждения переполнения бака и перелива воды на пол установлена аварийная сигнализация — сигнализатор уровня 27 с датчиком 28, соединенный с сигнальным устройством 26%. При наполнении бака освещается табло «Закройте вентиль» и включается звуковой сигнал. Из расходного бака 16 вода по стеклянной трубе 15 поступает в буферный бак 14 и сливается из него через регулировочный вентиль 12 и ротаметр 11 в канализацию. Из бака с краской 20 через кран 19 по тонкой трубке 21 подкрашенная струйка воды поступает в стеклянную трубу 15. По окончании работы для опорожнения баков 14 и 16 пользуются соответственно вентилем 25 и краном 23. Температуру воды (для нахождения вязкости) определяют по термометру 18. Для успешного проведения опытов весьма важными условиями являются стабилизация потока в стеклянной трубе 15 и согласование скоростей истечения краски со скоростью самого потока. В этих целях приняты следующие меры. Так как в городском водопроводе наблюдаются временами колебания напора и пульсации потока, то воду из водопровода подают сначала в запасный бак 1 достаточно большой вместимости. Отсюда вода поступает в расходный бак 16 по питательной трубе 13, начальный конец которой выступает над дном бака 1 не менее, чем на 50 мм, чтобы оседающая на дно бака грязь не попадала в установку.

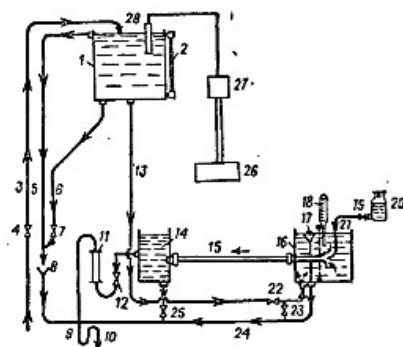


Рис. 1-1. Установка для определения режима потока:
1 — бак для воды; 2 — водомерное стекло; 3, 5, 6, 9, 13, 21, 24 — трубопроводы; 4, 7, 12, 19, 22, 23, 25 — вентили и краны; 8, 17 — воронки; 10 — гидравлический затвор; 11 — ротаметр; 14 — буферный бак; 15 — стеклянная труба; 16 — расходный бак; 18 — термометр; 20 — бачок с краской; 21 — сигнальное устройство; 27 — сигнализатор уровня; 28 — датчик.

Для достижения спокойного входа в расходный бак 16 вода в него поступает не сверху, а через специальное отверстие в дне бака с плавным расширением для гашения скорости. Затем, для дальнейшего успокоения, вода проходит через перегородку (во всю ширину бака), выполненную из тройного слоя сетки с мелкими отверстиями. И, наконец, вход воды в стеклянную трубу сделан в виде плавного сужения. Постоянный уровень воды в баке 16 поддерживается с помощью внутренней заналичной трубы с переливной воронкой 17, которая может быть установлена на нужной высоте, так как заналичная труба (медная, никелированная) проходит в дне бака 16 через специальный сальник и соединяется со сливным трубопроводом 24 гибким шлангом. Для согласования скорости истечения краски со скоростью воды в стеклянной трубе 15 бак с краской 20 может перемещаться по вертикали и закрепляется на нужной высоте для создания необходимого напора при истечении краски. Расход краски регулируется краном. 19 со специальным червячным приспособлением для плавного открывания и закрывания краника. Для установления выходного отверстия трубки с краской по оси стеклянной трубы 15 на крышке бачка смонтировано специальное регулирующее устройство.

Методика проведения работы Работу начинают с установления ламинарного режима и, увеличивая постепенно скорость движения воды в стеклянной трубе, наблюдают за изменениями, происходящими с подкрашенной струйкой при разных режимах течения. После наглядного изучения поведения подкрашенной струйки приступают к измерению величин, необходимых для определения числа Рейнольдса, начиная с ламинарного режима и кончая турбулентным. Перед началом работы проверяют наличие воды в баке 1 по водомерному стеклу 2. Если воды в баке меньше половины, то открывают вентиль 4 и заполняют бак, следя за уровнем воды в водомерном стекле. Следует проверить, включен ли сигнализатор уровня 27. Затем закрывают вентиль 4 и заполняют баки 14 и 16. Открывая вентиль 22. По достижении уровня сливной воронки 17 прикрывают вентиль 22, оставляя самую незначительную подачу воды. Затем понемногу открывают вентиль 12, устанавливая по ротаметру 11 минимальный расход воды. В первой части работы для пуска подкрашенной струйки постепенно открывают кран 19. Регулируя степень открытия вентилей 12 и 22 и крана 19, добиваются четкого очертания подкрашенной струйки, хорошо видимой на освещенном фоне экрана. Наличие резко выделяющейся, четко очерченной подкрашенной струйки указывает на наступление ламинарного режима. Для достижения лучшего эффекта нужно открыть вентиль 22 так, чтобы приток воды лишь немного превышал расход, и затем пробными открытиями крана 19 установить скорость истечения краски, одинаковую со скоростью воды. Увеличивая затем степень открытия вентилей 12, повышают тем самым скорость воды в стеклянной трубе 15, вследствие чего ламинарный режим начинает нарушаться и переходит в турбулентный. При этом надо регулировать открытие крана 19, а также вентилей 22, не позволяя уровню воды в баке 15 опускаться ниже воронки 17. Во второй части работы производят замеры, необходимые для определения значений числа Рейнольдса при разных режимах течения. Настраивают установку на ламинарный режим (как было указано выше)

и приступают к определению расхода воды по ротаметру 11. Увеличив степень открытия вентиля 12 и отрегулировав, если нужно, открытие вентиля 22 и крана 19, приступают к новому измерению расхода воды. Таких замеров проводят несколько (5-6), заканчивая их при развитом турбулентном движении. При этом записывают также показания термометра, так как температура воды может меняться. После проведения всех измерений приступают к обработке полученных результатов.

Обработка опытных данных и составление отчета.

Определяют среднюю скорость движения воды в стеклянной трубе

$$w = \frac{G}{0,785d^2\rho}$$

где G — расход воды, кг/с;

d — внутренний диаметр стеклянной трубки (25 мм), м;

ρ — плотность воды, кг/м³.

Результаты наблюдений, опытные и расчетные данные заносят в отчетную таблицу. Отчет должен также содержать задание и схему установки со спецификацией.

ОТЧЕТНАЯ ТАБЛИЦА

№ опыта	Расход воды G , кг/с	Температура воды		Вязкость воды μ , Па·с	Скорость движения воды w , м/с	Re	Состояние пограничной струйки	Режим потока
		t , °C	T , K					

Вопросы и задания:

1. Определить среднюю скорость движения воды в стеклянной трубе.
2. Какое течение называют ламинарным?
3. По какому закону меняется скорость потока в поперечном сечении трубопровода при ламинарном течении?
4. Как определить среднюю скорость потока, движущегося ламинарно?
5. Какое течение называют турбулентным?
6. Какие величины характеризуют режим течения потока?
7. Каково соотношение между средней и максимальными скоростями потока при турбулентном течении?
8. Что такое критерий Рейнольдса? Каков его физический смысл?
9. Назовите критическое значение числа Рейнольдса для прямых труб, для змеевиков.
10. При каком значении числа Рейнольдса наблюдают развитый турбулентный режим потока?
11. Что такое эквивалентный диаметр и гидравлический радиус?
12. Какая скорость потока входит в критерий Рейнольдса?
13. В каком интервале чисел Рейнольдса наблюдают «переходную» область турбулентного режима течения?
14. От каких параметров зависит значение Re_{KP} для змеевиков?

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. — 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>

3. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии : учебник для вузов / А. И. Скобло, Ю. К. Молоканов, А. И. Владимиров, В. А. Щелкунов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 2000. – 677 с.

Практическая работа №2. Изучение поля скоростей в трубопроводе

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Из гидродинамики известно, что скорость движения жидкости или газа в трубопроводе неодинакова в различных местах сечения потока. Для вполне сформировавшегося установившегося потока местная (локальная) скорость движения частиц жидкости меняется по сечению от нуля до нуля, проходя через максимум. Распределение местных скоростей по сечению зависит от режима течения. При ламинарном режиме течения, представляющем собой упорядоченное послойное движение, отдельные частицы жидкости перемещаются по трубопроводу как бы слоями, не перемешиваясь между собой. Считают, что в круглой трубе постоянного сечения жидкость при этом режиме перемещается концентрическими слоями, скорость которых изменяется в пределах сечения по параболическому закону от нуля у стенок трубопровода до максимального значения в центре потока (по оси трубопровода). В этом случае средняя по сечению скорость потока $w_{ср}$ равна половине максимальной (или осевой) скорости:

$$\frac{w_{ср}}{w_{max}} = 0,5$$

При турбулентном режиме течения отдельные частицы жидкости совершают беспорядочные неустановившиеся движения по сложным траекториям, что приводит к интенсивному перемешиванию слоев жидкости. Мгновенная скорость движения частиц здесь беспорядочно изменяется во времени как по величине, так и по направлению. Говорят, что скорость движения пульсирует около среднего значения (следует отметить, что пульсационные изменения претерпевает не только скорость, но и давление, а в сжимаемой жидкости также и плотность). Вместо переменных по времени мгновенных значений продольных скоростей принято рассматривать усредненное значение этих скоростей за некоторый промежуток времени. В этом случае местную скорость w можно представить в виде зависимости:

$$w = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} w_{\text{прод}} d\tau}{\tau_2 - \tau_1} \quad (2-2)$$

Распределение местных скоростей по сечению при турбулентном режиме движения существенно отличается от параболического. В первом приближении, согласно теории Прандтля, можно принять, что это распределение характеризуется логарифмическим законом.

Для вполне развитого турбулентного потока отношение средней скорости $w_{\text{ср}}$ к максимальной $w_{\text{макс}}$ является функцией критерия Рейнольдса (о критерии Рейнольдса см. работу 1), т. е. $w_{\text{ср}}/w_{\text{макс}} = f(\text{Re})$.

В этом случае обычно

$$\frac{w_{\text{ср}}}{w_{\text{макс}}} \approx 0,8 + 0,95 \quad (2-3)$$

Графическое выражение зависимостей $w_{\text{ср}}/w_{\text{макс}}$ от локального (максимального) и от среднего значения критерия Рейнольдса представлено на рис. 2-1.

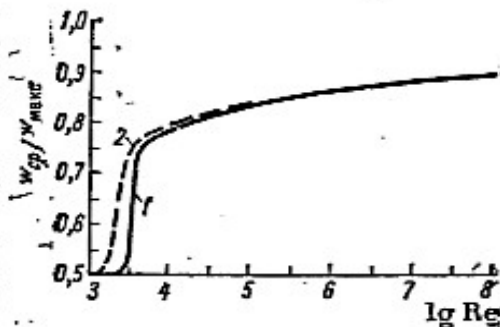


Рис. 2-1. Зависимости $\frac{w_{\text{ср}}}{w_{\text{макс}}}$ от Re :

$$1 - \text{Re}_{\text{макс}} = \frac{w_{\text{макс}} d \rho}{\mu}; \quad 2 - \text{Re}_{\text{ср}} = \frac{w_{\text{ср}} d \rho}{\mu}.$$

Необходимо учитывать, что выражения (2-3) справедливы лишь для сечений стабилизированного потока (для сечений, перед которыми длина прямого участка трубы составляет не менее 50 диаметров: на участке такой длины успевают исчезнуть возмущения в потоке, вызванные изменениями конфигурации трубы). Экспериментальное изучение закона распределения скоростей в поперечном сечении потока производится на специальной лабораторной установке.

Описание установки (рис. 2-2). Установка состоит из вентилятора 2 и воздухопровода 7 внутренним диаметром 150 мм и длиной 7 м.

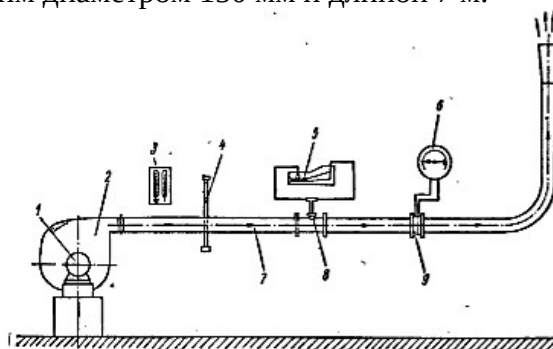


Рис. 2-2. Установка для изучения поля скоростей:
1 — электродвигатель; 2 — вентилятор; 3 — всасывающий барометр; 4 — ртутный чашечный барометр; 5 — дифференциальный манометр; 6 — расходомер; 7 — воздухопровод; 8 — трубка Пито-Прандтля; 9 — диффрагма.

На воздухопроводе расположены: 1) напорная трубка (трубка Пито — Прандтля) 8 с дифференциальным манометром 5, имеющим наклонную шкалу; 2) диафрагма 9, присоединенная к дифманометру (расходомеру) «кольцевые весы» 6.

Методика проведения работы

Для замера скоростей потока пользуются напорными трубками Пито — Прандтля. Напорная трубка состоит из двух трубок — внутренней и наружной (рис. 2-3). Внутренняя трубка, открытая с торца навстречу потоку, воспринимает общее давление, равное сумме статического и скоростного (динамического) давлений. Наружная трубка, имеющая круговую прорезь на боковой поверхности, воспринимает только статическое давление. Напорная трубка всегда, устанавливается вдоль оси трубопровода, открытым концом навстречу потоку. По разности общего и статического давлений можно определить скоростное (динамическое) давление, обычно обозначаемое через $\Delta p_{\text{ск}}$. Выведенные наружу (за пределы трубопровода) концы внутренней и наружной трубок имеют следующие отличительные знаки: для статического давления знак минус, для общего

давления — знак плюс. Для измерения разности давлений концы трубок присоединяют к дифференциальному манометру¹, показывающему значение скоростного давления $\Delta p_{ск}$. Из формулы

Из формулы

$$\Delta p_{ск} = \frac{w^2 \rho}{2} \quad (2-5)$$

находят значение местной скорости:

$$w = \sqrt{\frac{2 \Delta p_{ск}}{\rho}} \quad (2-6)$$

Следует подчеркнуть, что измеренное значение $\Delta p_{ск}$ и вычисленная отсюда скорость w относятся только к точке замера.

Для определения средней скорости потока необходимо произвести ряд замеров в разных точках поперечного сечения трубопровода.

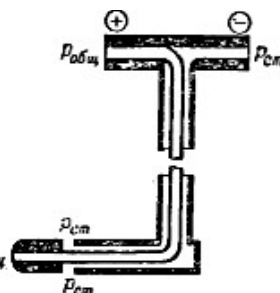


Рис. 2-3. Трубка Пито—Прандтля (схема).

Если полученные в результате этих измерений значения локальных, скоростей отложить в масштабе на эскизе продольного разреза трубопровода в точках, соответствующих точкам замеров, и соединить концы векторов скоростей плавной кривой, то получим так называемый профиль или поле скоростей в трубопроводе (рис. 2-4). При ламинарном движении поле скоростей в пространстве представляет собой параболоид вращения, а в плоскости — параболу (профиль Пуазейля). Среднюю скорость в этом случае определяют как среднюю высоту параболоида вращения

$$h_{ср} = \frac{V_{параб}}{F_{параб}} = \frac{\pi d^2 h}{8} : \frac{\pi d^2}{4} = \frac{h}{2} \quad (2-7)$$

где $V_{параб} = \frac{\pi d^2 h}{8}$ — объем параболоида вращения;

$F_{параб}$ — площадь основания параболоида, равная площади поперечного сечения круглой трубы диаметром d ; h — высота параболоида, соответствующая скорости по оси трубопровода $w_{ос}$. Таким образом, $w_{ср} = 0,5 w_{ос}$.

Вопросы и задания:

1. Исследовать распределение локальных скоростей по сечению потока воздуха, определить среднюю скорость и расход воздуха. Построить профиль (эпюр) локальных скоростей и сопоставить расчетное значение расхода с показанием расходомера.
2. От чего зависит режим течения?
3. Как определяется средняя по сечению скорость потока $w_{ср}$?
4. Что такое стабилизированный поток?
5. Что представляет собой поле скоростей при различных видах движения?

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. — 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>

3. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии : учебник для вузов / А. И. Скобло, Ю. К. Молоканов, А. И. Владимиров, В. А. Щелкунов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 2000. – 677 с.

Практическая работа № 3. Изучение работы дифманометра «Кольцевые весы»

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

При турбулентном движении средняя скорость потока в круглой трубе также будет являться средней высотой тела вращения, образованного полем скоростей, но для турбулентного потока определение средней скорости расчетным методом становится затруднительным. Ниже рассмотрен сравнительно простой способ определения средней скорости турбулентного потока по измеренным локальным скоростям, который заключается в следующем.

Поперечное сечение трубопровода условно делится на ряд равновеликих кольцевых площадок I, II, III (рис. 2-5). Каждая кольцевая площадка, в свою очередь, делится окружностью (проведенной пунктиром) на две равные по площади части. Точки 1, 2, 3, отмеченные на этих пунктирных окружностях, являются срединными точками выделенных кольцевых площадок I, II, III. Если произвести замеры локальных скоростей в точках 1, 2, 3 то получатся средние скорости потока для каждой кольцевой площадки. А так как все кольцевые площадки по условию равновелики, то средняя арифметическая величина из замеренных в точках 1, 2, 3 скоростей и будет являться средней скоростью данного потока. Расстояния x от стенок трубопровода до средних точек каждой кольцевой площадки, т. е. до точек замера скоростей 1, 2, 3 (см. рис. 2-5), определяют по следующей формуле (которую выводят из условия равенства площадей I, II, III):

$$x = \frac{d}{2} \left(1 \pm \sqrt{\frac{2n-1}{2N}} \right) \quad (2-8)$$

где d — диаметр трубопровода;

n — номера окружностей, делящих пополам кольцевые площадки (считая от центра трубопровода);

N — число кольцевых площадок.

Чем больше число кольцевых площадок, тем точнее будет значение средней скорости потока. В данной учебной установке для диаметра трубопровода $d = 150$ мм число кольцевых площадок N можно принять равным 3 (см. рис. 2-5). Тогда $n = 1 \div 3$. Знак минус в формуле (2-8) берется при определении значений x ниже оси трубопровода (x_1, x_2, x_3), знак плюс — для x , лежащих выше оси трубопровода (x_4, x_5, x_6).

Стандартные напорные трубки имеют диаметр $d = 12$ мм; следовательно, когда такая трубка находится в крайнем верхнем или крайнем нижнем положении, расстояние от оси напорной трубки AB до стенки трубопровода равно $12:2 = 6$ мм (рис. 2-6). Крайние же точки замеров по формуле (2-8) должны находиться от нижней стенки трубопровода на расстоянии:

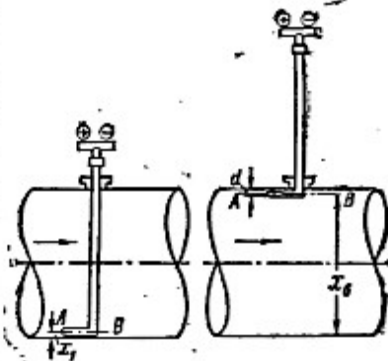


Рис. 2-6. Положение напорных трубок в крайних точках замера.

$$x_1 = \frac{150}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{2 \cdot 3 - 1}{2 \cdot 3}} \right) = 6,6 \text{ мм}$$

$$x_6 = \frac{150}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{2 \cdot 3 - 1}{2 \cdot 3}} \right) = 143,4 \text{ мм}$$

Следовательно, можно с небольшой погрешностью принять, что точкам замеров x_1 и x_6 будут соответствовать крайние — нижнее и верхнее — положения напорной трубки в трубопроводе. Для остальных точек замера (от x_2 до x_5) положения напорной трубки вычисляют по формуле (2-8). При проведении измерений положение трубки указывается стрелкой (укрепленной на верхней части трубки) по неподвижной вертикальной шкале, имеющей градуировку от 0 до 150 мм (соответственно диаметру трубопровода). В формулу (2-6) входит плотность ρ влажного воздуха, которую рассчитывают, как сумму плотностей сухого воздуха и водяного пара, взятых при соответствующих парциальных давлениях

$$\begin{aligned} \rho_{\text{вл. возд}} &= \rho_{\text{сух. возд}} + \rho_{\text{вод. пар}} = \rho_0 \frac{p_{\text{возд}}}{p_0} \frac{T_0}{T} + \varphi \rho_{\text{нас. вод. пар}} = \\ &= \rho_0 \frac{B - \varphi p_{\text{нас. вод. пар}}}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} + \varphi \rho_{\text{нас. вод. пар}} \end{aligned} \quad (2-9)$$

где $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ — плотность сухого воздуха при нормальных условиях: $T_0 = 273 \text{ К}$ и $P_0 = 101325 \text{ Па}$ (760 мм рт. ст.);

B — барометрическое давление воздуха в условиях опыта, определяемое по барометру, Па;

φ — относительная влажность воздуха (отношение парциального давления водяного пара в воздухе к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре, равное отношению соответствующих концентраций). Эта величина определяется по психрометру, состоящему из двух термометров — сухого и мокрого, и по прилагаемой к нему таблице¹;

$P_{\text{нас}}$ — давление насыщенного водяного пара, определяемое (по табл. IV Приложения) по температуре сухого термометра, Па;

T — температура воздуха в условиях опыта, определяемая по сухому термометру, К;

$\rho_{\text{нас}}$ — плотность насыщенного водяного пара, определяемая (по табл. IV Приложения) по температуре сухого термометра, кг/м³;

$p_{\text{возд}}$ — парциальное давление сухого воздуха при условиях замера, Па.

После проведения всех наблюдений и подсчетов получают значения локальных скоростей воздуха в шести точках поперечного сечения потока. Среднюю скорость потока определяют как среднее арифметическое из полученных значений локальных скоростей. Затем дополнительно замеряют скоростное давление в центре трубопровода для вычисления максимальной скорости на оси потока и находят отношение средней скорости к максимальной (осевой):

$$A = \frac{\omega_{\text{ср}}}{\omega_{\text{ос}}}$$

Если прямой участок трубопровода перед сечением замеров по длине значительно меньше участка гидродинамической стабилизации потока, то полученные значения местных скоростей будут несколько искаженными. В таких случаях для получения более точных результатов целесообразно замерять скоростные давления в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Величина полученного отношения средней скорости к осевой (A) может служить ориентировочной характеристикой режима течения потока. При $A = 0,5$ — поток ламинарный, при $LA = 0,8..0,95$ — поток турбулентный.

Для уточнения режима течения определяют критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{w_{\text{ср}} d \rho_{\text{вл. возд}}}{\mu_{\text{вл. возд}}} \quad (2-10)$$

где $w_{\text{ср}}$ — средняя скорость воздуха, м/с;

d — внутренний диаметр трубопровода, м;

$\rho_{\text{вл. возд}}$ — плотность влажного воздуха, кг/м³;

$\mu_{\text{вл. возд}}$ — динамический коэффициент вязкости влажного воздуха при температуре сухого термометра, Па·с.

Вопросы и задания:

1. Исследовать распределение локальных скоростей по сечению потока воздуха, определить среднюю скорость и расход воздуха.
2. Описать способ определения средней скорости турбулентного потока по измеренным локальным скоростям

3. От чего зависит средняя скорость потока?
4. Какой воздух имеет более высокую плотность — абсолютно сухой или влажный при одинаковых внешних условиях?
5. В чем преимущество дифманометра с наклонной шкалой по сравнению с обычным U-образным дифманометром?
6. Как устроен и работает дифманометр «Кольцевые весы»?
7. Что такое «участок гидродинамической стабилизации потока»?

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / В.М. Потехин, В.В. Потехин. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. - 940 с.

Практическая работа №4. Графическое построение «профиля скоростей».

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Для этой цели на миллиметровой бумаге вычерчивают в масштабе продольный разрез трубопровода и откладывают точки замеров соответственно найденным величинам x . Из этих точек откладывают в масштабе скоростей отрезки, соответствующие локальным скоростям в точках замера. Концы отрезков соединяют плавной кривой (рис. 2-4).

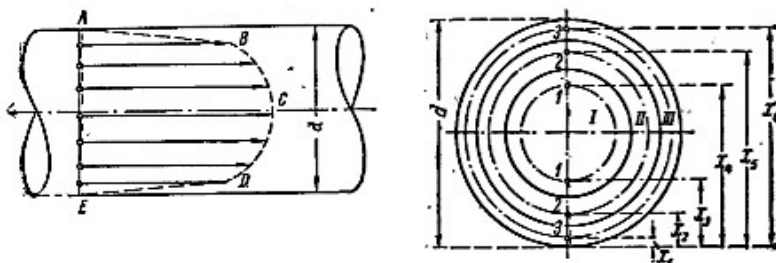


Рис. 2-4. Профиль скоростей.

Рис. 2-5. Деление поперечного сечения трубопровода на ряд равновеликих кольцевых площадок.

Вопросы и задания:

А. Начертить принципиальную схему установки и схему подключения трубки Пито-Прандтля

Б. Результаты наблюдений и расчетные величины.

1. Температура воздуха по сухому термометру:

$$t_{\text{сух}} = \dots ^\circ\text{C}$$
$$T = 273 + t_{\text{сух}} = \dots \text{K}$$

2. Температура мокрого термометра:

$$t_{\text{м}} = \dots ^\circ\text{C}$$

3. Относительная влажность воздуха (по таблице):

$$\varphi = \dots (\text{в долях})$$

4. Барометрическое давление воздуха (по ртутному чашечному барометру):

$$B = \dots \text{Па}$$

5. Давление насыщенного водяного пара при температуре сухого термометра (по таблице):

$$P_{\text{нас}} = \dots \text{Па}$$

6. Плотность насыщенного водяного пара при температуре сухого термометра (по таблице):

$$\rho_{\text{нас}} = \dots \text{кг/м}^3$$

7. Плотность влажного воздуха:

$$\rho_{\text{вл. возд}} = 1,293 \frac{B - \varphi P_{\text{нас}}}{1,013 \cdot 10^5} \cdot \frac{273}{T} + \varphi \rho_{\text{нас}} = \dots \text{кг/м}^3$$

8. Вязкость воздуха при температуре сухого термометра (по таблице):

$$\mu_{\text{вл. возд}} \approx \mu = \dots \text{Па} \cdot \text{с}$$

9. Определение точек замера скоростных давлений для $d = 150 \text{ мм}$, $N = 3$, $n = 1, 2$ и 3 :

$$x = \frac{d}{2} \left(1 \pm \sqrt{\frac{2n-1}{2N}} \right)$$

Точки замера от x_1 до x_6 вычисляются и заносятся в отчетную таблицу.

10. Скоростные давления в точках замера.

11. Местные скорости в точках замера:

$$w = \sqrt{\frac{2 \Delta p_{ск}}{\rho_{вл. возд}}} = \dots \text{ м/с}$$

12. Средняя скорость потока:

$$w_{ср} = \frac{\sum w_{1-6}}{6} = \dots \text{ м/с}$$

13. Отношение средней скорости к осевой:

$$A = \frac{w_{ср}}{w_{ос}} = \dots$$

14. Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{w_{ср} d \rho_{вл. возд}}{\mu_{вл. возд}}$$

15. Расход воздуха, вычисленный по средней скорости:

$$Q_{сек} = w_{ср} F = \dots \text{ м}^3/\text{с}$$

$$Q_{час} = \dots \text{ м}^3/\text{ч}$$

16. Показание воздухомера «Кольцевые весы»:

$$Q_{к. в} = \dots \text{ м}^3/\text{ч}$$

17. Отношение расходов воздуха:

$$\frac{Q_{час}}{Q_{к. в}} = \dots$$

ОТЧЕТНАЯ ТАБЛИЦА

№ по пор.	Точки замера x , мм	$\Delta p_{ск}$, мм вод. ст.			$\Delta p_{ск}$ среднее		w , м/с
		1 замер	2 замер	3 замер	мм вод. ст.	Па	
1							
2							
6							
7	75 ¹						

¹ Замер по оси трубопровода.

1. В чем отличие местной (локальной) скорости от истинной (мгновенной) и средней скорости при течении газа или жидкости по трубопроводу?

2. Профиль каких скоростей строят в данной работе с помощью пневмометрической трубки Пито-Прандтля?

3. В каком случае в условиях данной работы можно было бы получить строго симметричный по сечению профиль скоростей?

4. Чему равна минимальная локальная скорость стабилизированного потока воздуха в трубопроводе? Почему ее невозможно измерить посредством трубки Пито-Прандтля?

5. Как подключить к работающей трубке Пито-Прандтля дифференциальный манометр, чтобы измерить величины полного, статического и скоростного напоров воздуха?

6. Какие замеры надо сделать, чтобы определить расход воздуха в трубопроводе с помощью пневмометрической трубки?

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и

специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.

2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>

3. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / В.М. Потехин, В.В. Потехин. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. - 940 с.

Практическая работа №5. Определение гидравлических сопротивлений трубопроводов

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Одним из важнейших вопросов прикладной гидравлики является определение потерь энергии при движении жидкостей. В частном случае движения жидкостей по трубопроводам различают потери энергии, зависящие от длины трубопроводов (пропорциональные длине канала), и потери энергии в местных сопротивлениях — запорная арматура, повороты, расширения или сужения трубопроводов, — вызываемые изменениями скорости потока либо по величине, либо по направлению. Потери энергии потока как на преодоление сопротивлений по длине трубопроводов, так и на преодоление местных сопротивлений в конечном счете обусловлены вязкостью жидкости, а следовательно, теряемая механическая энергия рассеивается и переходит в тепловую. Для вычисления потерь давления обычно пользуются эмпирическими формулами

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho w^3}{2} \quad (3-1)$$

$$\Delta p_{\text{м.с}} = \xi \frac{\rho w^2}{2} \quad (3-2)$$

здесь $\Delta p_{\text{тр}}$ — потеря давления на трение, Па;

λ — коэффициент трения;

L — длина трубы, м;

ρ — плотность жидкости, кг/м³;

w — средняя скорость движения потока, м/с;

d — диаметр трубы, м;

$\Delta p_{\text{м.с}}$ — потеря давления на местное сопротивление, Па;

ξ — коэффициент местного сопротивления.

Средняя скорость, входящая в формулы (3-1) и (3-2), — это такая, одинаковая для всех точек сечения скорость, при которой за единицу времени через данное сечение проходит тот же объем жидкости, что и при действительном распределении скоростей по сечению потока. Среднюю скорость определяют по уравнению расхода

$$w_{\text{ср}} = V_{\text{с}}/F \quad (3-3),$$

где $V_{\text{с}}$ —объемный расход, т. е. объем жидкости, проходящий че рез живое сечение потока за единицу времени, м³/с; F — живое сечение потока, равное в случае течения по трубе площади поперечного сечения трубы, м². Из формул (3-1) и (3-2) следует, что

потери энергии на трение и на местные сопротивления пропорциональны скоростному, или динамическому, давлению ($\rho\omega^2/2$), которое является мерой кинетической энергии потока, отнесенной к единице объема жидкости. В действительности эта зависимость значительно сложнее, так как коэффициент трения и коэффициент, местного сопротивления не являются постоянными величинами, а существенно зависят от скорости течения жидкости, ее плотности и вязкости, а также диаметра трубы, по которой движется поток. При определении потерь давления по формулам (3-1) и (3-2) значения коэффициентов K и E ; находят из соответствующих графиков или таблиц, полученных на Основании многочисленных экспериментов. Значительно более полно и строго можно описать явление, если исходить из общих положений гидродинамики. Установившееся движение потока определяется уравнением

$$Eu = \varphi(Re, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots) \quad (3-4)$$

которое представляет собой критериальную форму уравнения Навье — Стокса для установившегося движения жидкости при напорном течении по прямому трубопроводу. В этом уравнении: $Eu = \frac{\Delta p}{\rho\omega^2}$ — критерий Эйлера, являющийся мерой отношения сил давления и сил инерции;

$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu}$ — критерий Рейнольдса, являющийся мерой отношения сил инерции и сил вязкости;

$\Gamma_1, \Gamma_2, \dots$ — симплексы геометрического подобия.

Очевидно, зная критерий Эйлера, легко найти потерю давления:

$$\Delta p = Eu \rho \omega^2 \quad (3-5)$$

При движении жидкости по прямой трубе значение критерия Эйлера может быть определено из уравнения

$$Eu = C Re^m \Gamma_1^n \Gamma_2^p \quad (3-6)$$

где $\Gamma_1 = L/d$ — симплекс геометрического подобия по длине;

$\Gamma_2 = e_s/d$ — симплекс геометрического подобия по шероховатости;

C, m, n — величины, зависящие от режима движения¹;

e_s — эквивалентная шероховатость (м), т. е. такая условная постоянная по длине трубы шероховатость, образованная выступами одинаковой высоты e_s , при которой потери энергии потока на трение будут теми же самыми, что и при данной реальной шероховатости с выступами различной высоты.

Цель работы — опытное определение коэффициента трения λ и коэффициентов местных сопротивлений ξ , а также ориентировочная оценка эквивалентной шероховатости трубопровода e_s .

Описание установки

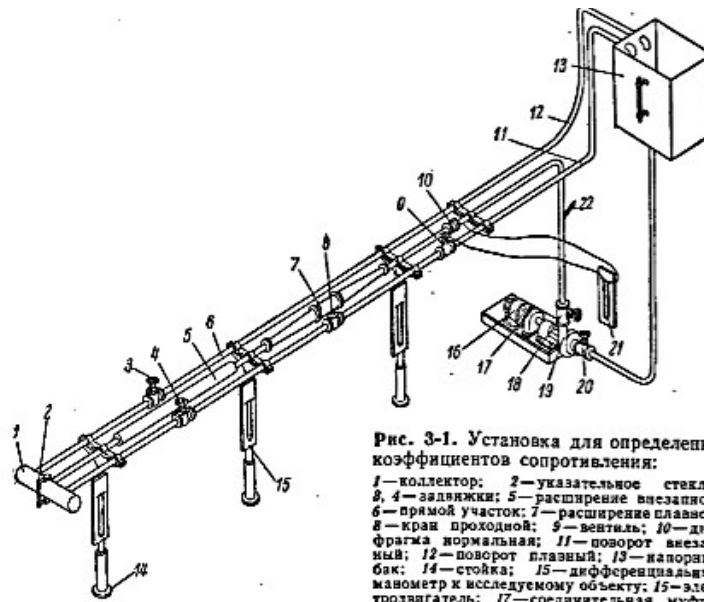


Рис. 3-1. Установка для определения коэффициентов сопротивления:

1—коллектор; 2—указательное стекло; 3, 4—задвижки; 5—расширение внезапное; 6—прямой участок; 7—расширение плавное; 8—край проходной; 9—вентиль; 10—диафрагма нормальная; 11—поворот внезапный; 12—поворот плавный; 13—напорный бак; 14—стойка; 15—дифференциальный манометр к исследуемому объекту; 16—электродвигатель; 17—соединительная муфта; 18—задвижка на нагнетательном трубопроводе; 19—центробежный насос; 20—задвижка на всасывающем трубопроводе; 21—дифференциальный манометр к диафрагме; 22—гильза с термометром.

Вода из напорного бака 13 центробежным насосом 19 подается через систему различных гидравлических сопротивлений и поступает обратно в бак. Замкнутый цикл выбран в целях экономии воды и для предупреждения отпотевания труб (обычно происходящего при заполнении системы водопроводной водой низкой температуры). Бак (емкостью 0,5 м³) укреплен на стене (выше насоса), снабжен трубой, соединенной с городской водопроводной сетью, переливной трубой, спускной трубой и указательным стеклом. Такое расположение бака выбрано для демонстрации работы насоса «под заливом», однако можно расположить бак и ниже насоса. Насос (одноступенчатый, $d = 75$ мм) непосредственно соединен с электродвигателем переменного тока 16 мощностью 4,5 кВт (частота вращения двигателя 50 об/с). Длина установки выбрана с таким расчетом, чтобы возмущения потока, возникающие при прохождении отдельных местных сопротивлений, затухали на прямых участках труб. Вся система покоится на трех стойках 14.

На установке имеется десять объектов исследования. На средней трубе поток проходит сначала плавное расширение 7 (с углом расширения около 6°), а затем плавное сужение, что позволяет наблюдать изменение давления (превращение статического давления в динамическое и обратно) без практически заметных потерь; далее поток проходит внезапное расширение 5 и внезапное сужение и можно убедиться, что потери давления при расширении больше, чем при сужении потока. Затем поток задвижками 3 и 4 может быть направлен либо по ответвлению с арматурой, где можно исследовать сопротивление разных видов запорной арматуры 4, 8 и 9 и внезапного поворота 11, либо по ответвлению, представляющему собой прямой участок трубы 6 длиной 5 м, где можно изучать зависимость коэффициента трения от числа Рейнольдса, а также потери давления при плавном повороте 12. На разветвлении потока установлен коллектор 1 емкостью около 50 дм³, снабженный небольшим воздушным колпаком и указательным стеклом 2. Трубы и арматура на установке имеют условный проход 75 мм; все соединения — фланцевые. Возможные пределы изменения скорости потока от 0,5 до 2,5 м/с (расход до 10 дм³/с). Изменение скорости движения «воды в трубопроводе достигается соответствующей регулировкой расхода задвижкой 18 на нагнетательном патрубке насоса. Расход измеряют ртутным дифференциальным манометром 21, присоединенным к нормальной диафрагме 10, установленной на нагнетательном трубопроводе, а потери давления при прохождении потока через арматуру, повороты и т. д. — водяными 2 дифференциальными манометрами 15 со шкалой длиной 760 мм. Температуру воды

определяют по термометру, находящемуся в гильзе 22, вваренной в нагнетательный трубопровод.

Методика проведения работы

Перед пуском установки удаляют воздух из воздушного колпака на коллекторе, а также из расширенных участков средней трубы и, пользуясь градуировочным графиком (вида рис. 3-2), определяют показания ртутного дифференциального манометра 21, присоединенного к нормальной диафрагме 10, соответствующие заданным расходам. Пуск центробежного насоса производят при закрытой задвижке на нагнетательном трубопроводе и открытой задвижке на всасывающей линии 3. Последняя, во избежание разрушения насоса за счет кавитации, должна быть полностью открыта в течение всего времени работы насоса. По показаниям дифференциального манометра 21 задвижкой 18 на нагнетательном трубопроводе устанавливают сначала наименьший из требуемых расходов. Поток направляют через заданные объекты исследования, и потери давления на соответствующих участках замеряют дифференциальными манометрами 15. Затем увеличивают расход, доведя его до следующего заданного значения, и снова делают отсчеты показаний дифференциальных манометров у исследуемых объектов.

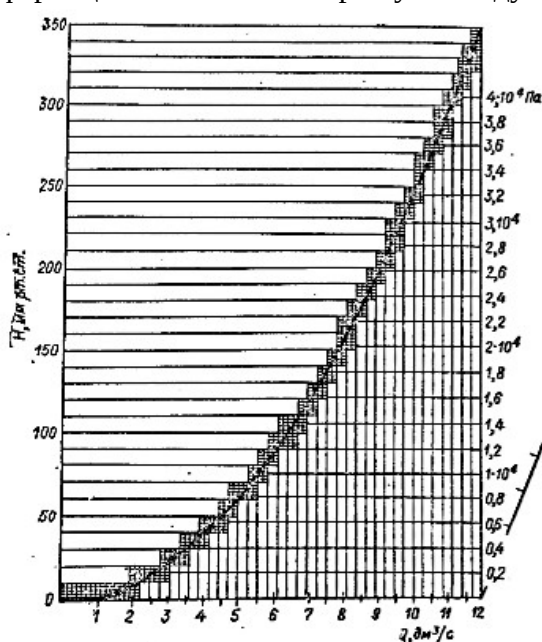


Рис. 3-2. Градуировочная кривая к диафрагме 10.

После окончания испытания объектов, расположенных на одной ветви трубопровода, открывают полностью задвижку 3 или 4 на другой линии, закрывают до отказа задвижку на той ветви, где эксперименты закончены, и продолжают исследование.

Вопросы и задания

1. Запустить установку. Провести исследование, изменяя значения.
2. На преодоление каких потерь затрачивается энергия при движении жидкостей по трубопроводам?
3. В какую форму переходит механическая энергия потока, теряемая при движении?
4. Что такое средняя скорость потока?

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.

2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>

3. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии : учеб.пособие : в 2 кн. / Ю.И. Дытнерский, Ч.1, Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М. : Химия, 2002. – 400 с.

Практическая работа №6. Определение средней скорости потока.

Определение эквивалентной шероховатости трубы

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Среднюю скорость потока при заданных расходах воды находят по уравнению (3-3). Коэффициент трения K рассчитывают, пользуясь формулой (3-1), а коэффициенты местных сопротивлений ξ — по формуле (3-2).

При определении коэффициентов местных сопротивлений в тех случаях, когда местное сопротивление имеет большую протяженность, например, плавный поворот, из значения потери давления, сосчитанного по показанию дифманометра $\Delta p_{\text{ман}}$, следует вычесть сопротивление трения на участке трубы между точками присоединения дифманометра (рис. 3-3). Собственно местное сопротивление

$$\Delta p_{\text{м.с}} = \Delta p_{\text{ман}} - \frac{\Delta p_{\text{тр}}}{L} l$$

здесь $\Delta p_{\text{тр}}$ — сопротивление трения, найденное при той же скорости движения потока;

L — длина прямого участка трубы, для которого определяется сопротивление трения;

l — расстояние между точками присоединения дифманометра.

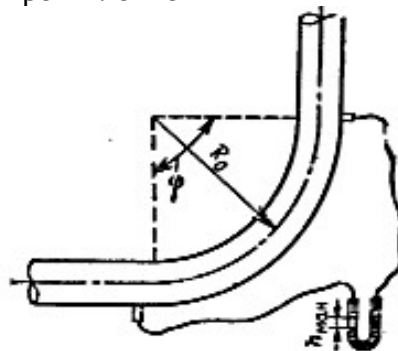


Рис. 3-3. Схема измерения местных сопротивлений.

Перед вычислением значений критерия Рейнольдса рекомендуется привести общее выражение $Re = \omega d \rho / \mu$ к виду $Re = CQ / \mu$ (где Q — расход, $\text{м}^3/\text{с}$; μ — вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$) и найти значение постоянного коэффициента C .

Определение эквивалентной шероховатости трубы

Для оценки полученных результатов необходимо сопоставить найденные опытным путем значения коэффициентов со справочными данными. Эти величины можно найти по вычисленным значениям числа Рейнольдса, пользуясь соответствующими графиками и

таблицами. Чтобы установить шероховатость трубопровода по экспериментально найденным значениям коэффициента трения и значениям чисел Рейнольдса, надо определить из графика (рис. 3-4) условную «гладкость» трубы d/ϵ_z . Отчет о выполненной работе должен включать: а) задание; б) схему установки со спецификацией; в) расчетные формулы; г) таблицу измеренных и рассчитанных величин.

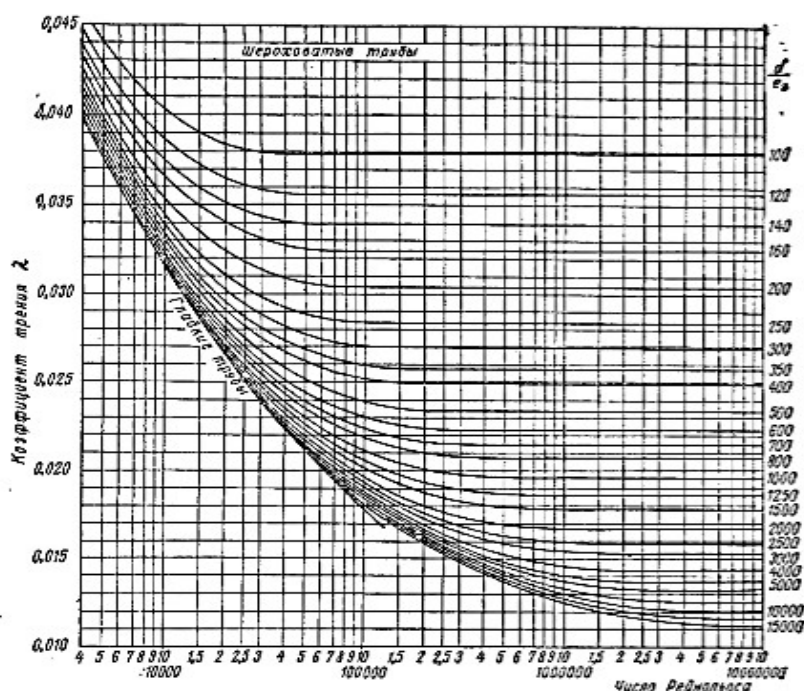


Рис. 3-4. Зависимость коэффициента трения λ стальных труб от числа Рейнольдса Re и характеристики трубопровода d/ϵ_z .

ОТЧЕТНАЯ ТАБЛИЦА¹

№ по пор.	Наименование величины	Обозначение	Опыт		
			1	2	3
1	Расход	Q , м ³ /с			
2	Показания дифференциального манометра, присоединенного к диафрагме	H , мм рт. ст.			
3	Средняя скорость потока	w , м/с			
4	Температура воды	t , °C			
5	Вязкость воды	μ , Па·с			
6	Число Рейнольдса	Re			

¹ Таблица составлена применительно к заданию, приведенному в качестве примера.

Вопросы и задания:

1. Определить коэффициент трения и коэффициенты местных сопротивлений задвижки и вентиля при расходах 3, 6, 9 дм³/с. Оценить шероховатость трубы.
2. Какую шероховатость называют эквивалентной?
3. Как влияет шероховатость на потери энергии потока?
4. Как экспериментально определить коэффициент трения и коэффициент местного сопротивления?
5. Как определить эквивалентную шероховатость трубы?
6. Почему задвижка, кран и вентиль оказывают различные сопротивления?
7. Как при этом исследовании измеряют расход воды, текущей по трубопроводу?
8. Каков порядок пуска центробежного насоса?
9. Физический смысл критериев Эйлера и Рейнольдса.
10. Какова общая форма зависимости коэффициента трения от критерия Рейнольдса?

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / [Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Барабаш и др.] / [под ред. Г. М. Островского], Ч.1. – СПб. : Профессионал, 2004. – 848 с.

Практическая работа №7. Определение характеристик центробежного насоса.

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Одноступенчатый центробежный насос имеет улиткообразный корпус, внутри которого находится рабочее колесо (рис. 4-1). У многоступенчатого центробежного насоса внутри корпуса расположено несколько рабочих колес, насаженных на общий вал и работающих последовательно. Рабочее колесо центробежного насоса состоит из двух дисков, соединенных изогнутыми лопастями. Жидкость, находящаяся между ними, приводится во вращение вместе с рабочим колесом. При этом каждая частица жидкости перемещается по сложной траектории.

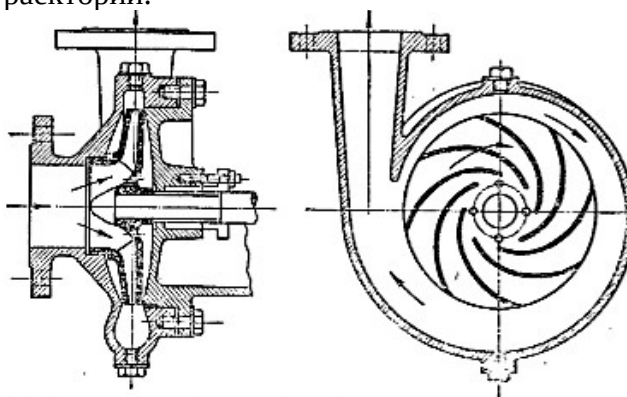


Рис. 4-1. Одноступенчатый центробежный насос.

Во-первых, центробежная сила, отбрасывая жидкость, заставляет ее двигаться радиально, вдоль лопаток от оси колеса к периферии. Во-вторых, увлекаемая лопатками вращающегося колеса жидкость, помимо радиальной скорости приобретает еще окружную скорость, одинаковую со скоростью колесам. Так как окружная скорость на периферии колеса больше, чем у входа из лопатки, то абсолютная (равнодействующая) скорость жидкости на выходе из колеса больше, чем на входе. Таким образом, жидкость, проходящая через рабочее колесо центробежного насоса, приобретает добавочное количество энергии. Жидкость, стремительно выбрасываемая с периферии рабочего колеса, поступает в улиткообразный спиральный канал (см. рис. 4-1), который, кольцом охватывает рабочее колесо. Увеличивающееся к выходному патрубку поперечное сечение

спирального канала приводит к плавному снижению большой скорости, полученной жидкостью на выходе из рабочего колеса, до нормальной скорости в трубопроводе. При этом часть кинетической энергии жидкости переходит в потенциальную, что сопровождается увеличением давления (напора) жидкости. В многоступенчатых центробежных насосах для повышения напора жидкость, выходящая из первого рабочего колеса, поступает с помощью направляющего аппарата на второе рабочее колесо, затем на третье и т. д.

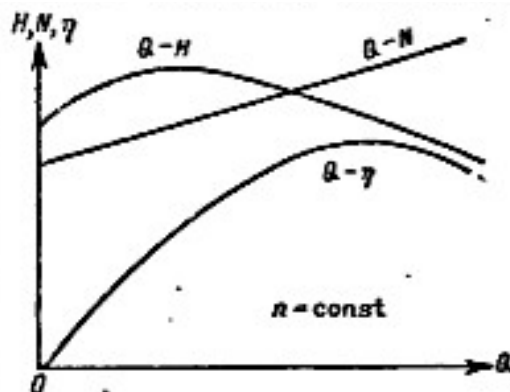


Рис. 4-2. Характеристики центробежного насоса.

Общий напор, создаваемый многоступенчатым насосом, приблизительно равен сумме напоров, приобретенных жидкостью в каждом рабочем колесе. Центробежные насосы, не имеющие специальных пусковых устройств, перед пуском необходимо заливать перекачиваемой жидкостью. Чтобы заливаемая в насос жидкость могла удержаться в нем, на нижнем конце всасывающей трубы, опускаемой в тот резервуар, из которого насос забирает жидкость, устанавливают приемный обратный клапан с наружной сеткой (см. рис. 4-5). Обратный клапан пропускает жидкость только в одном направлении, в данном случае — к насосу. При заливке перед пуском или в случае остановки насоса клапан садится на седло и жидкость из насоса не вытекает. У центробежного насоса с изменением подачи изменяются и другие параметры его работы — напор, мощность, коэффициент полезного действия.

Величины, характеризующие работу центробежного насоса при данном постоянном числе оборотов, обычно представляют в виде графических зависимостей напора H , мощности N и к. п. д. от подачи Q (рис. 4-2). Зависимости $Q-H$, $Q-N$ и $Q-\eta$ называются характеристиками насоса и устанавливаются опытным путем. Этими характеристиками широко пользуются при изучении работы центробежных насосов и при их выборе. При изменении в небольших пределах частоты вращения n центробежного насоса его подача Q , напор H и потребляемая мощность N также изменяются в следующих соотношениях:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (4-1)$$

Как видно из рис. 4-2, с увеличением подачи Q мощность N , потребляемая насосом, непрерывно возрастает. При закрытой задвижке на нагнетательном трубопроводе ($Q = 0$) насос потребляет минимальную мощность (на преодоление трения в подшипниках и сальнике и на перемешивание жидкости рабочим колесом в корпусе насоса). Поэтому, чтобы не перегружать электродвигатель, необходимо пускать центробежный насос при закрытой задвижке. Выбор насоса и установление его частоты вращения зависят от условий работы насоса на сеть (трубопровод). Эти условия определяются так называемой характеристикой сети ($Q-H_c$), т. е. зависимостью между подачей Q и напором H_c , необходимым для преодоления (сети) всех сопротивлений данного трубопровода

Как известно, для несжимаемой жидкости:

$$H_c = \left(1 + \frac{\lambda L}{d} + \sum \xi\right) \frac{w^2}{2g} + H_{\text{под}} + H_{\text{доп}} \quad (4-2)$$

Здесь $H_{\text{под}} = H_{\text{вс}} + H_{\text{н}}$ — геометрическая высота подъема жидкости;

$H_{\text{доп}}$ — разность напоров в пространствах нагнетания $H_{\text{н}}$ и всасывания $H_{\text{вс}}$.

Подставляя в это выражение значение скорости из уравнения расхода

$$w = \frac{Q}{f}$$

(где f — площадь поперечного сечения сети), получаем

$$H_c = \frac{1 + \frac{\lambda L}{d} + \sum \xi}{2gf^2} Q^2 + H_{\text{под}} + H_{\text{доп}} = aQ^2 + b \quad (4-3)$$

где $a = \frac{1 + \frac{\lambda L}{d} + \sum \xi}{2gf^2}$ — величина, близкая к постоянному значению для данного трубопровода (сети)¹.

Полученное уравнение

$$H_c = aQ^2 + b$$

в координатах $H_c - Q$ дает параболу (рис. 4-3), вершина которой расположена по оси ординат на высоте $b = H_{\text{под}} + H_{\text{доп}}$ от начала координат. Все характеристики насоса и характеристику соединенного с ним трубопровода (сети) вычерчивают на общем графике (рис. 4-4). Пересечение характеристик насоса $Q - H$ и сети $Q - H_c$ дает так называемую «рабочую точку». Эта точка определяет условия совместной работы системы «насос — трубопровод (сеть)», когда $H = H_c$. Она показывает, что все гидравлические сопротивления трубопровода преодолеваются напором, создаваемым насосом. Вертикальная линия, проведенная через рабочую точку, пересекает характеристики насоса $Q - H$, $Q - \eta$ и ось абсцисс в точках, определяющих показатели работы насоса в данных условиях.

Например, для рабочей точки А (см. рис. 4-4) параметры работы насоса следующие: подача — Q_A , напор — H_A , потребляемая мощность — N_A , к. п. д. — η_A . Положение рабочей точки дает возможность судить о степени использования возможностей насоса в данных условиях. Если, например, рабочая точка занимает положение

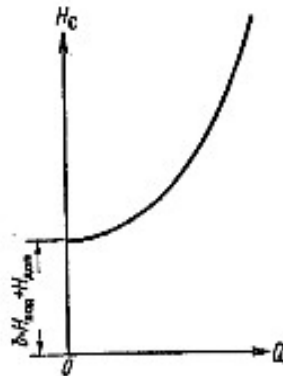


Рис. 4-3. Характеристика трубопровода (сети).

ние А (см. рис. 4-4), то насос работает с к. п. д. η_A , значительно меньшим максимального значения $\eta_{\text{макс}}$, с каким он мог бы работать на другую сеть, с другой характеристикой, при которой рабочая точка занимала бы положение В.

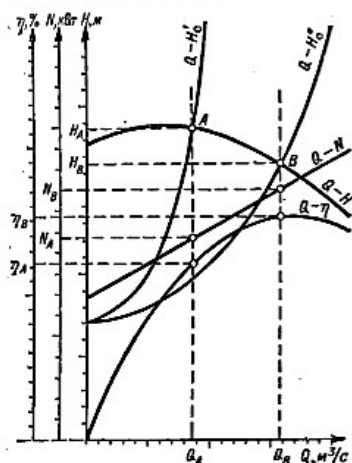


Рис. 4-4. Совмещенные характеристики центробежного насоса и сети.

Описание установки (рис. 4-5). Центробежный насос 1 установлен на одном валу с электродвигателем постоянного тока 2, что позволяет проводить испытания насоса при разных частотах вращения, изменение которых легко осуществляется с помощью реостатов 3. Частоту вращения измеряют тахометром 5. Мощность, потребляемую насосом, определяют по показаниям амперметра 19 и вольтметра 20. Вода засасывается насосом из расходного бака 12, установленного ниже пола помещения. На всасывающем трубопроводе 11 установлены приемный обратный клапан 13, препятствующий стоку воды при заливе насоса, и вакуумметр 9. Залив насоса производят через трубопровод 10. На нагнетательном трубопроводе 7 установлены манометр 8 и задвижка 6 для регулирования расхода (подачи) воды. Вода из нагнетательного трубопровода поступает в воронку 181, а из нее через трубу 7а и поворотный отвод 17 — в один из мерных баков 15. Каждый из баков имеет показатель уровня (водомерное стекло), шкала которого проградуирована в литрах. В донной части баков расположены широкие спускные отверстия с клапанами 14, открытие и закрытие которых производится рычагами 16. При открытии спускного клапана 14 вода из мерного бака 15 быстро сливается в бак 12, откуда вновь засасывается насосом 1. Такая замкнутая схема гарантирует бесперебойное питание установки водой и делает опытную установку независимой от местного водопровода, а также позволяет избежать отпотевания труб и стенок баков.

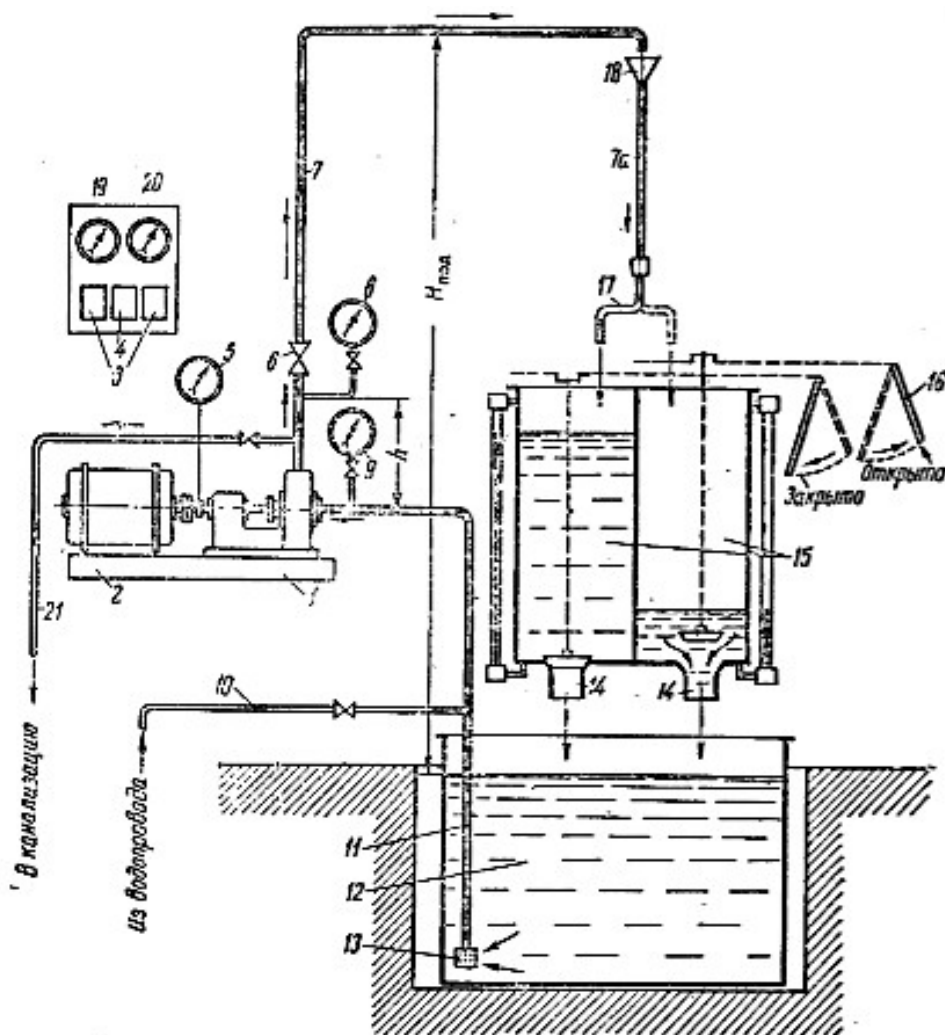


Рис. 4-5. Установка для испытания центробежного насоса:

1—центробежный насос; 2—электродвигатель постоянного тока; 3—реостаты; 4—руби́льни́к; 5—тахометр; 6—задви́жка; 7—труба нагнетательная; 7а—сточная труба; 8—манометр; 9—вакуумметр; 10—трубопровод; 11—труба всасывающая; 12—расходный бак; 13—приемный обратный клапан; 14—спускные клапаны; 15—мерные баки; 16—рычаги спускных клапанов; 17—поворотный отвод; 18—воронка; 19—амперметр; 20—вольтметр; 21—сливная труба.

Методика проведения работы

Испытание насосной установки проводят в два этапа. На первом этапе определяют величины, необходимые для построения характеристик насоса: $Q — H$, $Q — N$, $Q — \eta$; на втором — величины, необходимые для построения характеристики сети $Q — H_c$. На первом этапе испытания проводят при постоянной частоте вращения насоса, но при разных расходах воды (подачах насоса). Изменение подачи производят постепенным открытием задвижки 6 на нагнетательной трубе 7. Первое наблюдение проводят при полностью закрытой задвижке; последующие — при постепенном открытии задвижки (примерно на один оборот шпинделя для каждого нового режима работы). Для удобства установления режима на шпинделе задвижки нанесены риски. Последнее наблюдение на первом этапе проводят при полностью открытой задвижке.

При каждом повороте задвижки (в сторону открытия) частота вращения насоса будет уменьшаться, поэтому сразу же после поворота задвижки необходимо с помощью реостатов восстановить заданную частоту вращения насоса, а затем одновременно произвести замеры: 1) подачи насоса, 2) разрежения во всасывающей трубе, 3) давления в нагнетательной трубе, 4) напряжения и силы электрического тока. На втором этапе работы испытания проводят при постоянном (заданном) открытии задвижки, но при разных частотах вращения насоса. Наблюдения проводят при трех разных частотах вращения. Для каждой частоты вращения производят замеры: 1) подачи насоса, 2)

разрежения во всасывающей трубе и 3) давления в нагнетательной трубе. Затем изменяют положение задвижки (по заданию преподавателя) и проводят вторую серию наблюдений при тех же трех значениях частот вращения, что и в первой серии. Выше указано, что вершина параболы (характеристика $Q-H_c$) расположена по оси ординат на расстоянии B от начала координат:

$$b = H_{\text{пол}} + H_{\text{доп}}$$

Так как в данной установке дополнительного напора $H_{\text{доп}}$ нет, то $B = ЯПОД$. По данным, полученным во втором этапе испытания, строят две характеристики $Q - H_c$ и совместно с характеристиками насоса, полученными в первом этапе наблюдений ($Q - H$, $Q - N$, $Q - \eta$) наносят их на общий график (см. рис. 4-4). На пересечении кривых $Q - H_c$ и $Q - H$ получают рабочие точки A и B и определяют параметры работы насосной установки. Замер показателей работы насоса производят следующим образом. Подача насоса. Установив заданную частоту вращения, закрывают в одном из мерных баков 15 спускной клапан 14 поворотом рычага 16. Спускной клапан во втором мерном баке должен быть открыт. Затем быстро переводят поворотный отвод 17 на мерный бак с закрытым клапаном и одновременно включают секундомер. По заполнении мерного бака водой (примерно на 3Д) переводят поворотный отвод 17 в прежнее положение, т. е. на второй бак с открытым спускным клапаном, и одновременно выключают секундомер. Количество воды, замеренное по водомерному стеклу, и время по секундомеру записывают в отчетную таблицу. По окончании записей сливают воду с помощью рычага 16 и устанавливают задвижкой 6 новый расход воды. Напор (полный напор) насоса H , выраженный в метрах столба подаваемой жидкости, определяют следующим образом

$$H = P_m + P_v + h + \frac{w_n^2 - w_{вс}^2}{2g} \quad (4-4)$$

где P_m и P_v — показания манометра и вакуумметра, выраженные в метрах столба подаваемой жидкости (воды);

h — расстояние по вертикали между местами присоединения манометра и вакуумметра (см. рис. 4-5).

w_n и $w_{вс}$ — скорости воды в нагнетательном и всасывающем трубопроводах в местах присоединения манометра и вакуумметра.

Так как в данной установке всасывающий и нагнетательный трубопроводы имеют одинаковый диаметр, то $w_n = w_{вс}$.

Таким образом:

$$H = P_m + P_v + h \quad (4-5)$$

Обработка опытных данных и составление отчета

Подача насоса (м³/с),

$$Q = \frac{V}{1000 \cdot t}$$

где V — объем воды, определенный по водомерному стеклу, л; t — продолжительность замера, с.

Мощность, потребляемая насосной установкой (кВт)

$$N = \frac{UI}{1000}$$

где U — напряжение, В; I — сила тока, А.

Коэффициент полезного действия насоса

$$\eta = \frac{Q \rho g H}{1000 N}$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с². Все величины, измеренные в процессе испытания и полученные расчетом, записывают в отчетную таблицу. Работу заканчивают построением графика (см. рис. 4-4) и определением параметров рабочих точек A и B . В отчет должны быть включены задание и

схема установки со спецификацией.

ОТЧЕТНАЯ ТАБЛИЦА											
№ по пор.	Частота вращения n , об/мин	Продолжительность замера t , с	Объем воды V , л	Подача насоса Q , м ³ /с	Давление P_m	Разрежение P_v	Полный напор H , м вод. ст.	Сила тока I , А	Напряжение U , В	Мощность N , кВт	К. п. д. η
					м вод. ст.	м вод. ст.					
I этап наблюдений (при постоянной частоте вращения $n = \dots$ об/мин)											
1											
2											
3											
...											
...											
II этап наблюдений (при постоянном открытии задвижки и разных частотах вращения)											
I-я серия наблюдений											
1											
2											
3											

Вопросы и задания:

1. Практическое ознакомление с насосной установкой, определение по экспериментальным данным зависимостей $Q - H$, $Q - N$, $Q - \eta$, $Q - H_c$ и параметров рабочей точки.
2. Как устроен центробежный насос?
3. Из каких составляющих складывается абсолютная скорость жидкости в рабочем колесе насоса? 3. Какое назначение имеет спиральный улиткообразный канал?
4. Какие зависимости называются характеристиками центробежного насоса?
5. Для чего служит приемный обратный клапан?
6. Из чего складывается напор H_c , теряемый в сети?
7. Какой физический смысл имеет характеристика сети?
8. В каком случае характеристика сети проходит через начало координат?
9. Какой физический смысл имеет рабочая точка?
10. Как изменяют при работе на установке характеристику сети?
11. Когда применяют многоступенчатые центробежные насосы?
12. Почему центробежный насос пускают в ход при закрытой задвижке на нагнетательной линии?

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». – 2-е изд., испр. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. – 608 с.

Практическая работа №8. Определение характеристик центробежного вентилятора.

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Вентиляторами называют машины, предназначенные для перемещения газов при атмосферном давлении или близком к нему. Перемещаемый газ подвергается в вентиляторе незначительному сжатию — разность давлений газа после вентилятора и до него не превышает 104 Па (0,1 кгс/см² или 1000 мм вод. ст.), а обычно бывает много меньше. По устройству вентиляторы разделяют на центробежные и осевые. Центробежные вентиляторы создают большую разность давлений, чем осевые. Сжатие и перемещение газа в центробежном вентиляторе происходит под действием центробежной силы, возникающей при вращении с большой скоростью рабочего колеса вентилятора (рис. 5-1). Это колесо имеет изогнутые лопатки, между которыми проходит газ, всасываемый рабочим колесом в центре и выбрасываемый с периферии в улиткообразный корпус вентилятора. При постоянной частоте вращения (при постоянном значении развиваемой центробежной силы) работа центробежного вентилятора характеризуется следующими величинами:

- 1) объемным расходом перемещаемого газа — Q , м³/с;
- 2) создаваемой разностью давлений после вентилятора и до него — Δp , Па;
- 3) затрачиваемой мощностью — N , Вт;
- 4) коэффициентом полезного действия — η , представляющим собой отношение мощности $Q\Delta p$, требуемой теоретически для сжатия газа к мощности N , затрачиваемой в действительности:

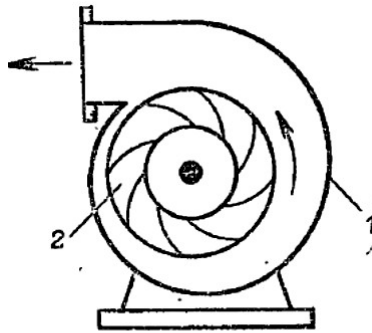


Рис. 5-1. Схема центробежного вентилятора:
1 — корпус; 2 — рабочее колесо.

У центробежных вентиляторов Q , Δp и N связаны между собой, и изменение одной из этих величин вызывает изменение остальных. Графические зависимости: $\Delta p = f_1(Q)$; $N = f_2(Q)$; $\eta = f_3(Q)$ называются характеристиками вентилятора. На основании теоретических расчетов эти характеристики с достаточной точностью построить нельзя. Поэтому на практике применяют характеристики вентиляторов, полученные опытным путем. Типичные характеристики центробежного вентилятора при постоянной частоте вращения n показаны на рис. 5-2.

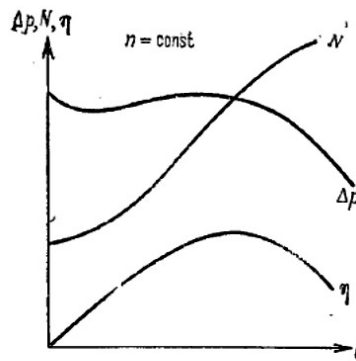


Рис. 5-2. Характеристики центробежного вентилятора.

При другой частоте вращения характеристики вентиляторов будут другими. В небольших пределах изменения n изменения Q , Δp и N определяются следующими приближенными соотношениями:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

Характеристики вентиляторов служат для исследования их работы в различных условиях и для подбора вентиляторов при проектировании вентиляционных установок. Первая часть данной лабораторной работы заключается в экспериментальном определении трех характеристик центробежного вентилятора при $n = \text{const}$. Для этого, изменяя диафрагменным затвором, установленным на выходе из нагнетательного трубопровода (рис. 5-3), диаметр выходного отверстия и расход перемещаемого вентилятором воздуха, измеряют соответствующими контрольно-измерительными приборами, как об этом сказано ниже, все величины, необходимые для определения Q , Δp и N .

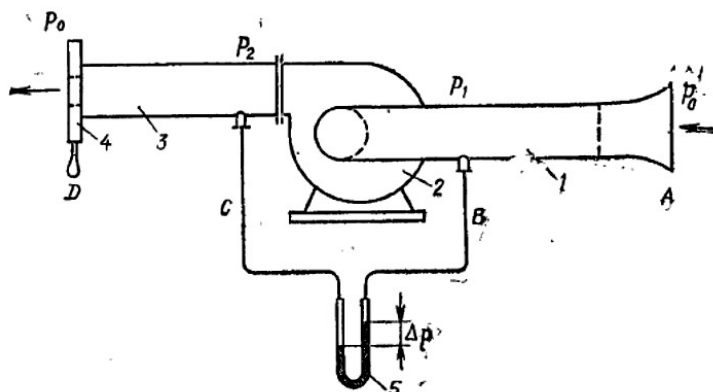


Рис. 5.3. Схема измерения разности давлений, создаваемой вентилятором
1 — всасывающий трубопровод; 2 — центробежный вентилятор; 3 — нагнетательный трубопровод;
4 — диафрагменный затвор; 5 — дифманометр.

Разность давлений, создаваемая вентилятором (см. рис. 5-3):

$$\Delta p = p_2 - p_1 \quad (5-2)$$

где p_1 и p_2 — статические давления воздуха перед вентилятором и после него в местах, присоединения трубок дифманометра. Вторую часть работы составляет построение так называемой характеристики сети и графика работы вентилятора на сеть.

Сетью называют тот трубопровод или канал, на который работает вентилятор. В данной установке сеть состоит из всасывающего и нагнетательного трубопроводов. Если по трубопроводу постоянного поперечного сечения проходит газ, то давление его на выходе из трубопровода всегда будет меньше, чем на входе. Объясняется это тем, что газу приходится преодолевать гидравлическое сопротивление трубопровода, на что затрачивается часть энергии (давления) газа. Гидравлическое сопротивление трубопровода складывается из сопротивления трения, сопротивлений при поворотах, в ventилях, задвижках и др. Следовательно, гидравлическое сопротивление трубопровода (сети) зависит от его геометрических параметров; зависит оно также и от расхода проходящего по трубопроводу газа. Для случая, когда проходящий по трубопроводу газ — воздух, и из сети он выходит в атмосферу, эта зависимость выражается теоретическим уравнением

$$\Delta p_c = aQ^2 \quad (5-3)$$

где Δp_c — гидравлическое сопротивление — потеря давления в сети, Па;

a — коэффициент, характеризующий геометрические параметры сети (постоянный для данной сети);

Q — расход воздуха, проходящего через сеть, м³/с.

График уравнения (5-3) называют характеристикой сети. На рис. 5-4 представлены характеристики двух сетей, отличающихся геометрически. Применительно к нашей установке сеть a_1 геометрически отличается от сети a_2 тем, что в сети a_2 больше открыт диафрагменный затвор, поэтому при одинаковом расходе воздуха Q гидравлическое сопротивление сети a_2 меньше. Для построения характеристики сети расход воздуха уже нельзя изменять диафрагменным затвором, так как при этом сеть геометрически изменяется, и приходится делать это другим путем — изменением частоты вращения вентилятора. Из рис. 5-3 видно, что полное гидравлическое сопротивление сети Δp_c , складывающееся из сопротивлений всасывающего (AB) и нагнетательного (CD) трубопроводов, равно

$$\Delta p_c = \Delta p_{AB} + \Delta p_{CD} = (p_0 - p_1) + (p_2 - p_0) = p_2 - p_1$$

здесь p_0 — атмосферное давление. Сопоставив уравнения (5-2) и (5-4), видим, что $\Delta p = \Delta p_c$ (5-5)

т. е. вентилятор всегда создает такую разность давлений, которая равняется гидравлическому сопротивлению сети, другими словами, он сообщает воздуху такое

количество энергии, которое необходимо для преодоления этого сопротивления. Совмещая характеристики вентилятора и сети, т. е. графики рис. 5-2 и 5-4, получают так называемый график работы центробежного вентилятора на сеть (рис. 5-5). Точка пересечения линий $Q - \Delta p$ и $Q - \Delta p_{сн}$ на этом графике, в котором $\Delta p = \Delta p_{сн}$, называется рабочей точкой. Положение рабочей точки определяет все величины, характеризующие работу вентилятора на данную сеть $Q, \Delta p, N, \eta$. Из рис. 5-5 видно, что в зависимости от характеристики сети параметры работы вентилятора при той же частоте оборотов могут сильно отличаться — см. рабочие точки А и В. Цель работы — построение экспериментальных характеристик вентилятора и сети и определение параметров рабочей точки.

Описание установки (рис. 5-6)

Установка состоит из центробежного вентилятора 1, смонтированного на одном валу с электродвигателем постоянного тока 2. Последний дает возможность легко изменять частоту вращения вентилятора с помощью реостата. К вентилятору присоединены трубы: нагнетательная 4 и всасывающая 5 одинакового диаметра ($d_{внутр} = 220$ мм).

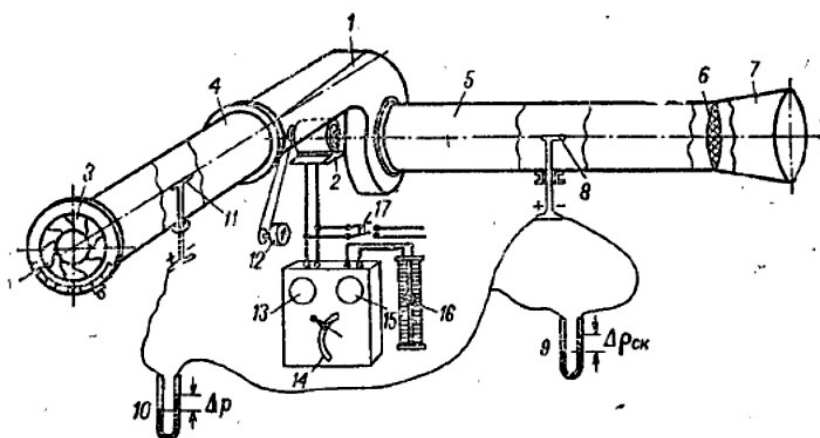


Рис. 5-6. Схема установки:

1—центробежный вентилятор; 2—электродвигатель постоянного тока; 3—диафрагменный затвор; 4—труба нагнетательная; 5—труба всасывающая; 6—сетка; 7—раструб; 8, 11—трубки Пито; 9, 10—дифманометры; 12—тахометр; 13—амперметр; 14, 16—реостаты; 15—вольтметр; 17—рубильник.

На входном участке всасывающей трубы имеется плавный раструб 7, за которым установлена сетка 6 для предохранения от засасывания в трубопровод посторонних предметов. В выходном отверстии нагнетательной трубы установлен диафрагменный затвор 3, позволяющий плавно изменять площадь выходного отверстия (и, следовательно, изменять сопротивление нагнетательного трубопровода). Из всех составляющих гидравлического сопротивления сети наибольшее значение имеют сопротивления сетки 6 и диафрагменного затвора 3, по сравнению с которыми остальные составляющие (трение, сопротивление на входе) очень малы. Реостаты 14 и 16 служат для пуска и изменения частоты вращения электродвигателя. На щите электродвигателя и на трубопроводах установлены следующие контрольно-измерительные приборы:

- а) тахометр 12 для определения частоты вращения вентилятора;
- б) амперметр 13 и вольтметр 15 для определения силы и напряжения постоянного электрического тока;
- в) трубки Пито 8 и 11, соединенные с дифференциальными манометрами 9 и 10. (Назначение и устройство трубок Пито и дифманометров см. в работе 2.)

Методика проведения работы

Для получения характеристик вентилятора $Q - \Delta p, Q - N, Q - \eta$ проводят первую серию опытов (10 наблюдений) при постоянной частоте вращения n , которую задает

преподаватель (не более 1200 об/мин). Расход перемещаемого вентилятором воздуха изменяют при этих опытах диафрагменным затвором 3, меняя его открытие. Для получения характеристики сети $Q - \Delta p_{\text{ср}}$ проводят вторую серию опытов (5 наблюдений), при которой открытие затвора 3, т. е. геометрическая характеристика сети, остается постоянным (его задает преподаватель), а расход воздуха меняют путем изменения частоты вращения вентилятора.

Необходимые для построения характеристик вентилятора и сети значения Q , Δp , N , η определяют путем соответствующей обработки показаний контрольно-измерительных приборов, полученных во время испытания. Показания дифманометра 9, дифманометра 10, амперметра 13 и вольтметра 15 снимают одновременно по команде «отсчет». Эту команду подает студент, регулирующий частоту вращения вентилятора, после того как диафрагменный затвор 3 переставлен в новое положение и восстановлена реостатами заданная частота вращения (I серия опытов) или после того как установлена новая частота вращения (II серия опытов). После ознакомления с описанием работы и с установкой в натуре проверяют правильность положения трубок Пито в трубопроводах, нулевые положения жидкости в дифференциальных манометрах и с разрешения преподавателя пускают вентилятор — включают рубильник и плавно выводят сначала пусковой реостат 14, а затем — регулировочный 16. Остановку вентилятора после окончания работы производят в обратном порядке.

Обработка опытных данных и составление отчета

1) $\Delta p = p_2 - p_x$ — разность давлений, создаваемую вентилятором, определяют (в мм вод. ст.) непосредственным замером по дифференциальному манометру 10. Как видно из рис. 5-6, дифманометр 10 присоединен к трубкам Пито так, что он показывает разность между общим (статическое + динамическое) давлением в нагнетательном трубопроводе и общим давлением во всасывающем трубопроводе. Это показание дифманометра равно разности статических давлений воздуха после и до вентилятора, так как динамические давления во всасывающем и в нагнетательном трубопроводах одинаковы, потому что одинаковы диаметры обоих трубопроводов.

2) N — мощность, потребляемую вентиляционной установкой, рассчитывают по формуле $N = UI$ (5-6), где U — напряжение постоянного тока, В; I — сила тока, А.

3) Q — расход перемещаемого вентилятором воздуха рассчитывают по уравнению расхода для потока воздуха в трубопроводе

$$Q = wf \quad (5-7)$$

где w — средняя скорость воздуха в трубопроводе, м/с; $f = 0,785 d^2$ — площадь поперечного сечения трубопровода, м² (d — внутренний диаметр трубопровода, м). Среднюю скорость воздуха w находят следующим образом. Дифференциальный манометр 9 (см. рис. 5-6), присоединенный к трубке Пито 8, которая установлена по оси всасывающего трубопровода, показывает (в мм вод. ст.) скоростное (динамическое) давление $\Delta p_{\text{ск}}$ — кинетическую энергию единицы объема воздуха в центре этого трубопровода

$$\Delta p_{\text{ск}} = \frac{w_{\text{макс}}^2 \rho}{2} \quad (5-8)$$

где $w_{\text{макс}}$ — скорость элементарной струйки воздуха, проходящей в центре трубопровода — осевая или максимальная скорость, м/с;

ρ — плотность воздуха, кг/м³.

При развитом турбулентном режиме течения в трубопроводе, когда значение критерия $Re \wedge 10000$ (о критерии Рейнольдса см. работу 1), можно принять:

$$\frac{w}{w_{\text{макс}}} = 0,9 \quad (5-9)$$

Из уравнений (5-7) — (5-9) получаем:

$$Q = 0,785 \cdot 0,9d^2 \sqrt{\frac{2 \Delta p_{\text{ск}}}{\rho}} = \frac{d^2}{\sqrt{\rho}} \sqrt{\Delta p_{\text{ск}}} = C \sqrt{\Delta p_{\text{ск}}} \quad (5-10)$$

Значение плотности воздуха ρ берут из табл. VII (см. Приложение).

4) η — к. п. д. вентилятора (с электродвигателем) вычисляют по уравнению (5-1). С целью проверки режима течения воздуха в трубопроводе вычисляют значение критерия Рейнольдса для того опыта, в котором расход воздуха наименьший

$$Re = \frac{w d \rho}{\mu} \quad (5-11)$$

Вязкость воздуха μ (Па*с) берут из табл. VII — см. Приложение.

Отчет о выполненной работе должен включать: а) задание б) схему установки со спецификацией; в) отчетные таблицы; г) расчет значений Q , N , η , (табл. 5-1) для какого-либо одного опыта; расчет критерия Re для наименьшего расхода воздуха; д) график работы вентилятора на сеть и определение параметров рабочей точки.

ОТЧЕТНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Таблица 5-1

Характеристики вентилятора при постоянной частоте вращения

$n = \dots$ об/мин

№ по пор.	Положение диафрагменного затвора	Измеренные величины						Рассчитанные величины		
		Δp		$\Delta p_{\text{ск}}$		I, A	U, B	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$N, \text{Вт}$	η
		мм вод. ст.	Па	мм вод. ст.	Па					
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

Таблица 5-2

Характеристика сети при постоянном открытии диафрагменного затвора

№ по пор.	$n, \text{об/мин}$	Δp_c		$\Delta p_{\text{ск}}$		$Q, \text{м}^3/\text{с}$
		мм вод. ст.	Па	мм вод. ст.	Па	
1						
2						
3						
4						
5						

Вопросы и задания:

1. Определить характеристики вентилятора и сети
2. Как устроен и работает центробежный вентилятор?

3. Разность каких давлений показывает дифманометр, присоединенный к плюсу и минусу трубки Пито, установленной во всасывающем трубопроводе вентилятора?
4. Почему при определении характеристик вентилятора можно изменять расход воздуха диафрагменным затвором, а при определении характеристики сети — нельзя?
5. Какой физический смысл имеют характеристика сети и рабочая точка?
6. Почему плотность воздуха во всасывающем и в нагнетательном трубопроводах вентилятора считают одинаковой?
7. Что нужно сделать на установке, чтобы характеристика сети стала бы менее крутой?
8. В чем преимущество дифманометра с наклонной шкалой по сравнению с обычным U-образным дифманометром?
9. Можно ли для определения разности давлений, создаваемой вентилятором, соединить через дифманометр не плюсы двух трубок Пито, как это сделано на установке, а их минусы?
10. Если убрать сетку из всасывающего трубопровода, то при том же открытии диафрагменного; затвора как это отразится на положении рабочей точки (для данной частоты вращения вентилятора)?
11. Почему для измерения разности давлений, создаваемой вентилятором, и гидравлического сопротивления сети в установке используется один и тот же дифманометр?
12. Для чего служит тахометр?
13. Чем общее давление отличается от статического?
14. Для чего проверяют значение критерия Рейнольдса при наименьшем расходе воздуха?

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». – 2-е изд., испр. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. – 608 с.

Практическая работа №9. Изучение гидравлики взвешенного слоя.

Изучение работы циклона

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

В настоящее время ряд процессов химической технологии, при которых происходит взаимодействие газа или жидкости с мелко раздробленным твердым материалом (сушка, обжиг, адсорбция, каталитические процессы), осуществляют в аппаратах с так называемым взвешенным (псевдооживленным) или кипящим слоем. В таких аппаратах указанные процессы значительно ускоряются. Если через неподвижный слой твердых частиц, лежащих на решетке, пропускать снизу вверх поток газа и при этом постепенно увеличивать его скорость, то при некоторой скорости газа, называемой критической, весь слой твердых частиц переходит во взвешенное состояние. При дальнейшем повышении скорости газа в аппарате объем взвешенного слоя возрастает. Такой расширившийся взвешенный слой, в котором происходит интенсивное перемешивание твердых частиц, во многом напоминает кипящую жидкость — он «течет», принимает форму сосуда, через него пробулькивают пузыри газа; поэтому его часто и называют кипящим или псевдооживленным слоем. При дальнейшем увеличении скорости газа продолжается расширение взвешенного слоя. Наконец, при некоторой скорости газа, называемой скоростью уноса, взвешенный слой разрушается — твердые частицы уносятся из аппарата потоком газа (возникает их пневмотранспорт). Обозначим площадь поперечного сечения аппарата через F (м²), а объемный расход газа через V (м³/с). Тогда скорость газа, отнесенная к полному поперечному сечению пустого аппарата, или так называемая фиктивная скорость ω_f (м/с), будет равна:

$$\omega_f = \frac{V}{F} \quad (10-1)$$

Действительно, скорость газа w в промежутках между частицами слоя, измерить которую трудно, всегда будет больше фиктивной. Если, увеличивая постепенно расход газа, измерять дифференциальным манометром падение давления газа при прохождении его через находящийся на решетке слой твердых частиц (рис. 10-1), т.е. измерять гидравлическое сопротивление слоя Δp_{cl} , а затем построить график зависимости Δp_{cl} от фиктивной скорости газа ω_f , то этот график будет иметь вид, показанный на рис. 10-2,

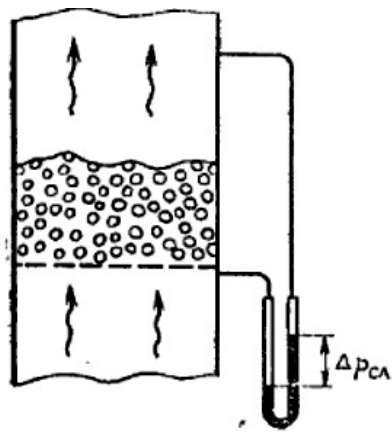


Рис. 10-1. Измерение гидравлического сопротивления слоя.

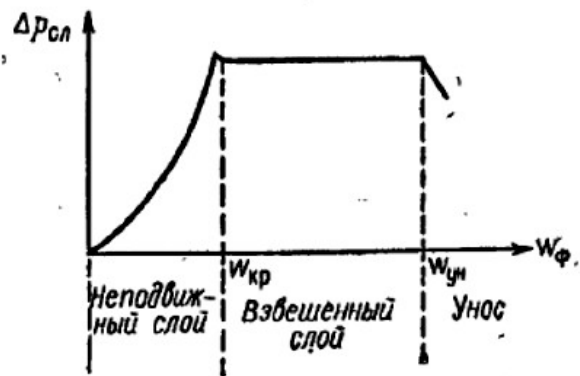


Рис. 10-2. Зависимость гидравлического сопротивления слоя от фiktивной скорости газа.

Как видно из рис. 10-2, в области существования взвешенного слоя, начиная от критической скорости газа $w_{кр}$ до скорости уноса $w_{ун}$, величина $\Delta p_{сл}$ сохраняет постоянное значение. Причина этого рассмотрена ниже. Переход твердых частиц неподвижного слоя во взвешенное состояние начнется тогда, когда сила P динамического воздействия потока среды на частицу станет равной весу частицы G за вычетом подъемной (архимедовой) силы A (см. рис. 9-1):

$$P = G - A \quad (10-2)$$

Для шаровой частицы

$$P = \zeta \frac{\pi d^2}{4} \frac{w^2 \rho_c}{2} \quad (10-3)$$

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \rho g \quad (10-4)$$

$$A = \frac{\pi d^3}{6} \rho_c g \quad (10-5)$$

где ζ — безразмерный коэффициент сопротивления, зависящий от режима течения среды;

d — диаметр частицы, м;

w — действительная скорость среды между частицами, м/с;

ρ и ρ_c — плотности частицы и среды, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с².

Из уравнений (10-4) и (10-5) находим:

$$G - A = \frac{\pi d^3}{6} (\rho - \rho_c) g \quad (10-6)$$

Если среда — газ, то плотностью среды по сравнению с плотностью частицы можно пренебречь и уравнение (10-2) примет вид:

$$P = G$$

Когда все частицы слоя перешли во взвешенное состояние, то давление газа перед слоем должно преодолевать вес частиц, приходящихся на единицу площади поперечного сечения аппарата f ,

$$\Delta p_{сл} = \frac{G_{сл}}{f} \quad (10-8)$$

где $G_{сл}$ — вес всех частиц слоя. Н.

Из уравнения (10-8) видно, что для взвешенного слоя потеря давления $\Delta p_{сл}$ постоянна, т. е. не зависит от скорости газа Шф. Это постоянство значения $\Delta p_{сл}$ объясняется тем, что при повышении расхода газа и его фиктивной скорости w_f происходит одновременное увеличение объема взвешенного слоя и расстояния между частицами. Вследствие этого действительная скорость газа между частицами w , от которой зависит сопротивление слоя, остается неизменной. Важнейшей характеристикой слоя твердых частиц как неподвижного, так и взвешенного, является порозность ϵ — объемная доля газа в слое

$$\epsilon = \frac{v_{сл} - v_q}{v_{сл}} = 1 - \frac{v_q}{v_{сл}} \quad (10-9)$$

где $v_{сл}$ — общий объем, занимаемый слоем, m^3 ;
 v_q — объем, занимаемый только твердыми частицами, m^3 .

Для неподвижного слоя шаровых частиц одинакового диаметра порозность ϵ составляет приблизительно 0,4, независимо от диаметра частиц. Для взвешенного слоя порозность ϵ с увеличением расхода газа будет повышаться, так как объем взвешенного слоя при этом возрастает. При скорости уноса $w_{ун}$, предельной для взвешенного слоя, можно считать, что $\epsilon = 1$. Для расчета аппаратов со взвешенным слоем необходимы расчетные уравнения, устанавливающие зависимость между физическими свойствами газа и твердых частиц, скоростью газа и порозностью слоя ϵ . Такие эмпирические уравнения представляют в виде зависимостей между обобщенными безразмерными переменными, так называемыми критериями подобия, которые включают все физические величины, оказывающие влияние на рассматриваемый процесс. В гидравлике взвешенного слоя очень удобной для расчетов и наглядной является графическая зависимость между критериями Лященко и Архимеда

$$Ly = f(Ar) \quad (10-10)$$

при значениях ϵ от 0,4 до 1, соответствующих области существования взвешенного слоя шаровых частиц (рис. 10-3).

Здесь $Ly = \frac{w_f^3 \rho_c^2}{\mu_c (\rho - \rho_c) g}$ — критерий Лященко;

$Ar = \frac{d^3 \rho_c (\rho - \rho_c) g}{\mu_c^2}$ — критерий Архимеда;

μ_c — вязкость среды, $Pa \cdot c$.

Остальные обозначения прежние.

Если среда — газ, то $\rho \gg \rho_c$ и выражения для критериев Лященко и Архимеда упрощаются:

$$Ly = \frac{w_f^3 \rho_c^2}{\mu_c \rho g} \quad (10-11)$$

$$Ar = \frac{d^3 \rho_c \rho g}{\mu_c^2} \quad (10-12)$$

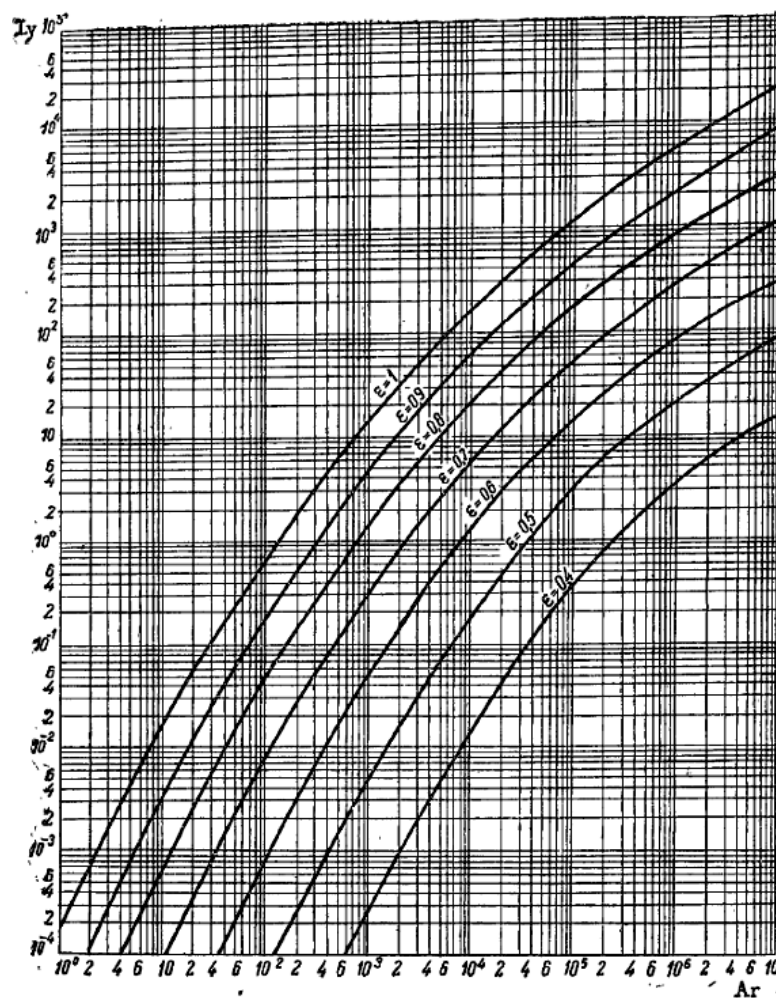


Рис. 10-3. Зависимость критерия Лященко от критерия Архимеда для шаров частиц.

Описание установки (рис. 10-4)

Установка состоит из двух смонтированных на щите стеклянных колонок К1 и К2 внутренним диаметром 4,1,5 мм. В колонке К1 имеются три, а в колонке К2— четыре металлических сетки. На нижних сетках в каждой колонке находятся слои твердых частиц, в колонке К1 — силикагеля или кварцевого песка, в колонке К2 — активного угля.

Воздух, подаваемый вентилятором, проходит через расходомер (реометр) Р и с помощью вентиля В1 и В2 может быть подан под нижнюю сетку либо в колонку К1, либо в колонку К2. Вентиль В3 служит для выпуска воздуха в атмосферу. 1 Падение давления воздуха в той или другой колонке (гидравлическое сопротивление) измеряют дифференциальным манометром (D1 или D2), который через переключатель (П1 или П2) может быть подключен для измерения перепада давления либо в одной нижней секции колонки (положение 1), либо в двух секциях (положение 2), либо во всей колонке (положение 3).

Расход воздуха, проходящего через колонку, определяют по показанию дифманометра D3, присоединенного к реометру Р, и по градуировочному графику реометра.

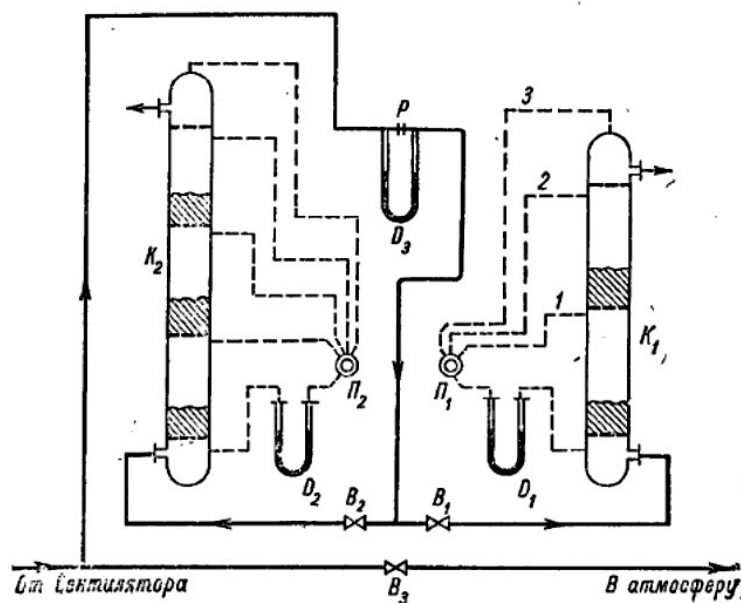


Рис. 10-4. Схема установки

Методика проведения работы

Приступая к работе, закрывают вентили B1 и B2 (см. рис. 10-4) и полностью открывают вентиль B3 на выход воздуха в атмосферу. После этого пускают в ход вентилятор. Открывая впускной вентиль в ту или другую колонку (B1 или B2), устанавливают такой начальный расход воздуха, чтобы показание дифманометра Pе было приблизительно 10 мм вод. ст. Пользуясь переключателем (П1 или П2), измеряют при этом расходе воздуха перепад давления по дифманометру (D1 или D2) в нижней секции колонки — Δp_1 и в двух секциях — Δp_2 . Записав результаты измерений в отчетную таблицу, проводят, в той же последовательности измерения при втором значении расхода воздуха, затем при третьем и так до наибольшего, который дает вентилятор, увеличивая каждый раз расход воздуха на такое значение, чтобы показание дифманометра D3 возрастало приблизительно на 10 мм вод. ст. Когда вентиль (B1 или B2) будет открыт полностью, дальнейшее увеличение расхода воздуха в колонке получают, прикрывая вентиль B3, т. е. уменьшая выпуск воздуха в атмосферу. По окончании работы открывают полностью вентиль B3, закрывают вентиль на колонку (B1 или B2) и останавливают вентилятор.

Обработка опытных данных и составление отчета

Гидравлическое сопротивление каждой секции колонки, которое показывает дифманометр D1 или D2, в действительности представляет собой суммарное сопротивление сетки и собственно слоя (см. рис. 10-1). Но так как сопротивление сетки мало по сравнению с сопротивлением слоя, то падение давления в секции, которое показывает дифманометр, с достаточной точностью может быть приравнено сопротивлению слоя $\Delta p_{сл}$. В том, что сопротивление сетки пренебрежимо мало, можно убедиться, сравнивая показания дифманометра D1 в положении 2 и в положении 3 (см. рис. 10-4). По данным отчетной таблицы строят для каждого из двух слоев график зависимости $\Delta p_{сл}$ от скорости воздуха $wф$ (см. рис. 10-2) и определяют критическую скорость воздуха $w_{кр}$ для данных частиц. Затем вычисляют критерий Лященко для критической скорости

$$Ly = \frac{w_{кр}^3 \rho_c^2}{\mu_c \rho g} \quad (10-13)$$

и по графику (рис. 10-3) находят при $\epsilon=0,4$ соответствующее значение критерия Архимеда, по которому определяют средний диаметр частиц d . Далее по тому же графику находят предельное значение критерия Лященко при $\epsilon = 1$, позволяющее определить

скорость уноса $w_{ун}$ и расход воздуха $V_{ун}$, при котором происходит унос из колонки загруженных в нее твердых частиц. Наконец, по формуле (10-8) определяют вес слоя частиц в каждой секции. Необходимые для расчетов значения плотности и вязкости воздуха берут из табл. VII — см. Приложение.

В отчет о работе должны входить: а) задание; б) схема установки со спецификацией; в) отчетная таблица; г), графики зависимости $\Delta p_{сл.}$ от скорости воздуха д) расчеты диаметра частиц, расхода воздуха $V_{ун}$ и веса слоя $G_{сл.}$

ОТЧЕТНАЯ ТАБЛИЦА

№ по пор.	Показание дифманометра D_1 , мм вод. ст.	Расход воздуха (по графику), $m^3/ч$	Скорость воздуха w_{ϕ} [уравнение (10-1)], м/с	Гидравлическое сопротивление (показание дифманометра D_1 или D_2)				Гидравлическое сопротивление второй секции ($\Delta p_2 - \Delta p_1$)	
				нижней секции Δp_1		двух секций Δp_2			
				мм вод. ст.	Па	мм вод. ст.	Па	мм вод. ст.	Па

Вопросы и задания:

1. Получить экспериментальную зависимость гидравлического сопротивления слоя от фиктивной скорости газа. Определить критическую скорость газа, средний диаметр частиц, вес слоя и скорости уноса.
2. Что такое фиктивная, действительная и критическая скорости газа?
3. Что такое порозность слоя? В каких пределах изменяется порозность взвешенного слоя?
4. Как изменяется с возрастанием фиктивной скорости газа его действительная скорость в неподвижном и взвешенном слоях?
5. Какой характер имеет зависимость порозности слоя от расхода газа?
6. При каком соотношении действующих сил твердые частицы переходят во взвешенное состояние?
7. От чего зависят значения критической скорости и скорости уноса?
8. Почему с увеличением фиктивной скорости воздуха гидравлическое сопротивление неподвижного слоя растет, а взвешенного слоя остается постоянным?
9. Почему критическая скорость воздуха практически не зависит от высоты слоя?
10. При данном расходе воздуха порозность взвешенного слоя будет больше для крупных частиц или для мелких?
11. Как рассчитать гидравлическое сопротивление взвешенного слоя, зная вес неподвижного слоя?
12. Для чего служит реометр?

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и

специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.

2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>

3. Аэров М. Э., Тодес О. М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л., Химия, 1968. 510 с. Аэров М. Э.у Тодес О. М., Наринский Д. А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы. Л., Химия, 1979, 176 с.

Практическая работа №10. Изучение работы циклона

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Очистка промышленных газовых потоков от взвешенных в них твердых частиц может осуществляться, например, путем осаждения твердых частиц под действием различных сил: тяжести, центробежных, электростатических, акустических и др. Одним из наиболее простых и широко распространенных способов очистки газовых потоков от находящихся в них твердых частиц является центробежное разделение таких неоднородных систем. В качестве аппаратов — пылеуловителей, в которых можно осуществить этот способ, используют так называемые циклоны различных конструкций. Процесс разделения неоднородных систем газ — твердые частицы под действием центробежных сил обуславливается разностью плотностей газового потока и твердых частиц, находящихся во вращательном движении. Центробежные силы, возникающие при этом, обеспечивают большую эффективность процесса по сравнению с процессом разделения, проходящим в поле только сил тяжести. Соотношение этих сил называют фактором разделения:

$$\xi = \frac{P_{ц}}{G} \quad (11-1)$$

Здесь $P_{ц}$ — центробежная сила, отбрасывающая твердую частицу из вращающегося газового потока к стенкам циклона

$$P_{ц} = \frac{m\omega^2}{R} \quad (11-2)$$

m — масса твердой частицы, кг;

ω — окружная скорость частицы (условно принимается равной скорости газового потока во входном патрубке циклона), м/с;

R — радиус циклона, м;

$G = mg$ — сила тяжести.

Фактор разделения характеризует увеличение разделяющей способности в условиях действия центробежной силы:

$$f = \frac{\frac{m\omega^2}{R}}{mg} = \frac{\omega^2}{Rg} \quad (11-3) \quad \text{Из}$$

выражения (11-3) видно, что эффективность разделения возрастает с увеличением скорости газового потока и уменьшением радиуса циклона. Однако значительное увеличение скорости связано с резким возрастанием гидравлического сопротивления циклона и усилением местных завихрений, срывающих уже осевшие на внутренней поверхности циклона твердые частицы, что приводит к ухудшению очистки газа. Обычно наиболее эффективными являются скорости газа на входе в циклон в интервале 20—25 м/с. Работа циклона оценивается по совокупности его основных характеристик: 1) эффективности разделения (степени очистки или коэффициента полезного действия) и 2) гидравлического сопротивления (достижение высокой степени очистки при малом гидравлическом сопротивлении). Степень очистки (%) можно рассчитать, зная начальную C_n и конечную C_k концентрации твердых частиц в газовом потоке, проходящем через циклон

$$\eta = \frac{C_n - C_k}{C_n} \cdot 100 \quad (11-4)$$

или

$$\eta = \frac{G_n - G_k}{G_n} \cdot 100 = \frac{G_{ул}}{G_n} \cdot 100 \quad (11-5)$$

где G_n — массовый расход твердых частиц на входе в циклон, кг/с;

G_k — массовый расход твердых частиц на выходе из циклона, кг/с;

$G_{ул} = G_n - G_k$ — массовый расход уловленных твердых частиц, кг/с.

Степень очистки газового потока зависит от размера и плотности твердых частиц, от плотности и вязкости газового потока, от типа циклона и его геометрических размеров и, конечно, от скорости газового потока на входе в циклон,

На рис. 11-1 показана принципиальная схема работы циклона конструкции НИИОГАЗа типа ЦН.

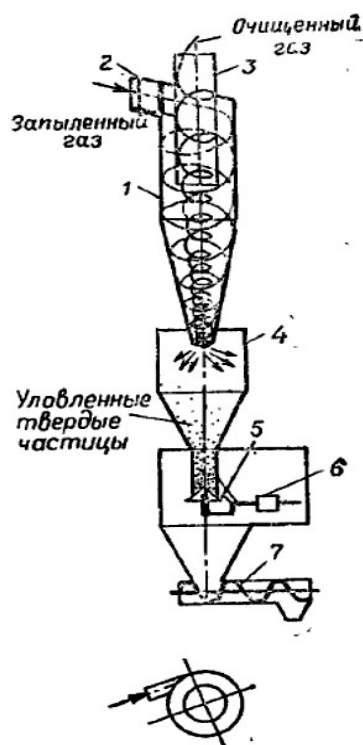


Рис. 11-1. Принципиальная схема действия циклона:

1 — корпус циклона; 2 — входной патрубок; 3 — выхлопная труба; 4 — бункер-сборник уловленных твердых частиц; 5 — клапан пылевого затвора; 6 — рычаг клапана; 7 — шнековый транспортер.

Циклон состоит из цилиндроконического корпуса 1, входного патрубка 2 прямоугольного сечения, встроенного по касательной к окружности цилиндрической части корпуса; выхлопной трубы 3, расположенной по оси циклона. Нижний конец конической части корпуса циклона входит в бункер 4, предназначенный для сбора уловленных твердых частиц, выпускное отверстие которого закрыто клапаном пылевого затвора 5, связанного с рычагом 6. Для непрерывного отвода уловленных твердых частиц служит шнековый транспортер 7. Запыленный воздух входит в циклон через тангенциально встроенный патрубок 2 и, приобретая вращательное движение, опускается спиралеобразно вниз вдоль внутренней поверхности стенок цилиндрической и конической частей корпуса аппарата. Вращаясь вначале в кольцевом пространстве, образованном цилиндрической частью корпуса циклона и выхлопной трубой, а затем в зоне, расположенной ниже торца выхлопной трубы, газовый поток образует внешний вращающийся вихрь. При этом развиваются центробежные силы, под воздействием которых твердые частицы, находящиеся в газовом потоке и обладающие значительно большей плотностью, чем газ, отбрасываются к стенкам корпуса циклона. Движение твердых частиц по внутренней поверхности циклона к бункеру 4 обусловлено не только влиянием силы тяжести, но и воздействием силы давления газового потока, направленного вниз. Достигнув нижнего торца конической части корпуса циклона, твердые частицы поступают в бункер 4. В конической части корпуса циклона газовый поток начинает менять направление и перемещаться вверх к выхлопной трубе, образуя внутренний вращающийся вихрь. Освобожденный от основной массы твердых частиц воздушный поток попадает в выхлопную трубу 3 и, поднимаясь по ней винтообразно вверх, удаляется из циклона.

Оптимальное значение скорости газа на входе в аппарат, обеспечивающей высокую степень очистки, определяют в каждом отдельном случае с учетом свойств разделяемых

неоднородных систем (например, фракционного состава твердой фазы, слипаемости твердых частиц, допустимого уноса твердых частиц и др.), условий работы циклона и его гидравлического сопротивления.

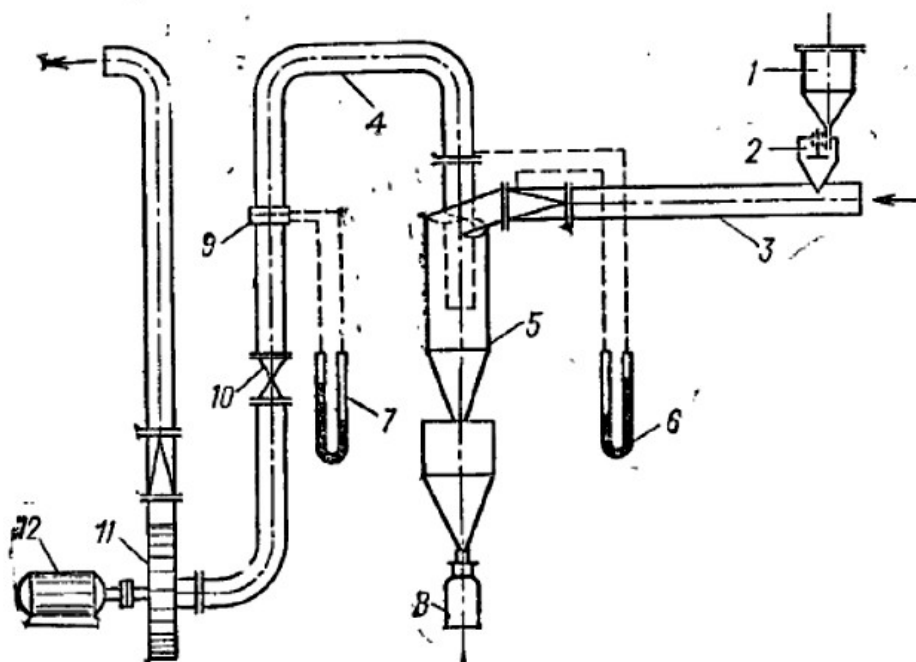


Рис. 11-2. Схема установки:

1 — бункер с твердой фазой; 2 — дозатор твердой фазы; 3 — всасывающая линия (трубопровод); 4 — нагнетательная линия (трубопровод); 5 — циклон; 6, 7 — U-образные дифманометры; 8 — сборник уловленных твердых частиц; 9 — диафрагма; 10 — задвижка; 11 — вентилятор; 12 — электродвигатель.

Общее гидравлическое сопротивление циклона, установленного, как показано на схеме (рис. 11-2), можно представить как сумму потерь давления на преодоление сопротивления трения и местных сопротивлений, а именно: потери давления при входе в циклон; потери давления на преодоление сопротивления трения в корпусе циклона; потери давления при переходе газового потока из внешней зоны циклона большого диаметра во внутреннюю зону (в выхлопную трубу) с поворотом на 180° ; потери давления на преодоление сопротивления трения в выхлопной трубе. Выражая общее гидравлическое сопротивление через динамический напор во входном патрубке и заменяя сумму частных коэффициентов гидравлических сопротивлений общим коэффициентом гидравлического сопротивления циклона $\xi_{\text{ц}}$, получим

$$\Delta p_{\text{ц}} = \zeta_{\text{ц}} \frac{\rho w_{\text{вх}}^2}{2} \quad (11-6)$$

где ρ — плотность газовой среды в рабочих условиях, кг/м³;
 $w_{\text{вх}}$ — скорость газа во входном патрубке, м/с.

Определим

$$w_{\text{вх}} = \frac{V}{f_{\text{вх}}} \quad (11-7)$$

V — расход газа, м³/с;

$f_{\text{вх}}$ — площадь поперечного сечения входного патрубка, м².

При расчете общего гидравлического сопротивления циклона чаще его определяют как функцию условной скорости газа $w_{\text{ц}}$, отнесенной к площади свободного поперечного сечения цилиндрической части корпуса циклона:

$$\Delta p_{\text{ц}} = \zeta'_{\text{ц}} \frac{\rho w_{\text{ц}}^2}{2} \quad (11-8)$$

Условная скорость газа в циклоне, обеспечивающая высокую степень очистки, лежит в пределах $3 \div 3,5$ м/с и рассчитывается по уравнению

$$w_{\text{ц}} = \frac{V}{0,785 D_{\text{ц}}^2} \quad (11-9)$$

где $D_{\text{ц}}$ — диаметр циклона, м.

Значения коэффициентов $\zeta_{\text{ц}}$ и $\zeta'_{\text{ц}}$ зависят от конструктивных особенностей циклонов. Например, для некоторых стандартных циклонов, разработанных головным предприятием НИИОГАЗа, они имеют следующие значения:

Тип циклона ¹	$\zeta_{\text{ц}}$	$\zeta'_{\text{ц}}$
ЦН-15	3,0	105
ЦН-11	2,7	180
ЦН-24	4,8	60

¹ Цифры 15, 11 и 24 указывают, под каким углом к горизонту расположен входной патрубок.

Как отмечено выше, степень улавливания при всех прочих одинаковых условиях зависит от скорости газового потока, а следовательно, и от соотношения $\Delta p_{\text{ц}}/\rho$ [см. формулы (11-6) и (11-8)]. Наилучшие условия очистки запыленного газа обеспечиваются, как показывают данные по эксплуатации циклонов, при значениях $\Delta p_{\text{ц}}/\rho$ в интервале 500—750 м²/с². Выше этих значений будет перерасход энергии при практически постоянной степени очистки η ; ниже этих значений степень очистки циклона будет заметно снижаться.

Описание установки (рис. 11-2)

Твердые частицы из бункера 1 с помощью дозатора 2 поступают в трубопровод 3 и образуют с движущимся в этом трубопроводе воздухом запыленный воздушный поток. Уловленные в циклоне твердые частицы собираются в емкости 8. Циклон (типа ЦН-15) является основным аппаратом в представленной схеме; внутренний диаметр его цилиндрической части 170 мм (входной патрубок имеет размеры 115X-35 мм). Циклон

соединен с вытяжным вентилятором (с электродвигателем 12) системой трубопроводов — входным всасывающим 3 и выходным нагнетательным 4 (относительно циклона). Расход воздуха регулируется задвижкой 10. В качестве измерительных приборов использованы: для определения расхода воздуха — дифференциальный U-образный манометр 7, подключенный к диафрагме 9, для определения гидравлического сопротивления циклона — дифференциальный U-образный манометр 6, подсоединенный на входе в циклон и выходе из него.

Методика проведения эксперимента

Исследование работы циклона проводят в два этапа. В первом этапе определяют гидравлическое сопротивление циклона в зависимости от скорости газового потока; во втором — степень очистки циклона в зависимости от скорости газового потока при постоянной концентрации в нем твердых частиц. В первой части работы исследование проводят на незапыленном воздухе. Включают вентилятор 11 и устанавливают с помощью задвижки 10 необходимый расход воздуха в пределах, заданных преподавателем (6—8 значений расходов). Показания дифманометров 6 и 7 снимают при установленном расходе воздуха одновременно по команде «отсчет» и заносят в отчетную таблицу. Во второй части работы исследование проводят на запыленном воздухе при тех же значениях расходов воздуха, что и в первом этапе исследования. С целью сохранения постоянной концентрации твердых частиц в газовом потоке в каждом опыте расход твердой фазы регулируют дозатором путем изменения частоты вращения тарелки дозатора 2. В качестве твердой фазы для создания запыленного воздуха используют твердый сыпучий материал (например, силикатный катализатор, кварцевый песок) со средним размером частиц 40-60 мкм. Перед началом работы проверяют наличие твердого сыпучего материала в бункере 1, настраивают на необходимый расход твердой фазы дозатор 2, предварительно продувают систему, включив на некоторое время вентилятор, затем освобождают от твердого материала сборник 8. После этого можно считать установку подготовленной к проведению исследований.

Включают вентилятор и с помощью регулирующей задвижки 10 устанавливают нужный расход воздуха. Затем включают в работу одновременно дозатор твердой фазы и секундомер. По мере накопления определенного объема материала в сборнике 8 останавливают дозатор с одновременной отсечкой секундомера. Вентилятор продолжает работать в заданном режиме еще некоторое время (3—5 мин), а затем его останавливают. Твердый материал 1, уловленный из газового потока, за время опыта в сборнике взвешивают на технических весах. После этого приступают к подготовке установки для проведения очередного опыта. (Исследования проводят при 6—8 значениях расхода воздуха). Полученные в каждом опыте данные заносят в отчетную таблицу.

Обработка опытных данных и составление отчета

По экспериментальным данным отчетной таблицы для каждого опыта:

1) определяют расход воздуха (V , м³/ч) по градуировочному графику дифманометра 7;

2) рассчитывают скорость газового потока во входном патрубке циклона $w_{вх}$ и условную скорость газового потока в циклоне $w_{ц}$ по уравнениям (11-7) и (11-9);

3) рассчитывают соответствующие коэффициенты гидравлических сопротивлений ζ и $\zeta'_{ц}$ [уравнения (11-6) и (11-8)];

4) определяют отношение $\Delta p_{ц}/\rho$;

5) находят расход уловленного твердого материала (в кг/с)

$$G_{ул} = \frac{G}{\tau}$$

где G — количество (кг) уловленного твердого материала за время работы дозатора τ (с);

6) рассчитывают степень очистки η [уравнение (11-5)].

В отчет о работе должны быть включены: а) задание; б) схема установки со спецификацией; в) отчетная таблица; г) все перечисленные выше расчеты; д) график зависимости $\Delta p_{ц}$ от скорости воздуха ($\Delta p_{ц} — w_{ц}$ или $\Delta p_{ц} — w_{вх}$); е) график зависимости $\eta — \frac{\Delta p_{ц}}{\rho}$ (из графика определить оптимальную скорость воздуха, соответствующую высокой степени очистки при малом гидравлическом сопротивлении циклона, см. рис. 11-3, точка А).

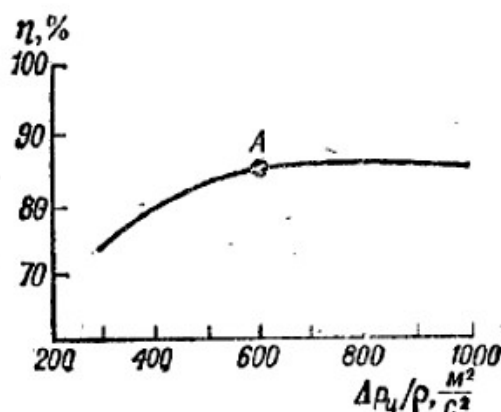


Рис. 11.3. Зависимость степени очистки η циклона от отношения $\Delta p_{ц}/\rho$.

[illegible]

123, 999

[illegible]

ମାତ୍ର ୧ ୫ ୫

[illegible]

Вопросы и задания:

1. Провести испытания, заполнить таблицу.
2. Какие системы в гидромеханике называют неоднородными?
3. Что такое пыль?
4. Какие аппараты применяют для улавливания пыли?
5. Как устроен циклон?
6. За счет чего в циклоне возникает центробежная, сила?
7. Что такое фактор разделения?
8. Как влияют диаметр циклона и скорость газового потока на его разделяющую способность?
9. С какой целью в промышленной практике прибегают к применению батарейных циклонов?
10. Что называют степенью очистки или коэффициентом полезного действия циклона?
11. Как определить концентрацию твердых частиц в газовом потоке на выходе из циклона и количество унесенной твердой фазы?
12. Что понимают под гидравлическим сопротивлением циклона, как его рассчитывают и какие факторы влияют на него?
13. Как рассчитать коэффициент гидравлического сопротивления циклона?
14. Указать последовательность действий при пуске и остановке экспериментальной установки.

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». – 2-е изд., испр. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. – 608 с.

Практическая работа №11. Изучение процесса теплоотдачи в кожухотрубном теплообменнике

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Кожухотрубные теплообменники относятся к наиболее распространенным производственным теплообменным аппаратам. Кожухотрубный теплообменник состоит из пучка трубок, концы которых закреплены в трубных решетках, наружного корпуса и двух крышек (рис. 16-1). Назначение теплообменника — передача теплоты от одного вещества, проходящего по трубному (или межтрубному) пространству теплообменника, к другому веществу, проходящему по межтрубному (или трубному) пространству. В данной работе изучают передачу теплоты в кожухотрубном теплообменнике при нагревании в нем атмосферного воздуха греющим водяным паром (насыщенным), поступающим по паропроводу из котельной. Рассмотрим переход теплоты от пара, конденсирующегося в межтрубном пространстве, через стенку трубки к воздуху, проходящему по трубке (рис. 16-2). Давление пара постоянно во времени и практически одинаково в любом месте межтрубного пространства, следовательно, везде вдоль поверхности трубки будет одинакова и температура конденсирующегося пара T . Температура воздуха вдоль поверхности трубки будет меняться, так как воздух, проходя по трубке, нагревается. Выделим в некотором месте трубки бесконечно малый кольцевой участок поверхности dF . Пусть в этом месте температура воздуха внутри трубки будет t .

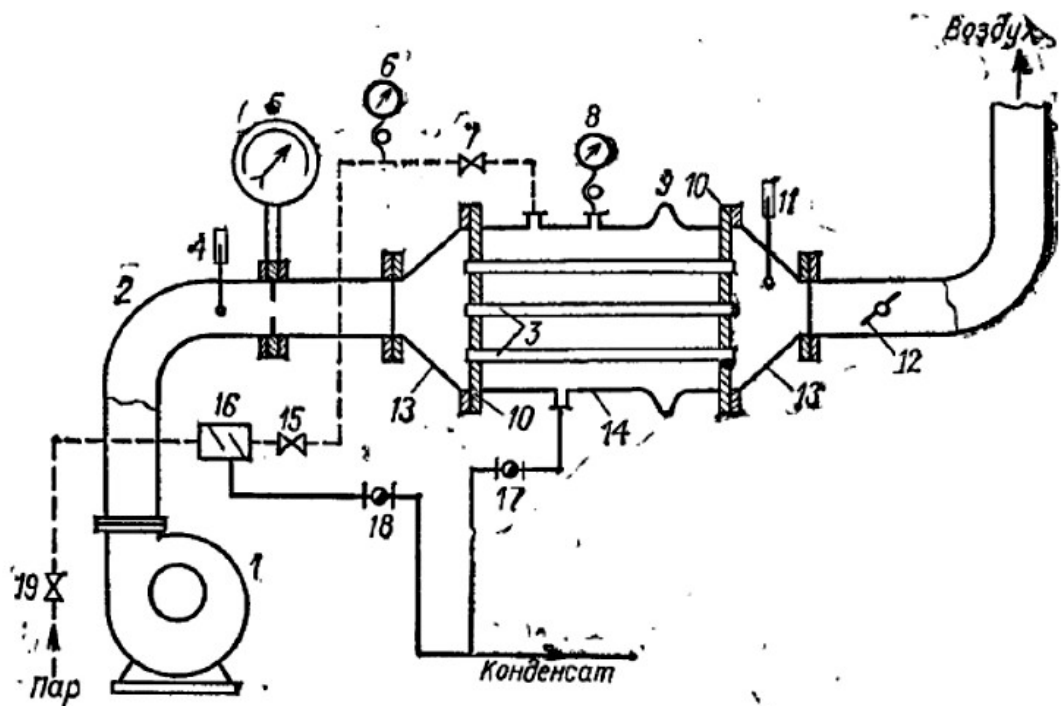


Рис. 16-1. Схема установки:

1—вентилятор; 2—трубопровод; 3—трубки; 4, 11—термометры; 5—расходомер; 6, 8—манометры; 7, 15, 19—вентили; 9—линзовый компенсатор; 10—трубные решетки; 12—заслонка; 13—крышки; 14—корпус; 16—водоотделитель; 17, 18—конденсатоотводчики.

Тогда для установившегося процесса перехода теплоты через участок поверхности dF (m^2) можно написать следующие уравнения:

1. Уравнение теплоотдачи — перехода теплоты от конденсирующегося пара к наружной поверхности трубки:

$$dQ = \frac{T - t_{ст. н}}{r_n} dF \quad (16-1)$$

2. Уравнение теплопроводности — перехода теплоты через стенку трубки:

$$dQ = \frac{t_{ст. н} - t_{ст. вн}}{r_{ст}} dF \quad (16-2)$$

3. Уравнение теплоотдачи — перехода теплоты от внутренней поверхности трубки к воздуху:

$$dQ = \frac{t_{ст. вн} - t}{r_v} dF \quad (16-3)$$

В этих уравнениях:

dQ — расход теплоты, переходящей от пара к воздуху, Вт;

$t_{\text{ст. н}}$ и $t_{\text{ст. вн}}$ — температуры наружной и внутренней поверхности стенки трубки на этом участке, °C;

$r_{\text{п}}$ — термическое сопротивление при переходе теплоты от конденсирующегося пара к наружной поверхности трубки, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

$r_{\text{ст}}$ — то же при переходе теплоты через стенку трубки;

$r_{\text{в}}$ — то же при переходе теплоты от внутренней поверхности трубки к воздуху;

Уравнения (16-1) — (16-3) показывают, что расход теплоты прямо пропорционален движущей силе — разности температур и обратно пропорционален термическому сопротивлению.

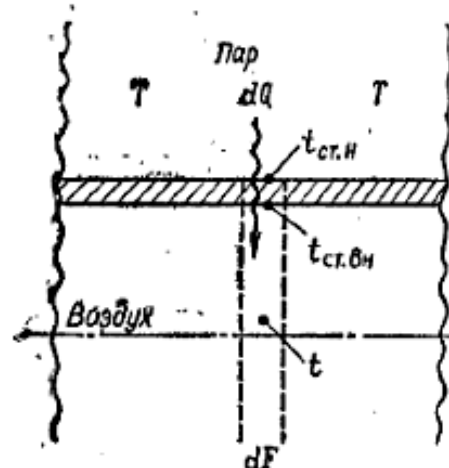


Рис. 16-2. Схема процесса теплопередачи.

Каждое из этих трех односторонних уравнений описывает переход количества теплоты dQ на отдельном отрезке его пути от конденсирующегося пара к воздуху.

Поверхность dF во всех трех уравнениях принята одинаковой, т. е. на рассматриваемом участке стенка трубки считается плоской, что допустимо для тонкостенной трубки, когда толщина стенки мала по сравнению с диаметром.

После преобразований из уравнений (16-1) — (16-3) получаем уравнение, описывающее переход количества теплоты dQ не на отдельном отрезке, а на всем его пути от пара к воздуху

$$dQ = \frac{T - t}{r_{\text{п}} + r_{\text{ст}} + r_{\text{в}}} dF = \frac{T - t}{R} dF \quad (16-4)$$

где $R = r_{\text{п}} + r_{\text{ст}} + r_{\text{в}}$ — общее термическое сопротивление при переходе теплоты от конденсирующегося пара к воздуху через стенку трубки.

При расчетах вместо термических сопротивлений $r_{\text{п}}$ и $r_{\text{в}}$ пользуются обратными величинами

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{1}{r_{\text{п}}} \quad \text{и} \quad \alpha_{\text{в}} = \frac{1}{r_{\text{в}}}$$

которые называются коэффициентами теплоотдачи [$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$] соответственно для пара и воздуха.

При этом уравнения теплоотдачи (16-1) и (16-3) получают вид:

$$dQ = \alpha_{\text{п}} (T - t_{\text{ст. н}}) dF \quad (16-5)$$

$$dQ = \alpha_{\text{в}} (t_{\text{ст. вн}} - t) dF \quad (16-6)$$

Величину, обратную общему термическому сопротивлению R

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{п}}} + r_{\text{ст}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}} \quad (16-7)$$

называют коэффициентом теплопередачи, а преобразованное уравнение (16-4)

$$dQ = K (T - t) dF \quad (16-8)$$

— уравнением теплопередачи. Понятия теплоотдача и теплопередача следует четко различать.

Для всего теплообменника с поверхностью теплопередачи $F \text{ м}^2$, в котором расход передаваемой теплоты составляет $Q \text{ Вт}$, интегрирование уравнения (16-8) приводит к уравнению теплопередачи следующего вида

$$Q = K \Delta t_{\text{ср}} F \quad (16-9)$$

где $\Delta t_{\text{ср}}$ — средняя движущая сила процесса теплопередачи, т. е. средняя разность температур пара и воздуха в теплообменнике, определяемая теоретическим уравнением:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{нач}} - \Delta t_{\text{кон}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\text{нач}}}{\Delta t_{\text{кон}}}} \quad (16-10)$$

Здесь $\Delta t_{\text{нач}} = T - t_{\text{нач}}$ — разность температур пара и воздуха на входе воздуха в теплообменник;

$\Delta t_{\text{кон}} = T - t_{\text{кон}}$ — то же на выходе воздуха из теплообменника.

Если отношение $\Delta t_{\text{нач}}/\Delta t_{\text{кон}} \leq 2$, то с достаточной точностью (ошибка менее 5%) расчет $\Delta t_{\text{ср}}$ можно вести по более простой формуле:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{нач}} + \Delta t_{\text{кон}}}{2} \quad (16-11)$$

Расход теплоты Q в уравнении (16-9) легко рассчитать, если известен расход воздуха

$$Q = Gc (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}) \quad (16-12)$$

где G — массовый расход воздуха, кг/с ;

c — средняя теплоемкость воздуха (при постоянном давлении), $\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

При переходе теплоты от конденсирующегося водяного пара к воздуху коэффициент теплоотдачи для воздуха $\alpha_{\text{в}}$ во много раз меньше коэффициента теплоотдачи для пара $\alpha_{\text{п}}$. Термическое сопротивление стенки латунной трубки теплообменника $r_{\text{ст}}$ также во много раз меньше термического сопротивления $1/\alpha_{\text{в}}$.

Таким образом, $1/\alpha_{\text{п}} + r_{\text{ст}} \ll 1/\alpha_{\text{в}}$ и в знаменателе уравнения (16-7) величиной $(1/\alpha_{\text{п}} + r_{\text{ст}})$ можно пренебречь. Тогда из этого уравнения получаем

$$K = \alpha_{\text{в}} \quad (16-13)$$

Теория процесса теплоотдачи — перехода теплоты от стенки к протекающей среде (или наоборот) — приводит к уравнению, связывающему между собой обобщенные безразмерные переменные, характеризующие процесс, так называемые критерии подобия.

Для развитого турбулентного течения газов по трубам, когда значение критерия $Re \geq 10\,000$ (о критерии Рейнольдса см.

работу 1), это уравнение имеет вид:

$$Nu = C Re^m \quad (16-14)$$

где $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ — критерий Нуссельта;

$Re = \frac{w d \rho}{\mu}$ — критерий Рейнольдса;

C и m — безразмерные постоянные, определяемые опытным путем;

α — коэффициент теплоотдачи для газа, Вт/(м²·К);

d — внутренний диаметр трубки, м;

λ — коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К);

w — скорость газа, м/с;

ρ — плотность газа, кг/м³;

μ — динамический коэффициент вязкости газа, Па·с.

Критерий Рейнольдса можно привести к более удобному для расчетов виду, если подставить в него выражение для скорости газа (м/с) в трубках

$$w = \frac{V}{0,785nd^2} \quad (16-15)$$

и его массового расхода (кг/с)

$$G = V\rho \quad (16-16)$$

После чего получаем

$$Re = \frac{w d \rho}{\mu} = \frac{G}{0,785n d \mu} \quad (16-17)$$

где V — объемный расход газа, проходящего по трубкам теплообменника, м³/с;

n — число трубок.

Описание установки (рис. 16-1)

Вентилятор 1 по трубопроводу 2 подает воздух в трубки 3 кожухотрубного теплообменника, в котором воздух нагревается, после чего он уходит в вентиляционный канал. Расход воздуха можно изменять поворотной заслонкой 12. В трубопроводе перед теплообменником установлен расходомер 5 — нормальная диафрагма с поплавковым дифференциальным манометром, шкала которого проградуирована в метрах кубических в час. Температуры воздуха, входящего в теплообменник и выходящего из него, измеряют термометрами 4 и 11. Кожухотрубный теплообменник изготовлен из латунных трубок диаметром 25X2,5 мм, заключенных в стальной корпус. Число трубок 31, рабочая длина каждой трубки 800 мм. Поверхность теплообмена (суммарная боковая поверхность всех трубок) составляет 1,56 м². В связи с тем, что корпус и трубки теплообменника выполнены из металлов с разными коэффициентами линейного расширения, корпус теплообменника снабжен линзовым компенсатором 9 для устранения температурных напряжений. Снаружи теплообменник покрыт слоем теплоизоляции. Греющий пар, поступающий по паропроводу из котельной, проходит через водоотделитель 16, где отделяется конденсат, образовавшийся в паропроводе. Осушенный пар направляется в межтрубное пространство теплообменника и конденсируется там при постоянном давлении, отдавая теплоту воздуху, проходящему по трубам. Давление пара в паропроводе (избыточное) показывает манометр 6. Давление пара в межтрубном пространстве регулируют вентилем 7 и измеряют манометром 8. Конденсат греющего пара из межтрубного пространства и из водоотделителя 16 отводится через конденсатоотводчики (конденсационные горшки) 17 и 18, не пропускающие пар, а пропускающие только конденсат, который возвращается в котельную. Продувка

межтрубного пространства теплообменника (отвод воздуха) производится через байпас (обводную линию) конденсационного горшка.

Методика проведения работы

Ознакомившись с установкой и с инструкцией по работе и получив задание от преподавателя, пускают вентилятор и устанавливают заслонкой 12 максимальный расход воздуха. Открыв полностью вентили 15 и 19 на паропроводе 1, продувают паром межтрубное пространство теплообменника и конденсационный горшок 17, открывая слегка вентиль 7. При этом необходимо следить, чтобы давление пара в межтрубном пространстве не превышало 0,1 МПа по манометру 8. Затем устанавливают по этому манометру заданное преподавателем давление греющего пара в межтрубном пространстве. В дальнейшем в течение всей работы это давление необходимо поддерживать строго постоянным, так как по его значению определяют по табл. IV (см. Приложение) температуру насыщенного пара T . Через 5 мин записывают температуры воздуха — показания термометров 4 и 11. После этого, переставив заслонку 12, переходят на следующий меньший расход воздуха. Через 5 мин снова записывают показания термометров и т.д. Таким путем получают данные о температурах воздуха до и после теплообменника для шести расходов воздуха. Чтобы сохранить развитый турбулентный режим течения воздуха в трубках теплообменника ($Re \geq 10000$), наименьший расход воздуха не должен быть ниже 300 мЗ/ч.

Обработка опытных данных и составление отчета

Полученные экспериментальные и расчетные данные записывают в отчетную таблицу. Необходимые для расчетов данные о физических свойствах насыщенного водяного пара и воздуха берут из табл. IV и VII — см. Приложение (там же см. табл. IX)

Для определения констант C и m в уравнении (16-14) строят на миллиметровой бумаге график, откладывая по оси абсцисс $\lg Re$, а по оси ординат — $\lg Nu$. Через экспериментальные точки проводят прямую линию, уравнение которой в соответствии с (16-14) будет:

$$\lg Nu = m \lg Re + \lg C \quad (16-18)$$

Далее определяют по этому графику m — угловой коэффициент прямой, после чего, взяв на прямой любую точку, находят для нее $\lg C = \lg Nu - m \lg Re$ и затем — значение C .

Отчет о выполненной работе должен включать: а) задание; б) схему установки со спецификацией; в) отчетную таблицу; г) расчеты всех табличных величин для одного из расходов воздуха; д) график зависимости $\lg Nu$ от $\lg Re$; е) определение значений постоянных m и C .

ОТЧЕТНАЯ ТАБЛИЦА

Давление греющего пара $p_{\text{изб}} = \dots$ кгс/см². Температура пара $T = \dots$ °С.

№ по пор.	Наименование величины	1	2	3	4	5	Примечание
-----------	-----------------------	---	---	---	---	---	------------

Экспериментальные данные

1	Расход воздуха V , м ³ /ч						
2	Температура воздуха до теплообменника $t_{\text{нач}}$, °С						
3	Температура воздуха после теплообменника $t_{\text{кон}}$, °С						

Расчетные данные

4	Массовый расход воздуха G , кг/с						Плотность воздуха ρ при температуре $t_{\text{нач}}$
5	Скорость воздуха в трубках w , м/с						
6	Начальная разность температур $\Delta t_{\text{нач}}$, К						
7	Конечная разность температур $\Delta t_{\text{кон}}$, К						
8	Средняя разность температур $\Delta t_{\text{ср}}$, К						
9	Средняя температура воздуха в теплообменнике $t_{\text{ср}}$, °С						См. работу 15 (стр. 125)
10	Расход теплоты на нагрев воздуха Q , Вт						Теплоемкость воздуха при температуре $t_{\text{ср}}$
11	Коэффициент теплопередачи K , Вт/(м ² · К)						
12	Критерий Нуссельта Nu						Коэффициент теплопроводности воздуха λ при $t_{\text{ср}}$
13	Критерий Рейнольдса Re						Вязкость воздуха μ при $t_{\text{ср}}$
14	$\lg Nu$						
15	$\lg Re$						

Вопросы и задания:

1. Получение по экспериментальным данным зависимости критерия Нуссельта от критерия Рейнольдса и определение констант C и m в критериальном уравнении (16-14).
2. Из каких основных частей состоит кожухотрубный теплообменник?
3. Чем отличается по физическому смыслу коэффициент теплопередачи от коэффициента теплоотдачи?
4. Может ли в каком-либо теплообменнике коэффициент теплопередачи быть больше любого из коэффициентов теплоотдачи?
5. Для чего служит линзовый компенсатор?
6. При развитом турбулентном течении воздуха по трубе ($t = 0,8$), как зависит коэффициент теплоотдачи от диаметра трубы?
7. Для чего служит диафрагма с поплавковым дифманометром? Как устроен поплавокый дифманометр?
8. Разность каких температур входит в уравнение теплоотдачи и каких — в уравнение теплопередачи?
9. Каково назначение конденсационного горшка, как он работает?
10. На каком основании в данной работе коэффициент теплоотдачи для воздуха приравнивается коэффициенту теплопередачи?
11. Как определяют температуру конденсации греющего пара?

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / [Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Барабаш и др.] / [под ред. Г. М. Островского], Ч.1. – СПб. : Проффессионал, 2004. – 848 с.

Практическая работа №12. Изучение процесса ректификации и его компьютерное моделирование

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

В химической, нефтеперерабатывающей, пищевой и других отраслях промышленности для разделения жидких смесей на технически чистые продукты широко применяют ректификацию. Этот процесс основан на различной летучести составляющих смесь компонентов, т. е. на различии в температурах кипения компонентов при одинаковом давлении. Процесс ректификации осуществляют в противоточных аппаратах, называемых ректификационными колоннами. Наибольшее распространение в промышленности получили тарельчатые ректификационные колонны с колпачковыми, ситчатыми и провальными тарелками. Через ректификационную колонну противотоком — навстречу друг другу — проходят неравновесные по составу потоки пара и жидкости. Поток пара идет в колонне снизу вверх, жидкость стекает сверху вниз. На каждой тарелке колонны пар и жидкость вступают в контакт. Вследствие отсутствия равновесия между жидкостью и паром на тарелке возникает между ними процесс массообмена (обмена компонентами), в результате которого составы пара и жидкости изменяются, приближаясь к равновесным. Пар становится богаче более летучим (низкокипящим) компонентом, а жидкость — менее летучим (высокипящим). В тарельчатых ректификационных колоннах контакт и массообмен между паром и жидкостью осуществляются во время барботажа — прохождения пузырьков и струек пара через слой жидкости на тарелке. На колпачковых тарелках барботаж происходит по периметру колпачков, края которых имеют зубцы или прорези для раздробления потока пара на отдельные мелкие паровые струйки.

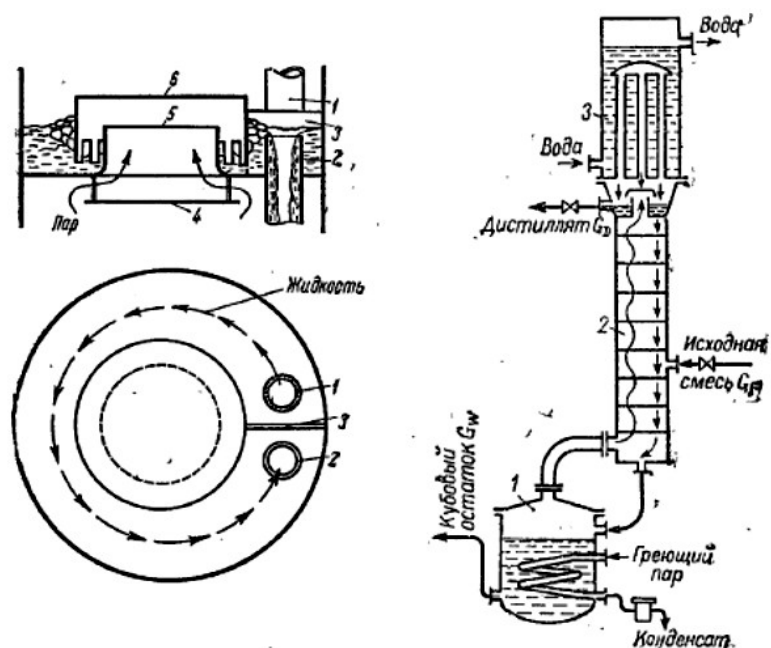


Рис. 18-1. Одноколпачковая тарелка:

1, 2 — перегочные трубы; 3 — перегородка; 4 — отбойник; 5 — патрубок для пара; 6 — колпачок.

Рис. 18-2. Схема ректификационной колонны:

1 — куб-испаритель; 2 — колонна; 3 — дефлегматор.

На рис. 18-1 показана одноколпачковая тарелка лабораторной колонны для разделения бинарной смеси этиловый спирт — вода. В результате происходящего на тарелках обмена компонентами поток пара, поднимаясь вверх по колонне, все более обогащается спиртом, а поток жидкости, стекая по тарелкам вниз, все более им обедняется. Пар, поступающий в ректификационную колонну под ее нижнюю тарелку (рис. 18-2), имеет малую концентрацию спирта. Этот пар идет в колонну из куба-испарителя, где он образуется при кипении бедной спиртом жидкости, стекающей в куб-испаритель с нижней тарелки колонны. С верхней тарелки колонны пар с высокой концентрацией спирта уходит в расположенный над колонной конденсатор (дефлегматор), в котором он полностью конденсируется. Часть образовавшегося конденсата — жидкости с высокой концентрацией спирта — поступает на верхнюю тарелку колонны и далее стекает по тарелкам вниз. Эту жидкость называют флегмой. Остальную жидкость из дефлегматора отбирают в качестве верхнего продукта разделения — дистиллята G_D . На одну из тарелок в средней части колонны непрерывно подают на разделение исходную бинарную смесь (питание) G_F , а из куба-испарителя отбирают часть поступающей в него бедной спиртом жидкости в качестве нижнего продукта разделения — кубового остатка G_W . Таким образом, в ректификационной колонне осуществляется непрерывный процесс разделения подаваемой в колонну исходной смеси G_F на дистиллят G_D с высоким содержанием спирта и кубовый остаток G_W с малой его концентрацией. Концентрации получаемых продуктов разделения зависят от числа тарелок в колонне и от режима ее работы. Для того чтобы в кубе-испарителе происходило непрерывное кипение жидкости, его обогревают греющим паром, конденсирующимся в змеевике, а дефлегматор, в котором конденсируется пар с большим содержанием спирта, охлаждают водой. Ректификационная установка связана с электронной вычислительной машиной УМ-1Н-ХМ, находящейся в другом помещении. На промышленных предприятиях задачей ЭВМ, связанных с ректификационными колоннами, является управление их работой. При возможных в производственных условиях нарушениях режима работы колонны (например, при изменении состава или расхода питания, при необходимости изменения состава продуктов ректификации и др.) ЭВМ очень быстро (за доли секунды) производит все необходимые расчеты и дает команду соответствующим автоматическим устройствам

осуществить те или иные действия, как-то: изменить расход флегмы, подать питание на другую тарелку, изменить подачу греющего пара и т. д. Такая автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП) сложна и требует оснащения ректификационной установки многими контрольно-измерительными и регулирующими приборами. В данной лабораторной установке ЭВМ используется для работы только в информационном режиме и в режиме «помощника оператора».

При работе в информационном режиме ЭВМ осуществляет сбор, преобразование и регистрацию информации о течении процесса ректификации в колонне. Для этого на каждой из 8 тарелок лабораторной ректификационной колонны в жидкость, находящуюся на тарелке, погружен датчик, представляющий собой полу проводниковый термометр сопротивления с резко выраженной зависимостью сопротивления от температуры. Так как электрические сигналы, поступающие от датчиков, очень слабы, то перед вводом в ЭВМ их необходимо усилить, для чего служит специальный «Блок усиления», который обеспечивает ввод в ЭВМ значений температур в виде напряжений постоянного тока в пределах от -5 до 5 В с визуальным контролем этих напряжений на пульте. Измерение температур жидкости на тарелках производится с ошибкой не более $\pm 0,2$ °С. ЭВМ, получив соответствующие сигналы от «Блока усиления», рассчитывает по имеющейся зависимости температура — состав значения концентраций спирта на каждой тарелке колонны, т. е. дает информацию о полях температур и концентраций в колонне. Работа ЭВМ в информационном режиме может существенно облегчить проведение экспериментальных исследований, так как дает практически мгновенную информацию о протекании процесса ректификации в колонне при изменении того или иного параметра ее работы. При работе в режиме «помощника оператора» ЭВМ по заданной математической модели процесса ректификации производит расчет поля концентраций в колонне и составов дистиллята и кубового остатка, если известны расходы исходной смеси, флегмы, дистиллята и состав питания. При необходимости перейти на другие условия разделения это помогает оператору быстро установить основные характеристики нового режима работы.

Математическая модель процесса ректификации представляет собой систему уравнений, описывающих этот процесс, и включает следующие зависимости:

1) Общее уравнение материального баланса колонны по легколетучему компоненту (спирту):

$$G_F x_F = G_D x_D + G_W x_W \quad (18-1)$$

Обозначения см. рис. 18-3.

2) Уравнение материального баланса куба колонны

$$G_L^* x_1 = G_W x_W + G_V y^*(x_W) \quad (18-2)$$

где $y^*(x_W)$ — концентрация пара, равновесного с кипящей в кубе жидкостью.

3) Уравнение материального баланса тарелок нижней (исчерпывающей) и верхней (укрепляющей) частей колонны:

$$G_L (x_{i+1} - x_i) = G_V (y_i - y_{i-1}) \quad (18-3)$$

При работе в информационном режиме ЭВМ осуществляет сбор, преобразование и регистрацию информации о течении процесса ректификации в колонне. Для этого на каждой из 8 тарелок лабораторной ректификационной колонны в жидкость, находящуюся на тарелке, погружен датчик, представляющий собой полупроводниковый термометр сопротивления с резко выраженной зависимостью сопротивления от температуры. Так как электрические сигналы, поступающие от датчиков, очень слабы, то перед вводом в ЭВМ их необходимо усилить, для чего служит специальный «Блок усиления», который обеспечивает ввод в ЭВМ значений температур в виде напряжений постоянного тока в пределах от -5 до 5 В с визуальным контролем этих напряжений на пульте. Измерение температур жидкости на тарелках производится с ошибкой не более $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

ЭВМ, получив соответствующие сигналы от «Блока усиления», рассчитывает по имеющейся зависимости температура — состав значения концентраций спирта на каждой тарелке колонны, т. е. дает информацию о полях температур и концентраций в колонне. Работа ЭВМ в информационном режиме может существенно облегчить проведение экспериментальных исследований, так как дает практически мгновенную информацию о протекании процесса ректификации в колонне при изменении того или иного параметра ее работы.

При работе в режиме «помощника оператора» ЭВМ по заданной математической модели процесса ректификации производит расчет поля концентраций в колонне и составов дистиллята и кубового остатка, если известны расходы исходной смеси, флегмы, дистиллята и состав питания. При необходимости перейти на другие условия разделения это помогает оператору быстро установить основные характеристики нового режима работы.

Математическая модель процесса ректификации представляет собой систему уравнений, описывающих этот процесс, и включает следующие зависимости:

1) Общее уравнение материального баланса колонны по легколетучему компоненту (спирту):

$$G_F x_F = G_D x_D + G_W x_W \quad (18-1)$$

Обозначения см. рис. 18-3.

2) Уравнение материального баланса куба колонны

$$G_L^* x_1 = G_W x_W + G_V y^*(x_W) \quad (18-2)$$

где $y^*(x_W)$ — концентрация пара, равновесного с кипящей в кубе жидкостью.

3) Уравнение материального баланса тарелок нижней (исчерпывающей) и верхней (укрепляющей) частей колонны:

$$G_L (x_{i+1} - x_i) = G_V (y_i - y_{i-1}) \quad (18-3)$$

145

Алгоритм (последовательность логических и математических операций), используемый в этой работе при решении системы уравнений (18-1) — (18-8), предусматривает потарелочный расчет концентраций спирта в жидкости и паре, а также концентраций кубового остатка и дистиллята. Этот расчет проводится методом последовательных приближений, так как в начале расчета неизвестны составы кубового остатка и дистиллята. Работа ЭВМ по такому алгоритму представлена на блок-схеме (рис. 18-4).

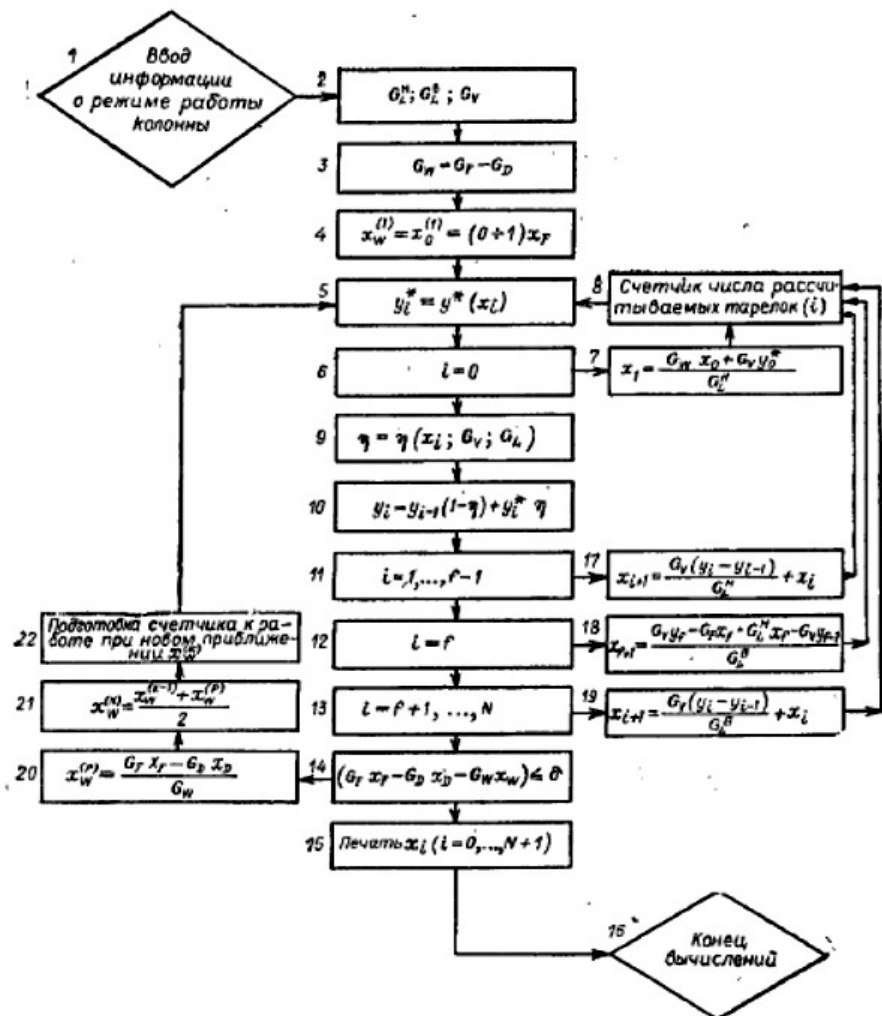


Рис. 18-4. Блок схема расчета процесса ректификации.

При некотором, принятом произвольно, значении концентрации спирта в кубе x (оператор 4) проводят расчет всей колонны до получения концентрации спирта в дистилляте (операторы от 8 до 19). После этого рассчитывают материальный баланс колонны и проверяют сходимость этого баланса (оператор 14); если расчет материального баланса [уравнение (18-1)] не удовлетворяет заданной точности, то всю процедуру расчета повторяют при новом значении концентрации кубового остатка $x(k)$ (операторы от 20 до 22). Для получения надежных результатов математическая модель, запрограммированная в машине, должна быть адекватна реальному процессу, т. е. должна достаточно точно описывать этот процесс. Проверка адекватности математической модели процесса ректификации является одной из задач данной работы.

Описание установки (рис. 18-5)

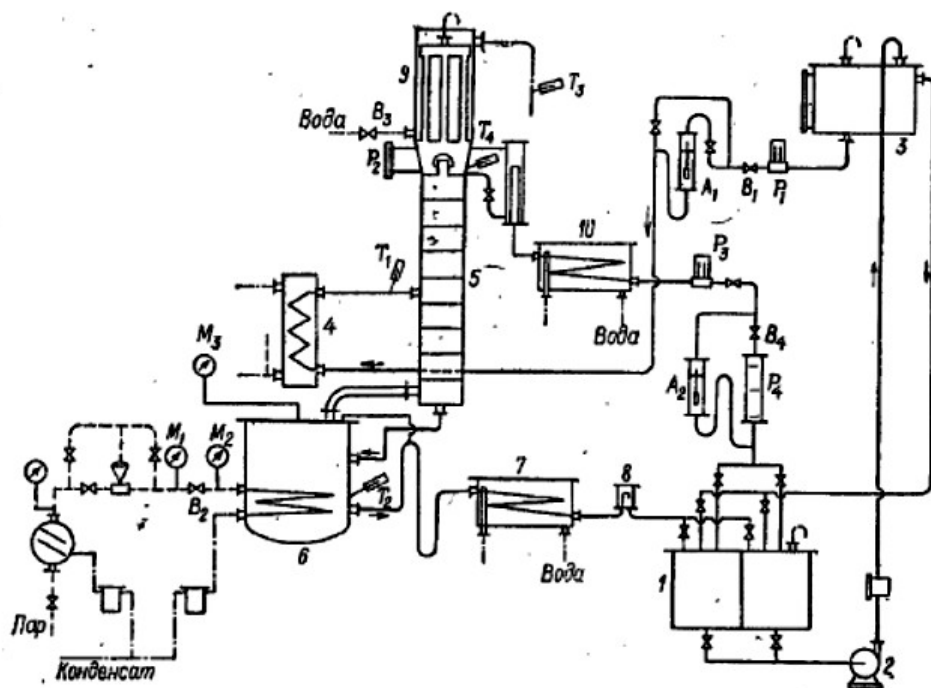


Рис. 18-5. Схема установки:

1—сборник-хранилище; 2—насос; 3—напорный бак; 4—подогреватель; 5—ректификационная колонна; 6—куб-испаритель; 7, 10—холодильники; 8—смотровой фонарь; 9—дефлегматор.

Исходная смесь (этиловый спирт — вода) хранится в одном из отсеков сборника-хранилища 1. Его второй отсек служит сборником дистиллята и кубовой жидкости, получаемых в ходе работы. Вместимость каждого отсека достаточна для проведения одного испытания установки. Отсеки работают попеременно. Исходная смесь подается насосом 2 через фильтр в напорный бак 5. Он имеет запорную трубу, не допускающую переполнения бака. При включенном насосе запорная труба обеспечивает постоянный уровень жидкости в баке 3 и, следовательно, равномерную подачу исходной смеси в колонну. Из напорного бака 3 исходная смесь поступает самотеком через расходомер P1, регулирующий вентиль B1, ареометр-спиртомер A1 и подогреватель 4 в ректификационную колонну 5. Расходомер P1 представляет собой прибор дроссельного типа — реометр. Так как показания ареометра-спиртомера надежны лишь в неподвижной жидкости, то основной поток питания направляется через верхнюю линию с вентилем и только незначительная часть потока — через стакан с ареометром, что обеспечивает достаточно надежное измерение концентрации спирта при одновременной смене жидкости в стакане ареометра. Исходная смесь подогревается в подогревателе 4 горячей водой. Температуру исходной смеси после подогрева показывает термометр T1. В ректификационную колонну 5 подогретая исходная смесь поступает на пятую тарелку, считая сверху. Колонна имеет всего восемь одноколпачковых тарелок (см. рис. 18-1). Диаметр колонны 150 мм. Расстояние между тарелками 200 мм. Для визуального наблюдения за процессом барботаж над второй сверху тарелкой имеется смотровое окно. С нижней тарелки колонны жидкость стекает в выносной куб-испаритель 6, имеющий внутри змеевик, обогреваемый греющим паром из котельной. Перед поступлением в змеевик греющий пар проходит через водоотделитель и регулятор давления. Конденсат, греющего пара из змеевика и водоотделителя отводится через конденсатоотводчик (конденсационные горшки) и возвращается в котельную. Давление греющего пара в паропроводе и в змеевике определяют по манометрам M1 и M2. Температуру жидкости в кубе-испарителе определяет по термометру T2. Давление пара над жидкостью, кипящей в кубе-испарителе, показывает напорометр — чувствительный мембранный манометр M3, по показаниям которого регулируют интенсивность кипения жидкости в кубе-испарителе, изменяя паровым вентилем B2 давление греющего пара в змеевике. Отвод кубового

остатка из куба-испарителя осуществляется через гидравлический затвор, обеспечивающий постоянство уровня кипящей жидкости в кубе-испарителе. Уходящий из куба-испарителя горячий кубовый остаток проходит через водяной холодильник 7, смотровой фонарь 8 и возвращается в сборник 1. Сборник 1, бак 3 и трубное пространство дефлегматора 9 сообщены с атмосферой воздушниками, что обеспечивает работу колонны под атмосферным давлением. Во избежание потери паров спирта все воздушники пропущены через добавочный водяной холодильник (на схеме не показан). С верхней тарелки колонны пар, богатый спиртом, поступает в трубное пространство дефлегматора 9, который охлаждается водой, подаваемой в межтрубное пространство. Подачу воды регулируют вентилем В3. Температуру воды, выходящей из дефлегматора, показывает термометр Т3. Жидкость, образовавшаяся в трубах дефлегматора после полной конденсации пара, стекает в нижнюю коническую часть дефлегматора. Температуру этой жидкости измеряют термометром Т4. Часть этой жидкости (флегмы) вытекает через калиброванное отверстие в дне дефлегматора и поступает на орошение колонны. Для измерения расхода стекающей в колонну флегмы установлен расходомер Р2, действие которого основано на существовании определенной зависимости между уровнем жидкости в сосуде и расходом жидкости, вытекающей через отверстие в дне сосуда. Шкала расходомера Р2 проградуирована непосредственно в единицах расхода (л/мин). Остальная жидкость из дефлегматора отводится в качестве верхнего продукта колонны — дистиллята. Постоянство расхода флегмы обеспечивается переливным стаканом, в котором поддерживается заданный уровень жидкости. Точно такой же уровень, фиксируемый по шкале расходомера Р2, устанавливается в нижней конической части дефлегматора, так как переливной стакан и эта коническая "часть представляют собой сообщающиеся сосуды. Дистиллят переливается через край внутрь стакана и далее течет через холодильник дистиллята 10, расходомер Р3 и ареометр-спиртомер А2 в бак 1. Колебания в расходе дистиллята могут искажать показания расходомера Р3. Поэтому для измерения расхода дистиллята в схему включен также расходомер интегрального типа Р4 — промежуточная емкость с метками. Средний расход дистиллята определяют, измеряя по секундомеру время заполнения объема между метками (500 или 900 см³). При этом вентиль В4 должен быть полностью открыт, чтобы исключить протекание части потока дистиллята через ареометр-спиртомер А2. Для измерения концентрации дистиллята весь его поток направляют через спиртомер, закрыв вентиль В4. В помещении ректификационной установки смонтирована взрывобезопасная осветительная арматура. Все выключатели и пускатель электродвигателя вынесены из помещения.

Методика проведения работы.

При пуске установки прежде всего подают воду в дефлегматор и в холодильники дистиллята и кубового остатка. В дальнейшем следят, чтобы температура воды, уходящей из дефлегматора, не превышала 25 °С. Открывают вентиль на паропроводе, продувают конденсационный горшок и начинают прогрев куба-испарителя, наблюдая за тем, чтобы во время прогрева, т. е. до начала кипения жидкости, давление греющего пара в змеевике не превышало 0,06 МПа (0,6 кгс/см²) по манометру М2. Проверяют, наполнен ли напорный бак 3 исходной смесью, и, если необходимо, насосом 2 подкачивают ее в этот бак из сборника-хранилища 1. С момента начала кипения жидкости в кубе-испарителе, что обнаруживается по показаниям напоромера М3, непрерывно регулируют подачу греющего пара в змеевик, поддерживая постоянным заданное преподавателем давление по напоромеру — до 5 кПа (до 500 мм вод. ст.). Это давление, показываемое напором, равняется гидравлическому сопротивлению ректификационной колонны. Когда в нижней части дефлегматора накопится достаточное количество жидкости, она начнет перетекать во внутреннюю трубу переливного стакана — появится поток дистиллята. После этого приступают к подаче питания (исходной смеси) в колонну. С момента подачи питания начинается выход колонны на установившийся режим, он продолжается не менее часа.

Расход питания задает преподаватель; [0,6—0,8 л/мин] при концентрации спирта в питании соответственно не ниже 16—13% (об.). Чтобы расход питания не изменялся, уровень жидкости в напорном баке 3 должен быть постоянным. С этой целью включают насос 2 для непрерывной работы вплоть до окончания опыта. Запись показаний приборов производят одновременно (по команде «отсчет») через каждые 10—15 мин с начала подачи питания; все полученные данные записывают в отчетную таблицу. После снятия показаний, до остановки колонны, студенты получают с цифропечатающей машинки ленту с записью температур и составов жидкости на тарелках, полученных через «Блок усиления» на ЭВМ, работающей в информационном режиме. После окончания работы закрывают оба вентиля на линии греющего пара, прекращают подачу питания и отбор дистиллята из колонны, закрывают воду на холодильники дистиллята и кубового остатка. Воду на дефлегматор не закрывать! (Ее закрывают только после того, как остынет колонна.)

Обработка опытных данных и составление отчета

1. Переводят из объемных процентов в мольные концентрации питания (x_F) и дистиллята (x_D), определяют их плотности ρ_F и ρ_D (по графику на стр. 250).

2. Рассчитывают молекулярные массы питания M_F и дистиллята M_D .

3. Пересчитывают расходы питания G_F и дистиллята G_D в мольные единицы (кмоль/ч).

4. Из уравнения материального баланса ректификационной колонны

$$G_F = G_D + G_W \quad (18-9)$$

находят G_W .

5. Из уравнения (18-1)

$$G_F x_F = G_D x_D + G_W x_W$$

находят x_W .

6. Определяют число флегмы R — отношение расхода флегмы к расходу дистиллята.

7. По справочным данным (Приложение, табл. VI) строят на миллиметровой бумаге кривую равновесия $y^* = f(x)$ (см. рис. 18-6) и отмечают на оси абсцисс значения x_F , x_D , x_W .

Затем на этот график наносят так называемые рабочие линии для верхней и нижней частей колонны. Уравнения этих двух прямых линий выводят из уравнений материального баланса при условии, что мольные расходы пара G_V и жидкости G_L и G_F (см. рис. 18-3) по высоте колонны постоянны. Уравнения выражают зависимость между переменными по высоте колонны неравновесными мольными концентрациями спирта в жидкости (x) и паре (y) в любом поперечном сечении колонны между двумя соседними тарелками и имеют следующий вид:

для верхней части колонны

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_D}{R+1} \quad (18-10)$$

для нижней части колонны

$$y = \frac{R+F}{R+1}x - \frac{F-1}{R+1}x_W \quad (18-11)$$

где $F = G_F/G_D$ — расход питания на 1 кмоль дистиллята.

Легко доказать, что рабочая линия верхней части колонны пересекает диагональ диаграммы (рис. 18-6) в точке A , а рабочая линия

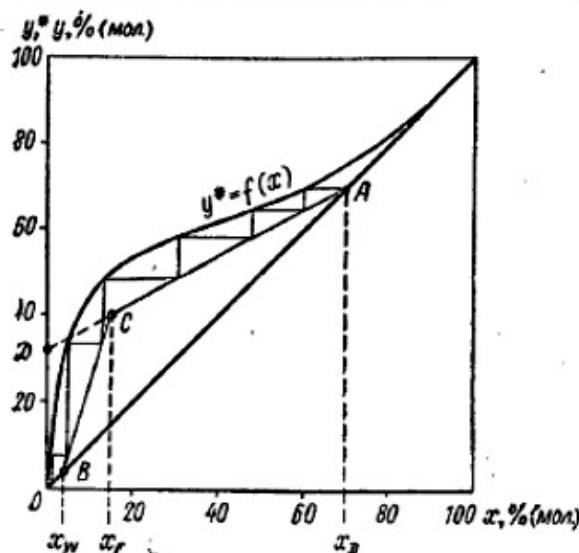


Рис. 18.6. К определению числа ступеней изменения концентрации.

нижней части колонны — в точке B . Обе рабочие линии пересекаются в точке C . Для нанесения их на график откладывают на оси ординат величину $x_D/(R+1)$ и полученную точку D соединяют прямой линией с точкой A , а точку B — с точкой C .

Далее между равновесной и рабочей линиями строят ступени изменения концентрации, как показано на рис. 18-6. Каждая ступень соответствует одной теоретической тарелке. Определив число теоретических ступеней n_c и зная число реальных тарелок n в колонне, находят среднее значение к. п. д. тарелок колонны:

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{n_c}{n} \quad (18-12)$$

Значение к. п. д. тарелки η [см. уравнение (18-6)] не является постоянным. Одни и те же тарелки при разных гидродинамических условиях (расходах пара и жидкости) и физико-химических свойствах системы пар — жидкость могут иметь различные значения к. п. д., на что указывает уравнение (18-8).

8. После определения среднего к. п. д. тарелок $\eta_{\text{ср}}$ студенты переходят в помещение ЭВМ. Ознакомившись с находящимся там оборудованием (блок усиления, ЭВМ, пульт управления, цифропечатающая машинка, информационный щит), они передают опера-

тору в качестве исходных для ввода в ЭВМ данные о расходах исходной смеси, дистиллята, флегмы и о составе питания (все в мольных единицах).

Эти исходные величины вводят в ЭВМ, которая, проделав соответствующие расчеты, выдает данные о поле концентраций в колонне — составы жидкости на всех тарелках. Получив с цифropечатающей машинки ленту с полем концентраций, найденным таким путем, сравнивают результаты математического моделирования, проведенного ЭВМ, с экспериментальными данными, отпечатанными на ленте, полученной студентами ранее, т. е. проверяют адекватность математической модели реальному процессу. Для этого строят график (рис. 18-7).

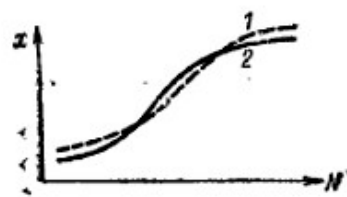


Рис. 18-7. График проверки адекватности математической модели:

1 — экспериментальная кривая;
2 — математическая модель.

В отчет о выполненной работе должны быть включены: а) задание; б) схема установки со спецификацией; в) таблица исходных экспериментальных данных; г) все необходимые расчеты материального баланса; д) график определения числа ступеней изменения концентрации (см. рис. 18-6) и график проверки адекватности математической модели процесса (см. рис. 18-7).

ОТЧЕТНАЯ ТАБЛИЦА

№ по пор.	Измеряемая величина	Отчет					Среднее расчетное значение для установившегося режима
		1	2	3	4	5	
1	Давление, показываемое напоромером, мм вод. ст.						
2	Давление греющего пара в змеевике, кгс/см ²						
3	Температура кипящей жидкости в кубе-испарителе, °С						
4	Концентрация спирта, % (об.):						
5	в дистилляте						
6	в питании						
7	Температура, °С:						
8	дистиллята, выходящего из колонны						
9	питания после подогрева						
10	воды на выходе из дефлегматора						
11	Расход, л/мин:						
	флегмы						
	питания						
	дистиллята						

Вопросы и задания:

- Изучение процесса ректификации в колонне непрерывного действия, определение числа ступеней изменения концентрации и среднего к. п. д. тарелок.
Ознакомление с математическим моделированием процесса ректификации на ЭВМ, проверка адекватности математической модели.
- В чем заключается физическая сущность процесса ректификации? Что является его движущей силой?
- Для чего служит дефлегматор?
- Почему необходимо следить, чтобы температура охлаждающей воды, выходящей из дефлегматора, не была бы высокой?
- Что такое «барботаж»?

6. Какие массообменные процессы происходят на тарелках ректификационной колонны?
7. Что такое к. п. д. тарелки, от чего он зависит?
8. Как изменить число флегмы в работающей колонне?
9. Что надо сделать на работающей установке, чтобы увеличить скорость пара, проходящего через колонну?
10. Как изменится на диаграмме $x-y$ положение рабочей линии верхней части колонны, если при неизменной концентрации дистиллята увеличится число флегмы?
11. В чем заключается сущность математического моделирования процесса ректификации? Какое практическое значение оно имеет?
12. Для чего служит «Блок усиления»?
13. Что такое «адекватность математической модели»?

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / В.М. Потехин, В.В. Потехин. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. - 940 с.
4. Основные процессы и аппараты химической технологии : пособие по проектированию / [Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и др.] ; под ред. Ю. И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1991. – 496 с.

Практическая работа №13. Определение коэффициента массопередачи в процессе абсорбции

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Абсорбцией называют процесс поглощения газов или паров из газовых или парогазовых смесей жидкими поглотителями. Этот процесс является избирательным и обратимым. В промышленности процесс абсорбции используют для разделения углеводородсодержащих газов на нефтеперерабатывающих установках, извлечения из коксового газа аммиака и углеводородов, очистки отходящих газов с целью улавливания ценных продуктов или обезвреживания газосбросов и во многих других случаях. В абсорбционных процессах участвуют две фазы — газовая и жидкая. Газовая фаза состоит из непоглощаемого газа-носителя и одного или нескольких абсорбируемых компонентов. Жидкая фаза представляет собой раствор абсорбируемого (целевого) компонента в жидком поглотителе. При физической абсорбции газ-носитель и жидкий поглотитель инертны по отношению к переходящему компоненту и один по отношению к другому. Равновесие в процессах абсорбции определяет состояние, которое устанавливается при весьма продолжительном соприкосновении фаз и зависит от состава одной из фаз, температуры, давления и термодинамических свойств компонента и поглотителя.

$$p^* = \psi \bar{X}$$

где p^* — парциальное давление газа над раствором в условиях равновесия, Па;

ψ — коэффициент пропорциональности (константа Генри), зависящий от температуры, свойств растворенного газа и поглотителя, Па;

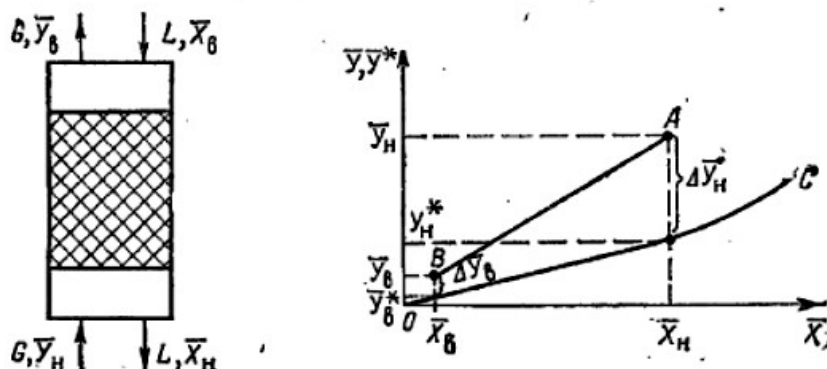


Рис. 19.1. Схема процесса абсорбции:

OC — линия равновесия $\bar{Y}^* = f(\bar{X})$; AB — рабочая линия, прямая, проходящая через точки $(\bar{Y}_n, \bar{X}_n)$ и $(\bar{Y}_b, \bar{X}_b)$.

$\bar{X}$ — относительная массовая доля поглощаемого компонента в поглотителе, кг/кг.

Закон Генри применим только для разбавленных растворов.

Материальный баланс абсорбера (рис. 19-1)

$$G(\bar{Y}_n - \bar{Y}_b) = L(\bar{X}_n - \bar{X}_b)$$

где G и L — массовые расходы инертного газа и жидкого поглотителя, кг/с;

$\bar{Y}_n, \bar{Y}_b$ — относительные массовые доли поглощаемого компонента в газе в низу и в верху абсорбера, кг на 1 кг инертного газа;

$\bar{X}_n, \bar{X}_b$ — относительные массовые доли поглощаемого компонента в жидкости в низу и в верху абсорбера, кг на 1 кг поглотителя.

Скорость массообмена при абсорбции определяется движущей силой процесса (т. е. степенью отклонения системы от равновесного состояния), свойствами поглотителя, компонента и инертного газа, а также устройством абсорбционного аппарата и гидродинамическим режимом его работы. Уравнение массопередачи для процесса абсорбции:

$$M = K_{\bar{Y}} F \Delta \bar{Y}_{\text{ср}}$$

где M — количество компонента, поглощенного в единицу времени, кг/с; $K_{\bar{Y}}$ — коэффициент массопередачи, $\text{м}^2 \cdot \text{с} (\text{кг}/\text{кг})$; F — поверхность насадки, м^2 ; $\Delta \bar{Y}_{\text{ср}}$ — средняя движущая сила процесса абсорбции, кг компонента на 1 кг инертного газа.

Средняя движущая сила процесса абсорбции

$$\Delta \bar{Y}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \bar{Y}_n - \Delta \bar{Y}_в}{2,3 \lg \frac{\Delta \bar{Y}_n}{\Delta \bar{Y}_в}}$$

Здесь

$$\Delta \bar{Y}_n = \bar{Y}_n - \bar{Y}_n^*$$

$$\Delta \bar{Y}_в = \bar{X}_в - \bar{Y}_в^*$$

движущие силы в низу и в верху абсорбера; $\bar{Y}_n^*$ и $\bar{Y}_в^*$ — равновесная относительная массовая доля компонента в газе в низу и в верху абсорбера, кг компонента на 1 кг инертного газа.

Описание установки (рис. 19-2)

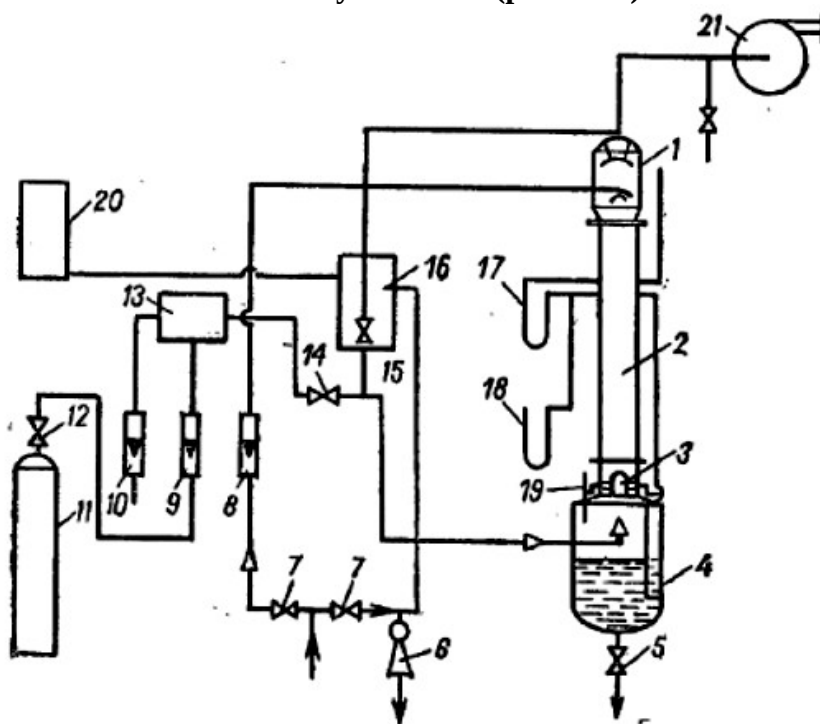


Рис. 19-2. Схема абсорбционной установки:

1 — брызгоотделитель; 2 — абсорбер; 3 — переходная царга; 4 — сборник для воды; 5 — вентиль для спуска поглотителя в канализацию; 6 — эжектор для просасывания анализируемой пробы через датчик газоанализатора; 7 — вентиль для подачи воды; 8 — ротаметр для измерения расхода воды; 9 — ротаметр расхода аммиака; 10 — ротаметр расхода воздуха; 11 — баллон с аммиаком; 12 — редуктор; 13 — смеситель; 14 — кран для подачи аммиачно-воздушной смеси; 15 — кран для отбора проб газа на анализ; 16 — датчик газоанализатора; 17 — дифманометр; 18 — вакуумметр; 19 — термометр; 20 — вторичный прибор газоанализатора; 21 — вентилятор.

Абсорбер 2 диаметром 100 мм и высотой 1700 мм заполнен насадкой из керамических колец размером 15X15X2 мм. Высота насадки 1500 мм. Верхний фланец абсорбера соединен с брызгоотделителем 1. Внутри брызгоотделителя размещены распределитель жидкости и каплеотбойник. Вода, стекающая по насадке, проходит опорную решетку и накапливается в кольцевом зазоре между газовым патрубком и обечайкой переходной царги 3, откуда по трубе перетекает в сборник 4. Расход воды регулируют вентилем 7 по показаниям ротаметра 8. Абсорбируемый газ (аммиак) из баллона 11 дросселируется редукционным вентилем 12. Расход аммиака определяют по ротаметру 9. Аммиак в смесителе 13 смешивается с воздухом, просасываемым через систему вентилятором 21. Расход воздуха измеряют ротаметром 10. Смесь аммиака с воздухом направляют в абсорбер. Расход смеси регулируют краном 14. Кран 15 служит для отбора проб газа, поступающего в абсорбер и прошедшего через абсорбер. Для замера сопротивления насадки установлен U-образный дифманометр 17. Разрежение в нижней

части абсорбера замеряют вакуумметром 18. Температуру воды после абсорбера определяют термометром 19. Концентрацию аммиака в газовом потоке замеряют газоанализатором ТКГ-4Г (датчик 16 и вторичный прибор 20).

Методика проведения работы

При открытом кране 14 включают вентилятор 21 и по показаниям ротаметра 10 устанавливают наименьший из заданных рас* ходов воздуха. Записывают показание дифманометра 17 (гидродинамическое сопротивление сухой насадки). Последовательно проводят такие замеры для всех заданных расходов воздуха. Затем подают воду на орошение колонны, по ротаметру 8 устанавливают наименьший расход воды (поддерживая постоянный расход воздуха) и замеряют гидравлическое сопротивление орошаемой насадки. После измерения сопротивления орошаемой насадки при всех заданных расходах воды в колонну подают аммиак. Требуемый расход аммиака устанавливают по ротаметру Р. Через 3—5 мин работы колонны в установившемся 1 режиме определяют концентрации аммиака в газовом потоке до и после колонны по показаниям прибора 20. Во время опыта необходимо следить за тем, чтобы поплавков ротаметра на приборе 16 находился примерно на середине шкалы. По окончании работы закрывают вентиль 12 на аммиачной линии, спустя 10 мин прекращают подачу воды, выключают газоанализатор и останавливают вентилятор. Все измеренные величины заносят в отчетную таблицу (см, табл. 19-1).

Обработка опытных данных и составление отчета

Определяют коэффициент массопередачи, соответствующий заданному режиму работы установки:

$$K_Y = \frac{M}{F \Delta \bar{Y}_{cp}}$$

Количество аммиака, поглощенного в единицу времени (кг/с)

$$M = G (\bar{Y}_n - \bar{Y}_a)$$

где $G = V\rho$ — массовый расход воздуха, кг/с;
 V — объемный расход воздуха, м³/с;
 ρ — плотность воздуха при температуре опыта, кг/м³;
 $\bar{Y}_n$ и $\bar{Y}_a$ — относительные массовые доли аммиака в воздухе в низу и в верху абсорбера, кг на 1 кг инертного газа.

Пересчет объемной доли y аммиака в относительную массовую долю выполняют по соотношению:

$$\bar{Y} = \frac{17y}{29(1-y)}.$$

Поверхность насадки

$$F = 0,785 D^2 H \sigma$$

где D — диаметр абсорбера, м;
 H — высота слоя насадки, м;
 σ — удельная поверхность насадки, м²/м³.
 Для керамических колец размером 15×15×2 мм $\sigma=330$ м²/м³.
 Для расчета средней движущей силы процесса абсорбции необходимо знать $\bar{Y}_a^*$ и $\bar{Y}_n^*$.

В данной работе на орошение подается чистая вода, следовательно, $\bar{X}_a = 0$ и $\bar{Y}_a^* = 0$.

Значение X_n определяют из уравнения материального баланса а коэффициент ψ для раствора аммиака в воде — по формуле

$$\lg \psi = 11,468 - \frac{1922}{T}$$

Температуру раствора T (К) берут по показаниям термометра 19.

Рассчитывают $p_n^* = \psi \bar{X}_n$ и вычисляют равновесное содержание аммиака в газовой смеси (кг на 1 кг воздуха)

$$\bar{Y}_n^* = \frac{M_a}{M_b} \frac{p^*}{\Pi - p^*}$$

где M_a и M_b — молекулярные массы аммиака и воздуха;

Π — давление в абсорбере.

Результаты расчета заносят в отчетную таблицу (см. табл. 19-2). К отчету прилагают: а) задание; б) схему установки со спецификацией; в) графики зависимости: $K_{\bar{Y}}$ от w и Δp сухой и орошаемой насадки от w (где w — скорость воздуха, м/с).

ОТЧЕТНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Таблица 19-1

Наименование величины	Опыт			
	1	2	3	4
Расход:				
воздуха $V_{\text{возд}}$, дм ³ /с				
воды $V_{\text{вод}}$, см ³ /с				
аммиака $V_{\text{амм}}$, дм ³ /с				
Содержание аммиака, % (об):				
до абсорбера y_n				
после абсорбера y_b				
Гидравлическое сопротивление Δp :				
сухой насадки, мм вод. ст.				
Па				
орошаемой насадки, мм вод. ст.				
Па				
Температура в абсорбере t , °С				
Вакуум в абсорбере B , мм вод. ст.				
Показание барометра H , мм рт. ст.				

Таблица 19.4

Наименование величины	Расчетная формула	Опыт			
		1	2	3	4
Объемный расход воздуха $V_{\text{возд}}$, м ³ /с					
Массовый расход воздуха, кг/с	$G = V_{\text{возд}} \rho_{\text{возд}}$				
Относительная массовая доля аммиака в воздухе, кг аммиака на 1 кг воздуха:					
в низу абсорбера	$\bar{Y}_n = \frac{17 y_n}{29 (1 - y_n)}$				
в верху абсорбера	$\bar{Y}_v = \frac{17}{29 (1 - y_v)}$				
Количество аммиака, абсорбированного в единицу времени, кг/с	$M = G (\bar{Y}_n - \bar{Y}_v)$				
Степень поглощения аммиака	$\eta = \frac{\bar{Y}_n - \bar{Y}_v}{\bar{Y}_n}$				
Объемный расход воды $V_{\text{вод}}$, м ³ /с					
Массовый расход воды, кг/с	$L = V_{\text{вод}} \rho_{\text{вод}}$				
Относительная массовая доля аммиака в воде в низу абсорбера, кг аммиака на 1 кг воды	$\bar{X}_n = \frac{M}{L}$				
Константа Генри, Па	$\lg \psi = 11,468 - \frac{1922}{T}$				
	$\psi =$				
Равновесное парциальное давление аммиака в низу абсорбера, Па	$p_n^* = \psi \bar{X}_n$				
Общее давление в абсорбере, Па	$\Pi =$				
Равновесная относительная массовая доля аммиака в воздухе в низу абсорбера, кг аммиака на 1 кг воздуха	$\bar{Y}_n^* = \frac{17 p_n^*}{29 \Pi - p_n^*}$				
Движущая сила процесса абсорбции, кг аммиака на 1 кг воздуха	$\Delta \bar{Y}_n = \bar{Y}_n - \bar{Y}_n^*$ $\Delta \bar{Y}_v = \bar{Y}_v - 0$ $\Delta \bar{Y}_{\text{ср}}$ — среднее логарифмическое				
Поверхность массопередачи, м ²	$F = 0,785 D^2 H \sigma$				
Коэффициент массопередачи, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} (\text{кг/кг})}$	$K_{\bar{Y}} = \frac{M}{F \Delta \bar{Y}_{\text{ср}}}$				
Скорость воздуха (на полное сечение абсорбера), м/с	$w = \frac{V_{\text{возд}}}{0,785 D^2}$				
Плотность орошения насадки водой, $\frac{\text{м}^3}{(\text{м}^2 \cdot \text{с})}$	$\frac{V_{\text{вод}}}{0,785 D^2}$				

Вопросы и задания:

1. Практическое ознакомление с работой абсорбера; экспериментальное исследование его гидродинамических и массообменных характеристик, в частности, определение гидравлического сопротивления сухой и орошаемой насадки, а также коэффициента массопередачи, отнесенного к единице поверхности насадки.
2. В чем заключается процесс абсорбции?
3. Что является движущей силой процесса абсорбции?
4. Как рассчитать среднюю движущую силу процесса в абсорбере?

5. От чего зависит равновесие процесса абсорбции? Каким законом описывается равновесие?
6. Почему при абсорбции аммиак переходит из газовой фазы в жидкость? Участвуют ли в массообмене воздух и вода?
7. Какой физический смысл имеет точка на рабочей линии?
8. Почему в абсорбционных колоннах всегда происходит противоточное движение фаз?
9. При каких условиях поверхность массообмена можно отождествить с поверхностью насадки?
10. Как точно определить среднее давление в абсорбере по приборам, имеющимся на установке?
11. Как установить, что установка вышла на режим и можно снимать показания?

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Технология переработки нефти : в 2 ч. : учеб.пособие / [О. Ф. Глаголева, В. М. Капустин, Т. Г. Гюльмисарян [и др.]] ; под ред. О. Ф. Глаголевой, В. М. Капустина, Ч.1, Первичная переработка нефти. – М. : Химия : КолосС, 2005. – 400 с. – Гриф: Доп. МО.
4. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / [Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Барабаш и др.] / [под ред. Г. М. Островского], Ч.1. – СПб. : Проффессионал, 2004. – 848 с.

Практическая работа № 14. Расчет циклонов

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Принцип действия циклона основан на выделении частиц пыли из газового потока под воздействием центробежных сил, возникающих вследствие вращения потока в корпусе аппарата. Циклоны имеют простую конструкцию (рисунок 1), малые габариты и надежны в работе – это одни из наиболее распространенных пылеочистных устройств.

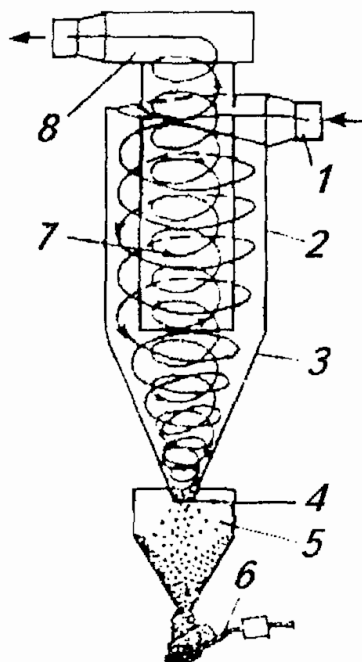


Рисунок 1 – Циклон

Последовательность расчета и выбора циклона.

Для расчета или выбора циклона необходимы следующие данные: объемный расход газов, подлежащих обеспыливанию при рабочих условиях, V_p , м³/с; динамическая

вязкость газов при рабочей температуре μ_r , Па·с; плотность газа при рабочих условиях ρ_r , кг/м³; дисперсный состав пыли, задаваемый параметрами d_m , мкм, и $\lg \sigma_X$; концентрация пыли в газах $c_{вх}$, г/м³, требуемая степень очистки η , %.

1. Задавшись типом циклона, по таблице 2 или 3 определяют оптимальную скорость газа в аппарате $u_{опт}$.

2. Рассчитывают необходимую площадь сечения циклонов, м²:

$$F = V_p / u_{опт}.$$

3. Определяют диаметр циклона (в м), задаваясь количеством циклонов N:

$$D = \sqrt{F / 0,785 N}.$$

Диаметр циклона округляют до величины, рекомендуемой таблицей 4.

4. Вычисляют действительную скорость газа в циклоне:

$$u = V_p / 0,785 \cdot N \cdot D^2.$$

Скорость в циклоне не должна отклоняться более чем на 15 % от оптимальной.

5. Рассчитывают коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона или группы циклонов:

$$\zeta = K_1 \cdot K_2 \cdot \zeta_{n500}^{c(n)} + K_3,$$

где $\zeta_{n500}^{c(n)}$ – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона или группы циклонов диаметром 500 мм, выбираемый по таблице 5. Индекс «с» означает, что циклон работает в гидравлической сети, а индекс «п» – без сети, т.е. работает прямо на выхлоп в атмосферу;

K_1 – поправочный коэффициент на диаметр циклона, определяемый по таблице 6;

K_2 – поправочный коэффициент на запылённость газа, определяемый по таблице 7;

K_3 – поправочный коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группу, определяемый по таблице 8.

Таблица 2 – Параметры, определяющие эффективность циклонов типа ЦН

Параметры	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
$d_{\eta=50}^r$, мкм	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95	1,13
$\lg \sigma_{\eta}^r$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340
$u_{опт}$, м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0

Примечание: Значения d_{50}^r соответствуют следующим условиям $u_T = 3,5$ м/с, $D_T = 0,6$ м, $\rho_T = 1930$ кг/м³, $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Н·с/м².

Таблица 3 – Параметры, определяющие эффективность циклонов

Параметры	Циклон конструкции		
	СИОТа	ВЦНИИОТа	Гипродревпрома (тип Ц)
$d_{\eta=50}^r$, мкм	2,6	8,6	14,2
$\lg \sigma_{\eta}^r$	0,28	0,32	0,34
$u_{опт}$, м/с	1,00	4,00	3,3

ξ	1400	75	210
-------	------	----	-----

Таблица 4 – Размеры циклонов

Типоразмер циклона	Код ОКП	Площадь сечения цилиндрической части корпуса, м ²	Производительность, м ³ /ч	Степень очистки		Масса, т, не более
				R ₉₀ = 7 %	R ₉₀ = 9 %	
ЦН-15-1400	31 1338 2119	1,538	17 000 – 20 000	91	93	2,418
ЦН-15-1800	31 1338 2121	2,543	28 000 – 32 000	91	93	3,949
ЦН-15-2000	31 1338 2122	3,14	32 000 – 38 000	90	92	5,163
ЦП-2-2000	31 1338 2206	3,14	38 000 – 51 000	88	90	4,13
ЦП-2-2360	31 1338 2207	4,37	51 000 – 61 000	88	90	5,6
ЦП-2-2500	31 1338 2208	4,9	61 000 – 73 000	88	90	7,02
ЦП-2-2800	31 1338 2209	6,154	73 000 – 82 000	88	90	8,985
ЦП-2-3000	31 1338 2211	7,065	82 000 – 100 000	87	89	10,045
ЦП-2-3150	31 1338 2212	7,786	100 000 – 120 000	87	89	11,83
ЦП-2-3750	31 1338 2214	11,036	140 000 – 180 000	86	88	19,45
ЦП-2-4250	31 1338 2215	14,178	180 000 – 230 000	86	88	24,84

Таблица 5 – Значение коэффициентов сопротивления циклонов (D=500 мм; U=3 м/с)

Тип циклона	d/D	Бездополнительных устройств		С кольцевым диффузором		С выходной «улиткой» $\zeta_{\text{ц}}^{\text{с}}$	С отводом 90° R/d = 1,5	
		$\zeta_{\text{ц}}^{\text{с}}$	$\zeta_{\text{ц}}^{\text{н}}$	$\zeta_{\text{ц}}^{\text{с}}$	$\zeta_{\text{ц}}^{\text{н}}$		l/d = 0 ÷ 12, $\zeta_{\text{ц}}^{\text{с}}$	l/d > 12, $\zeta_{\text{ц}}^{\text{с}}$
ЦН-11	0,59	245	250	207	215	235	245	250
ЦН-15	–	155	163	132	140	150	155	160
ЦН-15У	–	165	170	140	148	158	165	170
ЦН-24	–	75	80	64	70	73	75	80
СДК-ЦН-33	0,33	520	600	–	–	500	–	560
СК-ЦН-34	0,34	1050	1150	–	–	–	–	–
СК-ЦН-34М	0,22	–	2000	–	–	–	–	–

Таблица 6 – Поправочный коэффициент K₁ на диаметр циклона

Диаметр циклона, мм	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24	СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М
150	0,94	0,85	1,0
200	0,95	0,90	1,0
300	0,96	0,93	1,0
450	0,99	1,0	1,0
500	1,0	1,0	1,0

Таблица 7 – Значения поправочных коэффициентов на запыленность газов (D = 500 мм)

Тип циклона	Поправочный коэффициент K ₂ при запыленности газа, 10 ³ кг/м ³						
	0	10	20	40	80	120	150

ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,5
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15У	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34М	1	0,99	0,97	0,95	–	–	–

Таблица 8 – Коэффициент K_3 , учитывающий дополнительные потери давления, связанные с групповой компоновкой

Характеристики группового циклона	Значение коэффициента
Круговая компоновка, нижний организованный подвод	60
Прямоугольная компоновка, организованный подвод, циклонные элементы расположены в одной плоскости	35
То же, но «улиточный» отвод из циклонных элементов	28
Прямоугольная компоновка, свободный подвод потока в общую камеру	60
Для одиночных циклонов $K_3=0$	

6. Определяют потери давления в циклоне (в Па) по формуле:

$$\Delta p = \zeta_{\text{ц}} \frac{\rho v^2}{2}$$

Если потери давления Δp оказались приемлемыми, переходят к расчету полного коэффициента очистки газов в одиночном циклоне. При этом принимается, что коэффициент очистки газа в группе может оказаться несколько ниже, чем в одиночном циклоне. Это объясняется возможностью возникновения перетоков газа через общий бункер, снижающих коэффициент очистки газов в группе циклонов.

7. Взяв из таблицы 2 или 3 два параметра ($d_{\eta=50}^{\tau}$ и $\lg \sigma_{\eta}^{\tau}$), характеризующих парциальную эффективность выбранного типа циклона при указанных

в таблице условиях, определяют значение параметра $d_{\eta=50}$ при рабочих условиях (диаметре циклона, скорости потока, плотности пыли, динамической вязкости газа) по уравнению:

$$d_{\eta=50} = d_{\eta=50}^{\tau} \sqrt{\left(\frac{D}{D_T}\right) \cdot \left(\frac{\rho_{\text{чТ}}}{\rho_{\text{ч}}}\right) \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_T}\right) \cdot \left(\frac{v_T}{v}\right)}$$

Значения величин с индексом «Т» соответствуют эталонным условиям, указанным в примечании к таблице 2.

Таким образом, по вышеприведенной зависимости определяется эквивалентный диаметр частиц, улавливаемых в циклоне с эффективностью 50 % при рабочих условиях.

8. Учитывая, что улавливание пыли чаще всего подчиняются логарифмически нормальному распределению, можно определить параметр «х» функции распределения $\Phi(x)$.

Если из закона распределения известен или найден медианный размер частиц пыли, то по уравнению

$$x = \frac{\lg(d_m/d_{\eta=50})}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_{\eta}}}$$

легко определяется параметр «х», а степень очистки по уравнению

$$\eta = 50 \left[1 + \Phi(x) \right] (\%),$$

где η – общая эффективность улавливания пыли в циклоне.

Значение нормальной функции распределения в этом случае следует брать из таблицы 8, где интеграл табулирован в пределах от 0 до х.

Таблица 8 – Значение нормальной функции распределения (интеграла вероятности)

$$\Phi(x) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0,01	0,0080	0,61	0,4581	1,21	0,7737	1,81	0,9297
0,02	0,0160	0,62	0,4647	1,22	0,7775	1,82	0,9312
0,03	0,0239	0,63	0,4713	1,23	0,7813	1,83	0,9328
0,04	0,0319	0,64	0,4778	1,24	0,7850	1,84	0,9342
0,05	0,0399	0,65	0,4843	1,25	0,7887	1,85	0,9357
0,06	0,0478	0,66	0,4907	1,26	0,7923	1,86	0,9371
0,07	0,0558	0,67	0,4971	1,27	0,7959	1,87	0,9385
0,08	0,0638	0,68	0,5035	1,28	0,7995	1,88	0,9399
0,09	0,0717	0,69	0,5098	1,29	0,8029	1,89	0,9412
0,10	0,0797	0,70	0,5161	1,30	0,8064	1,90	0,9426
0,11	0,0876	0,71	0,5223	1,31	0,8098	1,91	0,9439
0,12	0,0955	0,72	0,5285	1,32	0,8132	1,92	0,9457
0,13	0,1034	0,73	0,5346	1,33	0,8163	1,93	0,9464
0,14	0,1113	0,74	0,5407	1,34	0,8198	1,94	0,9476
0,15	0,1192	0,75	0,5467	1,35	0,8230	1,95	0,9488
0,16	0,1271	0,76	0,5527	1,36	0,8262	1,96	0,9500
0,17	0,1350	0,77	0,5587	1,37	0,8293	1,97	0,9512
0,18	0,1428	0,78	0,5646	1,38	0,8324	1,98	0,9523
0,19	0,1507	0,79	0,5705	1,39	0,8355	1,99	0,9534
0,20	0,1585	0,80	0,5763	1,40	0,8385	2,00	0,9545
0,21	0,1663	0,81	0,5821	1,41	0,8415	2,05	0,9596
0,22	0,1741	0,82	0,5878	1,42	0,8444	2,10	0,9643
0,23	0,1819	0,83	0,5935	1,43	0,8475	2,15	0,9684
0,24	0,1897	0,84	0,5991	1,44	0,8501	2,20	0,9722
0,25	0,1974	0,85	0,6047	1,45	0,8529	2,25	0,9736
0,26	0,2051	0,86	0,6102	1,46	0,8557	2,30	0,9786
0,27	0,2128	0,87	0,6157	1,47	0,8554	2,35	0,9812
0,28	0,2205	0,88	0,6211	1,48	0,8611	2,40	0,9836
0,29	0,2282	0,89	0,6265	1,49	0,8638	2,45	0,9857
0,30	0,2358	0,90	0,6319	1,50	0,8664	2,50	0,9876
0,31	0,2434	0,91	0,6372	1,51	0,8690	2,55	0,9892
0,32	0,2510	0,92	0,6424	1,52	0,8715	2,60	0,9907
0,33	0,2586	0,93	0,6475	1,53	0,8740	2,65	0,9920
0,34	0,2661	0,94	0,6528	1,54	0,8764	2,70	0,9931
0,35	0,2737	0,95	0,6579	1,55	0,8789	2,75	0,9940
0,36	0,2812	0,96	0,6629	1,56	0,8812	2,80	0,9949

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0,37	0,2886	0,97	0,6680	1,57	0,8836	2,85	0,9956
0,38	0,2961	0,98	0,6729	1,58	0,8859	2,90	0,9963
0,39	0,3035	0,99	0,6778	1,59	0,8882	2,95	0,9968
0,40	0,3108	1,0	0,6827	1,60	0,8904	3,00	0,9973
0,41	0,3182	1,01	0,6875	1,61	0,8926	3,10	0,99806
0,42	0,3255	1,02	0,6923	1,62	0,8948	3,20	0,99863
0,43	0,3328	1,03	0,6970	1,63	0,8969	3,30	0,99903
0,44	0,3401	1,04	0,7017	1,64	0,8990	3,40	0,99933
0,45	0,3473	1,05	0,7063	1,65	0,9011	3,50	0,99953
0,46	0,3545	1,06	0,7109	1,66	0,9031	3,60	0,99968
0,47	0,3616	1,07	0,7154	1,67	0,9051	3,70	0,99978
0,48	0,3688	1,08	0,7199	1,68	0,9070	3,80	0,99986
0,49	0,3759	1,09	0,7243	1,69	0,9090	3,90	0,99990
0,50	0,3829	1,10	0,7287	1,70	0,9109	4,00	0,99994
0,51	0,3899	1,11	0,7330	1,71	0,9127	4,417	0,99999
0,52	0,3969	1,12	0,7373	1,72	0,9146	4,892	0,999999
0,53	0,4039	1,13	0,7415	1,73	0,9164	5,327	0,9999999
0,54	0,4108	1,14	0,7457	1,74	0,9181		
0,55	0,4177	1,15	0,7499	1,75	0,9199		
0,56	0,4245	1,16	0,7540	1,76	0,9216		
0,57	0,4313	1,17	0,7580	1,77	0,9233		
0,58	0,4381	1,18	0,7620	1,78	0,9246		
0,59	0,4448	1,19	0,7660	1,79	0,9263		
0,60	0,4515	1,20	0,7699	1,80	0,9281		

9. В случае необходимости определения фракционных степеней очистки для выявления параметра x_i для каждой фракции следует использовать уравнение (*), затем, пользуясь нормальной функцией распределения, из таблицы 1 определяют степень очистки для каждой фракции η_i .

$$x_i = \frac{\lg\left(\frac{d_i}{d_{\eta=50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma - \lg^2 \sigma_{\eta}} \quad (*)},$$

где σ_{η} – соответственно средний диаметр фракции, диаметр частиц, улавливаемых в аппарате со степенью очистки 50 %, дисперсия состава материала и дисперсия степени очистки в данном аппарате.

Зная величину η_i и массовое содержание фракции (в %) в составе материала ΔR_i по зависимости

$$\eta = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \eta_i \Delta R_i$$

определяют общую эффективность очистки газа от пыли.

По окончании расчета полученное значение η сопоставляется с требуемым. Если η окажется меньше требуемого, необходимо выбрать другой тип циклона с большим значением коэффициента гидравлического сопротивления.

Для ориентировочных расчетов необходимого значения $\zeta_{\text{ц}}$ рекомендуется следующая зависимость:

$$\zeta_{u2} = \zeta_{u1} \left(\frac{100 - \eta_1}{100 - \eta_2} \right) \frac{v_1 D_2}{v_2 D_1},$$

где индекс «1» относится к расчетным, а индекс «2» – к требуемым параметрам циклона.

Последовательность расчета батарейного циклона

Расчет батарейного циклона рекомендуется производить в следующей последовательности:

1. Определяют расход газов (в м³/с), при котором обеспечиваются оптимальные условия работы циклонного элемента:

$$q_{onm} = 0,785 D^2 v_{onm},$$

где v_{onm} – оптимальная скорость потока в элементе, м/с (таблица 10);
D – внутренний диаметр элемента, м.

2. Рассчитывают число циклонных элементов, необходимое для оптимальных условий работы батарейного циклона:

$$n_{onm} = V / q_{onm},$$

где V – общий расход газа, м³/с.

3. По таблице 10 подбирают батарейный циклон с ближайшим к n_{onm} числом циклонных элементов n. Число элементов выбранного батарейного циклона n желательно выбрать таким, чтобы оно отличалось от n_{onm} не более чем на 10 %.

Далее определяют действительную скорость потока в элементе n, м/с:

$$v = \frac{Q}{n} \cdot 0,785 D^2.$$

4. Рассчитывают потери давления в батарейном циклоне, Па:

$$\Delta p = \zeta p_T v^2 / 2.$$

Коэффициенты гидравлического сопротивления батарейных циклонов приведены в таблице 10.

5. Определяют коэффициент очистки газа в элементе возвратно-поточного батарейного циклона, пользуясь схемой расчета, приведенной для обычных циклонов.

Необходимые для этого значения ($d_{\eta=50}^T$ и $\lg \sigma_{\eta}$) приведены в таблице 11.

Коэффициент очистки газов в батарее, состоящей из прямоточных элементов, снижается примерно на 10 % по сравнению с коэффициентом очистки в одиночном элементе и зависит при этом от коэффициента отсосного циклона. Все это учитывается формулой:

$$\eta_{bat} = \frac{0,9 \eta_{\eta}}{1 - 0,9 \eta (1 - \eta_{\eta})},$$

где η_{η} – коэффициент очистки газов в циклоне отсосной линии;

η – коэффициент очистки в одиночном циклонном элементе.

Значения коэффициентов очистки газов выражаются в долях единицы.

Последовательность расчета величин η и η_c аналогична последовательности расчета для одиночного циклона.

Таблица 10 – Технические характеристики батарейных циклонов

Тип циклона	Число элементов в секции	Оптимальная скорость газа в элементе, м/с	Производительность по газу одной секции $q_{опт}$, м³/с	Коэффициент сопротивления ζ	Области промышленного применения
ЦБ-254Р	25;30; 40;50; 60;80	4,5	5,6-16,2	90	Обеспыливание газа при температуре 40°C
ЦБ-231У, намечается производство на Семибратовс- ком заводе газоочистной аппаратуры, Ост 26-14- 2002-77	12;16; 20;25; 30;42; 56;63	4,5	2,2-11,7	110	То же
БЦ-2	20;25; 30;36; 42;56	4,5	4,84-13,6	70	Обеспыливание газа при температуре до 150°C (аппараты выпускаются во взрывобезопасном исполнении)
ПБЦ	24;36; 48;96	3,5	4,2-16,7	150	Обеспыливание газа при температуре до 120°C (аппараты выпускаются во взрывобезопасном исполнении)

Таблица 11 – Параметры, определяющие эффективность батарейных циклонов

Параметры	Тип элемента циклона				
	«Розетка»	«Розетка»	«Энергоуголь»		Прямоточный ЦКТИ
	$\alpha = 25^\circ$; $D = 250\text{ мм}$	$\alpha = 30^\circ$; $D = 250\text{ мм}$	$D = 250$ мм	$D = 230$ мм	
$d_{\eta=50}^r$	3,85	5,0	3,0	2,87	4,0
$\lg \sigma_\eta$	0,46	0,46	0,325	0,325	0,525

Примечания: 1. Данные, относящиеся к циклонным элементам типа «Розетка» и «Энергоуголь», соответствуют следующим условиям их работы: средняя скорость потока

в элементе $v_{\Gamma} = 4,5$ м/с; динамическая вязкость газов $\mu_{\Gamma} = 23,7 \cdot 10^{-6}$ Па·с;
плотность частиц $\rho_{\text{ч}} = 2200$ кг/м³.

2. Параметры, определяющие эффективность прямоточного элемента ЦКТИ, относятся к $v_{\Gamma} = 12$ м/с; динамическая вязкость газов $\mu_{\Gamma} = 18,8 \cdot 10^{-6}$ Па·с;
плотность частиц $\rho_{\text{ч}} = 2200$ кг/м³; расходу газов в линии рециркуляции, составляющему примерно 10 % расхода очищаемого газа.

Вопросы и задания:

1. Провести расчет циклона по приведенным данным
2. Устройство циклона
3. Принцип работы циклона
4. Порядок расчета и выбор циклона
5. Последовательность расчета батарейного циклона.

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии : учеб.пособие : в 2 кн. / Ю.И. Дытнерский, Ч.1, Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М. : Химия, 2002. – 400 с.

Практическая работа №15. Расчет рукавного фильтра

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Для очистки газов от твердых частиц (пылей) используют различные устройства, которые по принципу действия можно разделить на следующие группы:

1. устройства для механической очистки газов, в которых пыль отделяют под действием силы тяжести, силы инерции или центробежной силы. К ним относятся соответственно пылеосадительные камеры, инерционные пылеуловители, циклоны;
2. аппараты мокрой очистки газов, в которых твердые частицы улавливаются жидкостью. Это, например, полые газопромыватели, скрубберы;
3. фильтрующие пылеуловители. В них задержание пылей производится фильтрующими материалами. Наиболее распространены тканевые, волокнистые и зернистые фильтры;
4. электрофильтры, в которых твердые частицы осаждаются на электродах в результате ионизации газа и содержащихся в нем твердых частиц.

Метод и аппараты для пылеулавливания выбирают в зависимости от свойств пылей, степени запыленности и требований к очистке газа.

Основным достоинством рукавных фильтров является высокая степень очистки (99% и выше).

Рукавные фильтры представляют собой аппараты с корпусами прямоугольной или круглой формы. Внутри корпусов подвешены рукава диаметром от 100 до 300 мм, высотой от 0,5 до 10 м. Фильтрация воздуха осуществляется пропусканием запыленной среды через ткань рукава. Поле того, как на фильтрующей поверхности накопится слой пыли, гидравлическое сопротивление которого составляет предельно допустимую величину, производят регенерацию рукавов (сбрасывание в бункер накопившегося слоя пыли). Для регенерации используют обратную, импульсную и струйную продувку или механическое встряхивание, которое может сочетаться с обратной продувкой.

Помимо способа регенерации, рукавные фильтры различаются площадью фильтрующей поверхности, допустимой величиной рабочего давления (разрежения), количеством секций, формой, диаметром, высотой и конструктивными особенностями рукавов (наличием каркаса, колец по высоте рукава и т.п.).

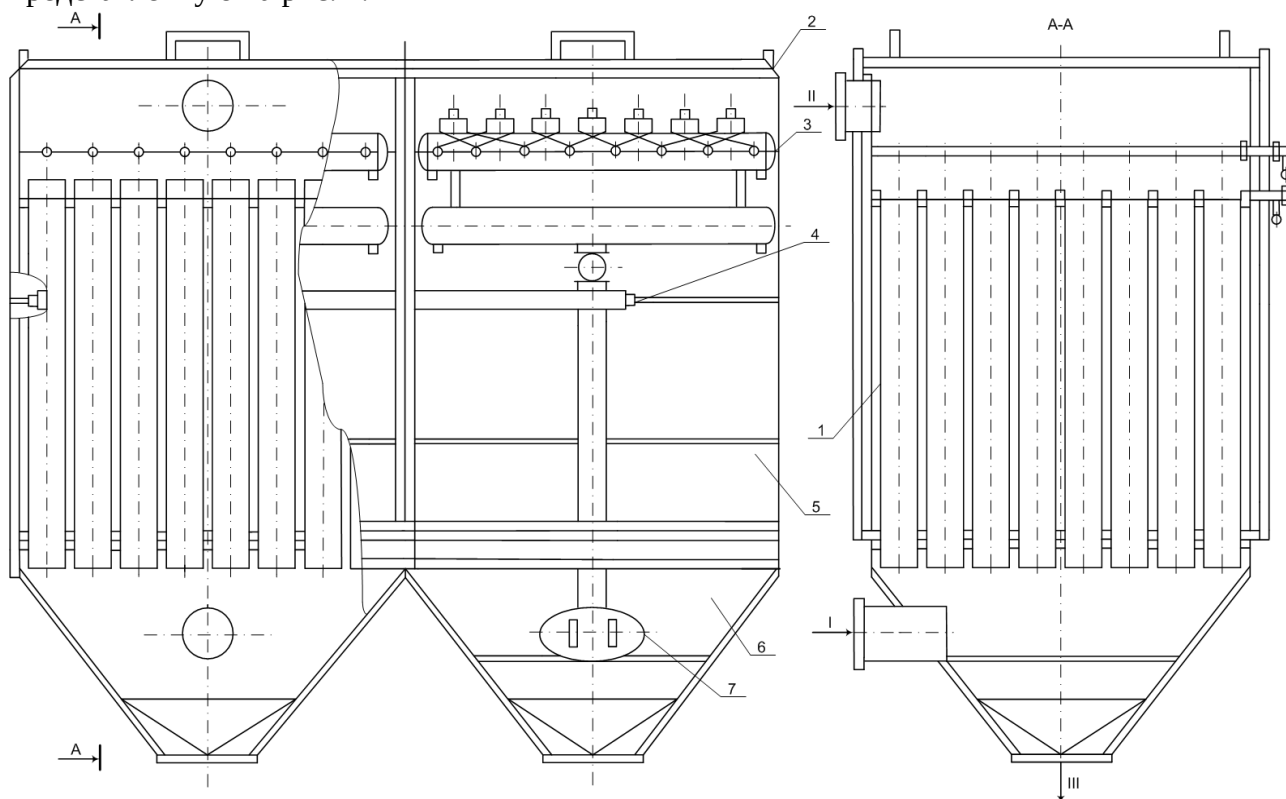
В настоящее время наиболее распространенными типами рукавных фильтров являются: ФРКИ, ФРКДИ, ФРО, ФРОС и др.

Условное обозначение типоразмера фильтров: Ф – фильтр; Р – рукавный; К – каркасный; И – с импульсной продувкой; ДИ – с двухсторонней импульсной продувкой; О – с регенерацией обратной продувкой; ОС – обратная продувка сжатым воздухом.

Рукавные фильтры ФРОС предназначены для улавливания ценных продуктов из газов с высокой температурой. ФРО используются для улавливания слабослипающихся пылей из сухих газов при объеме их свыше 50 тыс. м³/ч. ФРКДИ предназначены для улавливания нетоксичных и невзрывоопасных пылей при температуре очищаемого газа до 130° С. Рукавные фильтры ФРКИ применяют в тех же случаях, что и ФРКДИ, однако они имеют меньшую площадь фильтровальной поверхности.

Проанализировав функциональные и конструктивные особенности рукавных фильтров, можно заключить, что для очистки выбросов столярного цеха с учетом свойств древесной пыли и расходом газа более всего подходит рукавный фильтр типа ФРКИ.

Охарактеризуем принцип работы такого фильтра, рассмотрев его конструкцию, представленную на рис. 1.



Наиболее ответственным узлом аппарата, определяющим качество очистки газа,

Рисунок 1 – Рукавный фильтр типа ФРКИ

- 1 – рукав; 2 – крышка; 3 – клапанная секция; 4 – коллектор; 5 – корпус; 6 – бункер; 7 – люк; I – запыленный газ; II – очищенный газ; III – уловленные частицы

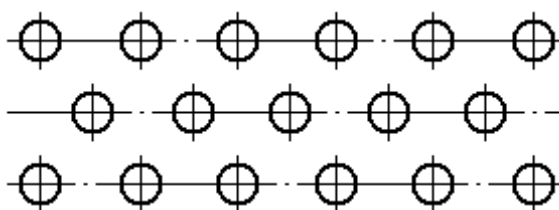
являются фильтровальные элементы – рукава 1, состоящие из фильтровальной перегородки и арматуры, необходимой для функционирования элемента и его крепления.

В данном фильтре используются каркасные фильтровальные элементы с гибкими перегородками. Наличие каркаса позволяет улучшить условия регенерации за счет ударов ткани об него. Каркас выполняют из проволоки диаметром 3 мм и защищают антикоррозионным покрытием. В верхней части к каркасу приваривают фланец с

диффузором, а в нижней части – доньшко. Рукав крепится к каркасу при помощи разъемного хомута.

Размещение рукавов оказывает существенное влияние на занимаемую фильтром площадь. В рассматриваемом фильтре рукава расположены в шахматном порядке (рис. 2), что является наиболее выгодным вариантом, так как способствует самому эффективному использованию площади.

В ФРКИ запыленный газ проходит через ткань закрытых снизу рукавов в направлении снаружи внутрь; чистый газ выходит через верхние открытые концы рукавов и удаляется из аппарата. Каждый рукав в фильтре натянут на жесткий каркас и закреплен на верхней решетке.



Р
-
фильтра

Рукава подвешены в корпусе 5. Он выполнен в виде двух блоков: основной части, закрытой крышкой 2, и бункера 6, снабженного люком 7, предназначенным для осмотра. Корпус имеет две секции. Запыленный газ поступает в корпус через патрубки, расположенные на боковых стенках бункеров. Корпус изготавливают из углеродистой стали сварным в виде отдельных блоков, из которых на месте установки аппарат собирают на болтах. Основными требованиями, предъявляемыми к корпусу, являются герметичность, устойчивость против коррозии, прочность.

Регенерация фильтра осуществляется без отключения секций импульсами сжатого воздуха, поступающего внутрь рукавов сверху через отверстия в продувочных коллекторах 4. Длительность импульсов – 0,1-0,2 с. Подача импульсов обеспечивается электромагнитными клапанами 3 при помощи системы автоматики. Система регенерации рассчитана на использование сжатого воздуха давлением 0,6 МПа. Выгрузка пыли производится через шлюзовые затворы в бункере.

В качестве фильтровальных материалов можно использовать хлопчатобумажные, шерстяные, лавсановые фильтровальные ткани, ткани из стекловолокна.

Расчет

Технологический расчет фильтровального аппарата сводится к определению площади фильтровальной перегородки, гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки и аппарата в целом, частоты и продолжительности циклов регенерации фильтровальных элементов.

Исходные данные

Вид пыли, производительность V , м³/ч, температура отходящего газа t , °С; концентрация пыли на входе в фильтр $C_{вх}$, г/м³; медианный диаметр частиц пыли d , мкм; динамическая вязкость газа, μ , Па·с; концентрация пыли на выходе из фильтра $C_{вых}$, г/м³; ткань фильтровального рукава – лавсан арт. 86033; гидравлическое сопротивление установки без фильтра $\Delta P_c = 1000$ Па; плотность газа ρ_g , кг/м³; КПД вентилятора $\eta_v = 70$ %; передача к вентилятору клиноременная.

Варианты заданий

№ п/п	Вид пыли	V , м ³ /ч	t , °С	$C_{вх}$, г/м ³	d , мкм	μ , Па·с	$C_{вых}$, г/м ³	ρ_g , кг/м ³
1	Древесная	5800	24	2,3	50	$22,1 \cdot 10^{-6}$	0,013	1,24
2	Угольная	4700	25	3,0	20	20	0,02	1,28

3	Цементная	6200	38	5,2	10	19	0,025	1,29
4	Резиновая	5300	36	8,3	5	21	0,015	1,3
5	Гипсовая	6500	24	4,2	3,5	23	0,01	1,31
6	Мучная	7000	25	3,5	2,8	22	0,012	0,8
7	Известняковая	8200	20	1,5	3,7	18	0,014	0,99
8	Сахарная пудра	3400	30	2,0	2,5	18,5	0,011	0,7
9	Асбестовая	2900	40	1,8	5,6	19,5	0,01	0,6
10	Табачная	4900	37	4,0	15	20,8	0,016	0,87
11	Кожевенная	3100	40	1,2	23	21,1	0,021	1,23
12	Пыль горных пород	7500	23	4,6	6	18,6	0,015	1,15
13	Кокс	7400	60	3,7	10	19,8	0,016	1,25
14	Целлюлозные материалы	5600	50	2,1	40	22,5	0,02	1,24
15	Сухие смолы	4700	40	3,4	15	20,4	0,01	1,2
16	Картонная	3200	70	2,7	30	22,2	0,018	1,22
17	Технический углерод	4400	80	1,6	12	19,7	0,016	1,21
18	Силикатная	5300	50	1,9	8	17,8	0,01	1,14
19	Соль	2900	25	2,8	3	18,7	0,03	1,13
20	Жмыховая смесь	3200	30	1,4	60	23	0,017	1,26
21	Летучая зола	5700	100	3,9	12	22,4	0,023	1,3
22	Керамические красители	3800	80	3,1	4,5	22,3	0,01	1,25
23	Порошковое молоко	5500	40	1,1	2,5	22,6	0,012	1,26
24	Тальк	3000	20	1,3	2,8	22,9	0,01	1,9
25	Активированный уголь	2900	30	0,9	14	21,3	0,03	1,27

1. Определим удельную газовую нагрузку:

$$q = q_n \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5,$$

где q_n – нормативная удельная нагрузка, зависящая от вида пыли и ее склонности к агломерации, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ (определяется из табл. 1.36 приложения);

C_1 – коэффициент, характеризующий особенность регенерации фильтровальных элементов. При регенерации путем импульсной продувки сжатым воздухом $C_1 = 1$;

C_2 – коэффициент, учитывающий влияние концентрации пыли на удельную газовую нагрузку (определяется по рис. 1.72);

C_3 – коэффициент, учитывающий влияние дисперсного состава пыли в газе (определяется из табл. 1.37);

C_4 – коэффициент, учитывающий влияние температуры газа (определяется из табл. 1.38);

C_5 – коэффициент, учитывающий требования к качеству очистки. Принимается равным 0,97.

2. Найдем поверхность фильтрования:

$$F = \frac{V}{60q},$$

где V – объем газа, поступающий на очистку, $\text{м}^3/\text{ч}$.

По каталогу для приведенных условий выбираем фильтр (табл. 1.34).

3. Определим гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки ΔP_n . Эта величина включает потери напора за счет самой перегородки ($\Delta P'_n$) и за счет осевшей на перегородку пыли ($\Delta P''_n$):

$$\Delta P_n = \Delta P'_n + \Delta P''_n.$$

а. Рассчитаем $\Delta P'_n$ по выражению:

$$\Delta P'_n = K_n \cdot \mu \cdot \omega^n,$$

где K_n – параметр, характеризующий сопротивление фильтровальной перегородки, м^{-1} ;

μ – динамическая вязкость газа, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

ω – скорость фильтрования, м/с ;

n – показатель степени, зависящий от режима течения газа сквозь перегородку (для ламинарного режима $n = 1$, для турбулентного больше 1).

Пользуясь справочными данными, примем $K_n = 900 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $\omega = 0,04 \text{ м/с}$.

б. Определим величину $\Delta P''_n$ по уравнению:

$$\Delta P_n = \mu \cdot \tau \cdot C_{вх} \cdot \omega^2 \cdot K_1,$$

где τ – продолжительность фильтровального цикла, с;

$C_{вх}$ – концентрация пыли на входе в фильтр, кг/м^3 ;

K_1 – параметр сопротивления слоя пыли, м/кг .

$K_1 = 5,5 \cdot 10^9 \text{ м/кг}$ для частиц пыли с размерами от 10 до 50 мкм, при размере частиц менее 10 мкм – $20 \cdot 10^9 \text{ м/кг}$, $\tau = 600 \text{ с}$.

4. Найдем гидравлическое сопротивление фильтра в целом:

$$\Delta P_\phi = \Delta P_k + \Delta P_n,$$

где ΔP_k – гидравлическое сопротивление корпуса аппарата.

4.1. Рассчитаем скорость газа во входном патрубке:

$$v_{вх} = \frac{V}{3600 S_{вх}},$$

где $S_{вх}$ – площадь входного патрубка фильтра, равная произведению длины патрубка на его ширину: $0,77 \cdot 0,55 = 0,42 \text{ м}$.

4.2. Определим гидравлическое сопротивление корпуса аппарата

$$\Delta P_k = \frac{\xi_k \cdot v^2 \cdot \rho_g}{2},$$

где ξ_k – коэффициент гидравлического сопротивления корпуса, равный $\xi_k = 2$;

5. Исходя из расхода газа и сопротивления установки общее гидравлическое сопротивление равно:

$$\Delta P_{общ} = \Delta P_c + \Delta P_\phi,$$

6. По каталогу и техническим характеристикам выбираем вентилятор ВД-5 с номинальным расходом $V_n = 10000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и гидравлическим сопротивлением $\Delta P_n = 2500 \text{ Па}$. Определим мощность электродвигателя вентилятора:

$$N = \frac{V \cdot \Delta P_{общ}}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_k \cdot \eta_v},$$

где ΔP – гидравлическое сопротивление фильтра, Па ;

η_k – КПД передачи (для клиноременной передачи принимается равным 0,93);

η_v – КПД вентилятора.

7. Вывод.

Значения нормативной удельной газовой нагрузки

Значение $q_n, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$				
3,5	2,6	2	1,7	1,2
Комбикорм Мука Зерно Жмыховая смесь Пыль кожи Опилки Табак Картонная пыль Поливинилхлорид после распылительной сушилки	Асбест Волокнистые и целлюлозные материалы Пыль при выбив- ке отливок из форм, гипс, из- весть гашеная, пыль от полиров- ки Соль, песок Пыль песко- струйных аппара- тов, тальк Кальцинирован- ная сода	Глинозем Цемент Керамические красители Уголь Плавиковый шпат Резина Каолин Известняк Сахар Пыль горных пород	Кокс Летучая зола Металлопорошки Окислы металлов Пластмассы Красители Силикаты Крахмал Смолы сухие Химикаты из неф- тесырья	Активированный уголь Технический уг- лерод Моющие веществ- ва Порошковое мо- локо Возгоны цветных и черных метал- лов

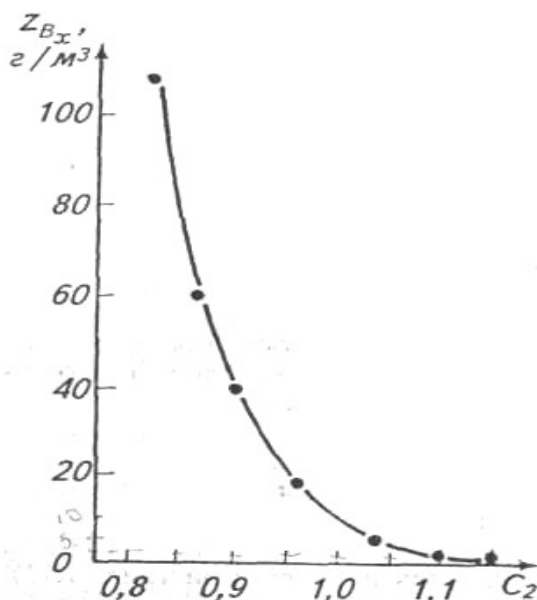


Рис. 1.72. Зависимость коэффициента C_2 от концентрации пыли

Таблица 1.37

**Значения коэффициента C_3 ,
учитывающего влияние
дисперсного состава пыли**

Медианный размер частиц пыли, мкм	Коэффициент C_3
Свыше 100	1,2—1,4
50—100	1,1
10—50	1
3—10	0,9
Меньше 3	0,7—0,9

Таблица 1.38

**Значения коэффициента C_4 ,
учитывающего влияние
температуры t°**

t°	20	40	60	80	100	120	140	160
C_4	1	0,9	0,84	0,78	0,75	0,73	0,72	0,70

Техническая характеристика

Показатель	Типоразмер фильтра				
	ФРКИ-30	ФРКИ-60	ФРКИ-90	ФРКИ-180	ФРКИ-360
Код ОКП	36 4631 1001	36 4631 1002	36 4631 1003	36 4631 1005	36 4631 1006
Площадь фильтрующей поверхности, м ² , не более	30	60	90	180	360
Количество рукавов	36	72	108	144	288
Диаметр рукава, мм	135	135	135	135	135
Высота рукава, м	2	2	2	3	3
Количество электромагнитов	3	6	9	12	24
Количество мембранных клапанов	6	12	18	24	48
Количество секций	1	2	3	4	8
Удельная газовая нагрузка, м ³ /м ² · мин, не более	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Допустимая запыленность газа, г/м ³	20	20	20	20	20
Гидравлическое сопротивление, кПа (кгс/м ²)	1,2—2 (120—200)	1,2—2 (120—200)	1,2—2 (120—200)	1,2—2 (120—200)	1,2—2 (120—200)
Давление продувочного воздуха, Мпа (кгс/см ²)	0,3 (3)—0,6 (6)	0,3 (3)—0,6 (6)	0,3 (3)—0,6 (6)	0,3 (3)—0,6 (6)	0,3 (3)—0,6 (6)
Наибольший расход сжатого воздуха, м ³ /ч	10	20	30	60	120
Допустимое давление (разрежение) внутри аппарата, кПа (кгс/м ²)	5 (500)	5 (500)	5 (500)	5 (500)	5 (500)
Размер L ₁ , мм	1300	2700	4000	5300	5300
Габаритные размеры, мм:					
длина L	1460	2820	4140	5480	5850
ширина	2030	2030	2030	2030	4340
высота	3595	3595	3595	4520	4880
Масса с рукавами, т, не более	1,28	2,06	2,99	4,58	9,86

Вопросы и задания:

1. Провести расчет рукавного фильтра согласно варианту
2. Перечислить группы устройств для очистки газа от твердых частиц. Дать характеристику рукавным фильтрам
3. Назовите фильтровальные элементы рукавного фильтра
4. Как происходит регенерация фильтра
5. Виды фильтровальных материалов

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. - 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / В.М. Потехин, В.В. Потехин. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. - 940 с.

Практическая работа №16. Расчет электрофильтра

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Широкое применение электрофильтров для улавливания твердых и жидких частиц обусловлено их универсальностью и высокой степенью очистки газов при сравнительно низких энергозатратах. Установки электрической очистки газов работают с эффективностью до 99 %, а в ряде случаев и до 99,9 %, причем улавливают частицы любых размеров, включая и субмикронные, при концентрации частиц в газе до 50 г/м³ и выше.

Промышленные электрофильтры применяются в диапазоне температур до 400-450 °С, в некоторых случаях и при более высоких температурах, а также в условиях воздействия различных коррозионных сред. Электрофильтры могут работать как под разрежением, так и под давлением очищаемых газов. Системы пыле- и золоулавливания с применением электрофильтров могут быть полностью автоматизированы.

Электрофильтры отличаются относительно низкими эксплуатационными затратами. Гидравлическое сопротивление правильно спроектированного электрофильтра не превышает 100-150 Па, т.е. является минимальным по сравнению с другими газоочистными аппаратами; затраты электроэнергии составляют обычно 0,36-1,8 МДж (0,1-0,5 кВт·ч) на 1000 м³ газа.

Преимущественной областью применения электрофильтров является очистка больших объемов газа, отходящих от современных агрегатов большой мощности, например, от мощных котельных агрегатов, для которых разработаны электрофильтры единичной производительностью по газу свыше 1 млн.м³/ч. Экономически оправдано применение электрофильтров и в установках производительностью по газу всего несколько тысяч кубических метров в час. В ряде случаев электрофильтры используются для очистки и меньших объемов газа из-за отсутствия других технических средств.

К недостаткам электрофильтров можно отнести высокую чувствительность процесса электрической очистки газов к отклонениям от заданного технологического режима, а также к незначительным механическим дефектам внутреннего оборудования, которые могут явиться результатом недостаточно тщательного проведения монтажных работ или неквалифицированного обслуживания при эксплуатации.

Электрофильтры не применяются, если очищаемый газ представляет собой взрывоопасную смесь или такая смесь может образоваться в ходе процесса в результате

отклонения от нормального технологического режима, так как при работе электрофильтра неизбежно возникновение искровых разрядов.

Сущность процесса электрической фильтрации газов заключается в следующем. Газ, содержащий взвешенные частицы, проходит через систему, состоящую из заземленных осадительных электродов и размещенных на некотором расстоянии (называемом межэлектродным промежутком) коронирующих электродов, к которым подводится выпрямленный электрический ток высокого напряжения (рисунок 1). При достаточно большом напряжении приложенном к межэлектродному промежутку, у поверхности коронирующего электрода происходит интенсивная ударная ионизация газа, сопровождающаяся возникновением коронного разряда (короны), который на весь межэлектродный промежуток не распространяется и затухает по мере уменьшения напряженности электрического поля в направлении осадительного электрода.

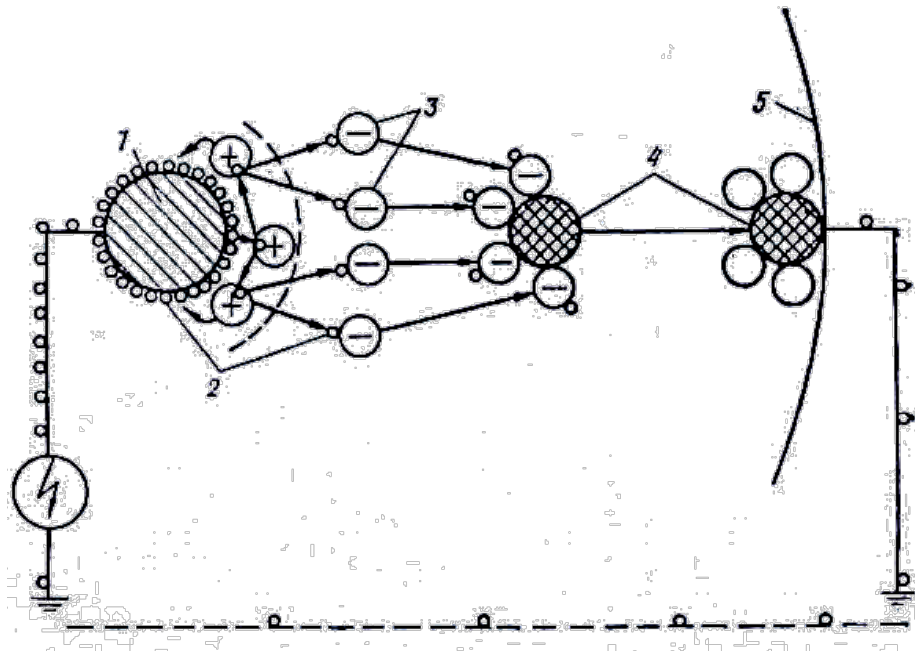


Рисунок 1 – Принцип действия электрофильтра:

1 – коронирующий электрод; 2 – электроны; 3 – ионы; 4 – частицы пыли;
5 – осадительный электрод

Газовые ионы различной полярности, образующиеся в зоне короны, под действием сил электрического поля движутся к разноименным электродам, вследствие чего в межэлектродном промежутке возникает электрический ток.

Улавливаемые частицы из-за адсорбции на поверхности ионов приобретают в межэлектродном промежутке электрический заряд и под влиянием сил электрического поля движутся к электродам, осаждаясь на них. Основное количество частиц осаждается на развитой поверхности осадительных электродов, меньшая их часть попадает на коронирующие электроды. По мере накопления на электродах осажденные частицы удаляются встряхиванием или промывкой последних.

Конструктивная схема электрофильтров представлена на рисунке 2.

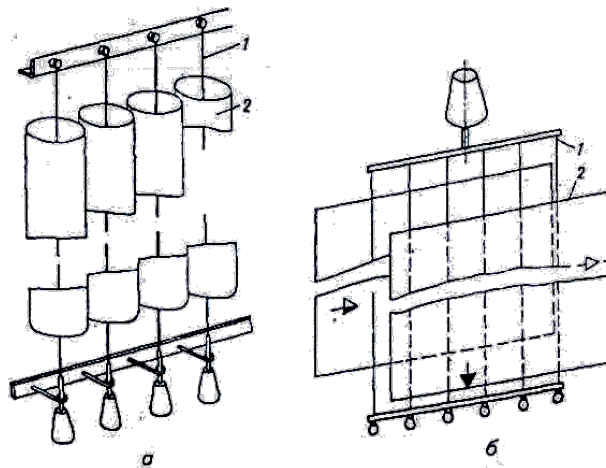


Рисунок 2 – Принципиальная схема электрофилтра:

а – электрофилтр с трубчатыми электродами; б – электрофилтр с пластинчатыми электродами; 1 – коронирующие электроды; 2 – осадительные электроды

Пример

Подобрать серийную конструкцию электрофилтра для очистки отходящего запыленного сушильного агента после барабанной сушилки, если сушильный агент имеет температуру 120 °С, размер частиц в потоке газа лежит в диапазоне 5-40 мкм, объем очищаемого потока газа равен 30 тыс. м³/ч, степень очистки его должна быть не ниже 99,8 %.

Решение:

Определяем величину скорости дрейфа частиц размером 5 и 40 мкм. Напряженность электрического поля в ходе очистки примем равной $30 \cdot 10^4$ В/м, что характерно для электрофилтров сухой очистки:

$$v_d(5) = 0,059 \cdot 10^{-10} E^2 d_T / \mu = 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot (30 \cdot 10^4)^2 \cdot 5 \cdot 10^{-6} / 2,25 \cdot 10^{-5} = 0,118 \text{ м/с};$$

$$v_d(40) = 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot (30 \cdot 10^4)^2 \cdot 40 \cdot 10^{-6} / 2,25 \cdot 10^{-5} = 0,944 \text{ м/с}.$$

Определим время, необходимое для осаждения частиц размером 5 мкм, т.к. они имеют в 8 раз меньшую скорость дрейфа. Выбираем электрофилтр типа УГМ с расстоянием между коронирующим и осадительным электродами 135 мм, путем движения запыленного потока в электрофилтре l , равным 2,58 м. Расчет $\tau_{ос}$ проводим по формуле:

$$\tau_{ос}(5) = \Delta R / v_d(5) = 0,135 / 0,118 = 1,14 \text{ с}.$$

На практике скорость дрейфа обычно оказывается в 1,5÷2 раза ниже теоретической. Тогда определяем необходимую величину активного сечения электрофилтра по формуле:

$$S = (1,5 \div 2) \left[V / (3600 \cdot v_d) \right] \Delta R / l = 1,75 \left[30000 / (3600 \cdot 0,118) \right] \cdot 0,135 / 2,58 = 6,47 \text{ м}^2.$$

По найденной величине активного сечения из каталога выбираем электрофилтр УГМ-2-7 с фактической площадью активного сечения 7 м² и площадью осаждения $f = 320$ м².

Степень очистки сушильного агента в данном электрофилтре определяем по уравнению:

$$\eta = \left[1 - \exp(-v_d f) \right] \cdot 100 = \left[1 - \exp(-0,118 \cdot 320) \right] \cdot 100 = 100 \text{ \%}.$$

Полученная величина степени очистки выше заданной, поэтому выбранный тип электрофилтра обеспечит необходимую степень пылеочистки.

Проверяем необходимое условие осаждения частиц в данном электрофилт্রে. Средняя скорость движения в электрофилт্রে с горизонтальным движением потока запыленного газа лежит в пределах $0,5 \div 1$ м/с. Для проверки необходимого условия осаждения примем верхний предел скорости движения газового потока, тогда

$$\tau_n = \frac{l}{v_2} = \frac{2,58}{1} = 2,58 \text{ с.}$$

Таким образом, $\tau_{oc} < \tau_n$, следовательно филтър выбран правильно.

Вопросы и задания:

1. Ознакомиться с устройством и характеристиками электрофилтра, примером расчета аппарата
2. Устройство электрофилтра
3. Типы электрофилтров
4. Расчет аппарата.

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Технология переработки нефти : в 2 ч. : учеб.пособие / [О. Ф. Глаголева, В. М. Капустин, Т. Г. Гюльмисарян [и др.]] ; под ред. О. Ф. Глаголевой, В. М. Капустина, Ч.1, Первичная переработка нефти. – М. : Химия : КолосС, 2005. – 400 с. – Гриф: Доп. МО.

Практическая работа №17. Расчет абсорбера

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Очистка газовых выбросов заключается в разделении газовой смеси на составные части путем поглощения одного или нескольких газовых компонентов смеси жидким поглотителем (абсорбентом) с образованием раствора. Движущей силой процесса является градиент концентрации на границе газ-жидкость.

Растворенный в жидкости газ за счет диффузии проникает во внутренний слой абсорбента. Процесс идет тем быстрее, чем больше поверхность раздела фаз, турбулентность потоков и коэффициент диффузии. Решающим условием при выборе абсорбента является растворимость в нем извлекаемого компонента и ее зависимость от температуры и давления. Для улавливания аммиака, хлористого или фтористого водорода диоксида серы и некоторых других газов используется вода [2].

Контакт газового потока с жидким растворителем осуществляется пропусканием газа через насадочную колонну, барботажом газа через слой абсорбирующей жидкости или распылением жидкости. В зависимости от реализуемого способа контакта газа и жидкости различают: насадочные колонны (рисунок 2), форсуночные и центробежные скрубберы, скрубберы Вентури, барботажно-пенные, тарельчатые и другие скрубберы.

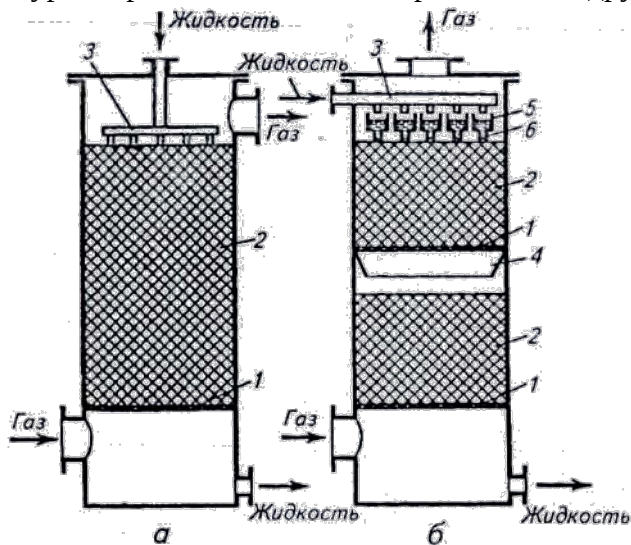


Рисунок 1 – Насадочные абсорберы:

а – со сплошной загрузкой насадки; б – с послойной загрузкой насадки; 1 – поддерживающие решетки; 2 – насадка; 3 – устройство для распределения жидкости; 4 – перераспределитель; 5 – желоб; 6 – патрубок

Задача 1.

Рассчитать абсорбер для улавливания бензольных углеводородов из коксового газа каменно-угольным маслом при следующих условиях: производительность по газу при нормальных условиях $V_0 = 13,9 \text{ м}^3/\text{с}$; концентрация бензольных углеводородов в газе при нормальных условиях: на входе в абсорбер $y_H = 35 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$; на выходе из абсорбера $y_K = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$; содержание углеводородов в поглотительном масле, подаваемом в абсорбер, $x_H = 15 \% \text{ мас.}$; температура процесса $t = 30^\circ \text{C}$; давление газа на входе в абсорбер $p = 0,119 \text{ МПа}$.

Решение

Улавливание бензольных углеводородов из коксового газа каменно-угольным маслом представляет собой процесс многокомпонентной абсорбции, когда из газа одновременно поглощается смесь компонентов – бензол, толуол, ксилол и растворители.

Инертная часть коксового газа состоит из $\text{H}_2, \text{CH}_4, \text{CO}, \text{N}_2, \text{CO}_2, \text{O}_2, \text{NH}_3$ и др. Сложным является состав масла – смесь моно- и бициклических ароматических углеводородов, гетероциклических соединений с примесью фенолов. Для упрощения расчетов газовая смесь и поглотитель рассматриваются как бинарные, состоящие из распределяемого компонента (бензольные углеводороды БУ) и инертной части.

Геометрические размеры колонного массообменного аппарата определяются в основном поверхностью массопередачи, необходимой для данного процесса и скоростями потоков.

Поверхность массопередачи может быть найдена из основного уравнения массопередачи:

$$F = \frac{M}{K_x \Delta \bar{x}_{cp}} = \frac{M}{K_y \Delta \bar{y}_{cp}},$$

где K_x, K_y – коэффициенты массопередачи соответственно по жидкой и газовой фазам, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$;

M – масса поглощенного вещества.

Коэффициенты массопередачи определяются из технологического расчета абсорбера в газовой фазе $K_y = 5,09 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$.

Масса поглощенного вещества и расход поглотителя определяется следующим образом.

Массу бензольных углеводородов (БУ), переходящих в процессе абсорбции из газовой смеси (Г) в поглотитель за единицу времени, находят из уравнения материального баланса:

$$M = G(\bar{y}_H - \bar{y}_K) = L(\bar{x}_K - \bar{x}_H),$$

где L, G – расходы соответственно чистого поглотителя и инертной части газа, кг/с ;

$\bar{x}_H, \bar{x}_K$ – начальная и конечная концентрация БУ в поглотительном масле, кгБУ/кгМ ;

$\bar{y}_H, \bar{y}_K$ – начальная и конечная концентрация БУ в газе, кгБУ/кгГ .

Выразим составы фаз, нагрузки по газу и жидкости в выбранной для расчета размерности:

$$\bar{y}_H = \frac{y_H}{\rho_{0y} - y_H},$$

$$\bar{x}_H = \frac{x_H}{100 - x_H},$$

где ρ_{0y} – средняя плотность коксового газа при нормальных условиях, $\rho_{0y} = 0,44$ кг/м³.
Получим:

$$\bar{y}_H = \frac{35 \cdot 10^{-3}}{0,44 - 35 \cdot 10^{-3}} = 0,0864 \frac{\text{кгБУ}}{\text{кгГ}},$$

$$\bar{y}_K = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{0,44 - 2 \cdot 10^{-3}} = 0,0045 \frac{\text{кгБУ}}{\text{кгГ}},$$

$$\bar{x}_H = \frac{0,15}{100 - 0,15} = 0,0015 \frac{\text{кгБУ}}{\text{кгМ}}.$$

Конечная концентрация БУ в поглотительном масле $\bar{x}_K$ обуславливает его расход (который влияет на размеры абсорбера и десорбера), а также часть энергетических затрат, связанных с перекачиванием жидкости и ее регенерации. Поэтому $\bar{x}_K$ выбирают исходя из оптимального расхода поглотителя. Для коксохимических производств расход поглотительного масла L принимают в 1,5 раза больше минимального $L_{\min}$. Тогда уравнение материального баланса имеет вид:

$$M = L_{\min} (\bar{x}_{yH} - \bar{x}_H) = 1,5 L_{\min} (\bar{x}_K - \bar{x}_H),$$

где $\bar{x}_{yH}$ – концентрация БУ в жидкости, равновесной с газом начального состава.
Отсюда:

$$\bar{x}_K = \frac{(\bar{x}_{yH} + 0,5 \bar{x}_H)}{1,5} = \frac{0,0432 + 0,5 \cdot 0,0015}{1,5} = 0,0293 \frac{\text{кгБУ}}{\text{кгМ}}.$$

Расход инертной части газа:

$$G = V_0 (1 - y_{об}) (\rho_{0y} - y_H),$$

где $y_{об}$ – объемная доля бензольных углеводородов в газе, равная:

$$y_{об} = \frac{y_H v_0}{M_{БУ}},$$

где $M_{БУ}$ – молярная масса бензольных углеводородов, $M_{БУ} = 83$.

$$y_{об} = \frac{35 \cdot 10^{-3} \cdot 22,4}{83} = 0,0094 \frac{\text{м}^3 \text{БУ}}{\text{м}^3 \text{Г}},$$

тогда:

$$G = 13,9 (1 - 0,0094) (0,44 - 0,035) = 5,577 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Производительность абсорбера по поглощаемому компоненту:

$$M = G (\bar{y}_H - \bar{y}_K) = 5,577 (0,0864 - 0,0045) = 0,457 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Расход поглотителя (масла) равен:

$$L = \frac{M}{(\bar{x}_K - \bar{x}_H)} = \frac{0,457}{0,0293 - 0,0015} = 16,44 \text{ кг/с.}$$

Условный расход поглотителя составит:

$$l = \frac{L}{G} = \frac{16,44}{5,577} = 2,94 \text{ кг/кг.}$$

Для определения поверхности массопередачи нужно определить величину $\Delta \bar{y}_{cp}$ – среднюю движущую силу на входе в аппарат и на выходе из него, кгБУ/кгГ.

$$\Delta \bar{y}_{cp} = \frac{\Delta \bar{y}_6 - \Delta \bar{y}_m}{\ln \frac{\Delta \bar{y}_6}{\Delta \bar{y}_m}},$$

где $\Delta \bar{y}_6, \Delta \bar{y}_m$ – большая и меньшая движущая сила на входе потоков в абсорбер и на выходе из него, кгБУ/кгГ

$$\Delta \bar{y}_6 = \Delta \bar{y}_H - \Delta \bar{y}_{\bar{x}_K},$$

$$\Delta \bar{y}_m = \Delta \bar{y}_K - \Delta \bar{y}_{\bar{x}_H},$$

где $\Delta \bar{y}_{\bar{x}_H}$ и $\Delta \bar{y}_{\bar{x}_K}$ – концентрации БУ в газе, равновесные с концентрациями в жидкой фазе (поглотителе) соответственно на входе и выходе из абсорбера.

$$\Delta \bar{y}_6 = 0,0864 - 0,0586 = 0,0278 \text{ кгБУ/кгГ,}$$

$$\Delta \bar{y}_m = 0,0045 - 0,0030 = 0,0015 \text{ кгБУ/кгГ,}$$

$$\Delta \bar{y}_{cp} = \frac{0,0278 - 0,0015}{\ln \frac{0,0278}{0,0015}} = 0,009 \text{ кгБУ/кгГ.}$$

Поверхность массопередачи равна:

$$F = \frac{0,457}{5,09 \cdot 10^{-4} \cdot 0,009} = 10^5 \text{ м}^2.$$

Диаметр абсорбера определяется из выражения:

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi v}} = \sqrt{\frac{4V_0 \frac{T_0 + t}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p}}{\pi v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 13,9 \frac{273 + 30}{273} \cdot \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,19 \cdot 10^5}}{3,14 \cdot 1,21}} = 3,71 \text{ м,}$$

где v – рабочая скорость газа в абсорбере, м/с, $v = 1,21$ м/с.

Принимаем ближайший больший стандартный диаметр $D = 3,8$ м.

Для определения высоты абсорбера используем выражение:

$$H = \frac{F}{0,785 \cdot a \cdot D^2 \cdot \psi_a},$$

где a – удельная поверхность насадки, м²/м³. Примем $a = 65$ м²/м³.

ψ_a – активная поверхность насадки. Примем $\psi_a = 0,95$.

Тогда:

$$H = \frac{10^5}{0,785 \cdot 65 \cdot 3,8^2 \cdot 0,95} = 143 \text{ м.}$$

Обычно высота аппарата не превышает 40-50 м, поэтому примем 4 абсорбера с высотой насадки в 36 м.

Расчет высоты насадочной части абсорбера ведем с учетом 20-25 решеток с насадкой. Расстояние между ярусами обычно 0,3-0,5 м.

Если примем число решеток 25, расстояние между ними 0,3 м, то высота насадочной части абсорбера равна:

$$H_H = H + 0,3 \left(\frac{H}{0,25l} - 1 \right) = 36 + 0,3 \left(\frac{36}{25 \cdot 0,1} - 1 \right) = 40 \text{ м.}$$

Примем расстояние от насадки до верхнего днища $Z_B = 1,4$ м (для установки каплеотбойника, устройства для орошения). Расстояние от насадки до нижнего днища примем $Z_H = 2,5$ м (для равномерного распределения газа по сечению абсорбера и слоя насыщенного абсорбента)

$$H = H_H + Z_B + Z_H = 40 + 1,4 + 2,5 = 43,9 \text{ м.}$$

Задача 2.

Требуется поглощать чистой водой 1 т сернистого газа в час из газов обжигательных печей, содержащих 5 об.% SO_2 (остальное азот). Количество орошающей воды взять на 20 % больше минимально необходимого. Полноту улавливания SO_2 принять за 90 %. Общее давление, под которым ведется поглощение, 760 мм.рт.ст. Температура воды 20°.

Определить среднюю движущую силу в скруббере (в ат).

Растворимость SO_2 в воде при 20° дана в таблице 1.

Таблица 1

Количество весовых частей SO_2 растворенных в 100 весовых частях воды	1	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1 5	0,1	0,05	0,02
Парциальное давление SO_2 над раствором, мм.рт.ст.	59	39	26	14, 1	8,4	5,8	3,2	1,2	0,5

Решение:

Парциальное давление SO_2 во входящем газе внизу скруббера:

$$p_H = 760 \cdot 0,05 = 38 \text{ мм. рт. ст.}$$

Из данных таблицы 1 следует, что этому давлению соответствует в растворе (при равновесии) 0,69 кг SO_2 на 100 кг воды.

Общее количество поглощаемого SO_2 – 1000 кг. Отсюда минимальное количество поглощающей воды:

$$L_{\min} = \frac{1000}{0,69} \cdot 100 = 145000 \text{ кг/ч или } 145 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Действительное количество поглощающей воды:

$$L = 145 \cdot 1,2 = 174 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Движущая сила процесса абсорбции наверху скруббера (в мм.рт.ст.)

$$\Delta p_B = p_B - p_B^*$$

Объемный процент SO_2 в выходящем из скруббера газе

$$\frac{5(1-0,9)}{95+5(1-0,9)} \cdot 100 = 0,52 \%$$

откуда:

$$p_B = 760 \cdot 0,0052 = 3,95 \text{ мм.рт.ст.}$$

$$p_B^i = 0, \text{ т.к. на орошение подается чистая вода.}$$

Следовательно:

$$\Delta p_B = 3,95 - 0 = 3,95 \text{ мм.рт.ст.}$$

Движущая сила процесса абсорбции внизу скруббера:

$$\Delta p_H = p - p_H^i.$$

Как было найдено выше:

$$p_H = 38 \text{ мм.рт.ст.}$$

В воде, вытекающей внизу из скруббера, содержится SO_2 :

$$\frac{1000}{174000} \cdot 100 = 0,575 \text{ кг } \text{SO}_2/\text{кг воды.}$$

Из данных о растворимости SO_2 в воде следует, что этому содержанию SO_2 в растворе (при равновесии) соответствует парциальное давление 30,87 мм.рт.ст.

Следовательно:

$$\Delta p_H = 38 - 30,87 = 7,13 \text{ мм.рт.ст.}$$

Принимая приближенно равновесную линию за прямую, находим среднюю движущую силу для всего процесса:

$$\Delta p_{cp} = \frac{7,13 + 3,95}{2} = 5,54 \text{ мм.рт.ст. или } \frac{5,54}{760} = 0,0073 \text{ ат.}$$

Вопросы и задания:

1. Ознакомиться с методикой расчета аппарата
2. Устройство и характеристики аппарата
3. Порядок расчета согласно методике.

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. - 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / В.М. Потехин, В.В. Потехин. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. - 940 с.
4. Технология переработки нефти : в 2 ч. : учеб.пособие / [О. Ф. Глаголева, В. М. Капустин, Т. Г. Гюльмисарян [и др.]] ; под ред. О. Ф. Глаголевой, В. М. Капустина, Ч.1, Первичная переработка нефти. - М. : Химия : КолосС, 2005. - 400 с. - Гриф: Доп. МО.

Практическая работа №18. Расчет адсорбера

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Адсорбционные методы используют для очистки газов с невысоким содержанием газообразных и парообразных примесей. В отличие от абсорбционных методов они позволяют проводить очистку при повышенных температурах. Применяются как физическая, так и химическая адсорбция. Применяют также и каталитические процессы газоочистки, когда токсичные примеси за счет химических взаимодействий превращают в менее токсичные в присутствии катализаторов. При этом катализаторы наносят на инертные носители (силикагели, оксид алюминия, цеолиты и т.д.).

Для указанных процессов необходима высокоразвитая поверхность межфазового контакта очищаемого газа и адсорбента или катализатора.

Адсорбенты должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) иметь большую адсорбционную способность – поглощать большие количества адсорбтива при малой его концентрации в газовой фазе;
- 2) обладать высокой селективностью;
- 3) быть химически инертными по отношению к компонентам разделяемой смеси;
- 4) иметь высокую механическую прочность;
- 5) обладать способностью к регенерации;
- 6) иметь низкую стоимость.

Наиболее широко применяют следующие адсорбенты: активные угли, силикагели, алюмогели, цеолиты, которые отличаются друг от друга природой материала, адсорбционными свойствами, размерами гранул, плотностью. Рекомендации по использованию адсорбентов для тех или иных процессов приведены в [1].

В настоящее время применяют адсорберы различных конструкций:

- 1) с неподвижным слоем адсорбента;
- 2) с подвижным слоем адсорбента;
- 3) с псевдооживленным слоем адсорбента.

На рисунке 1 представлены схемы адсорберов.

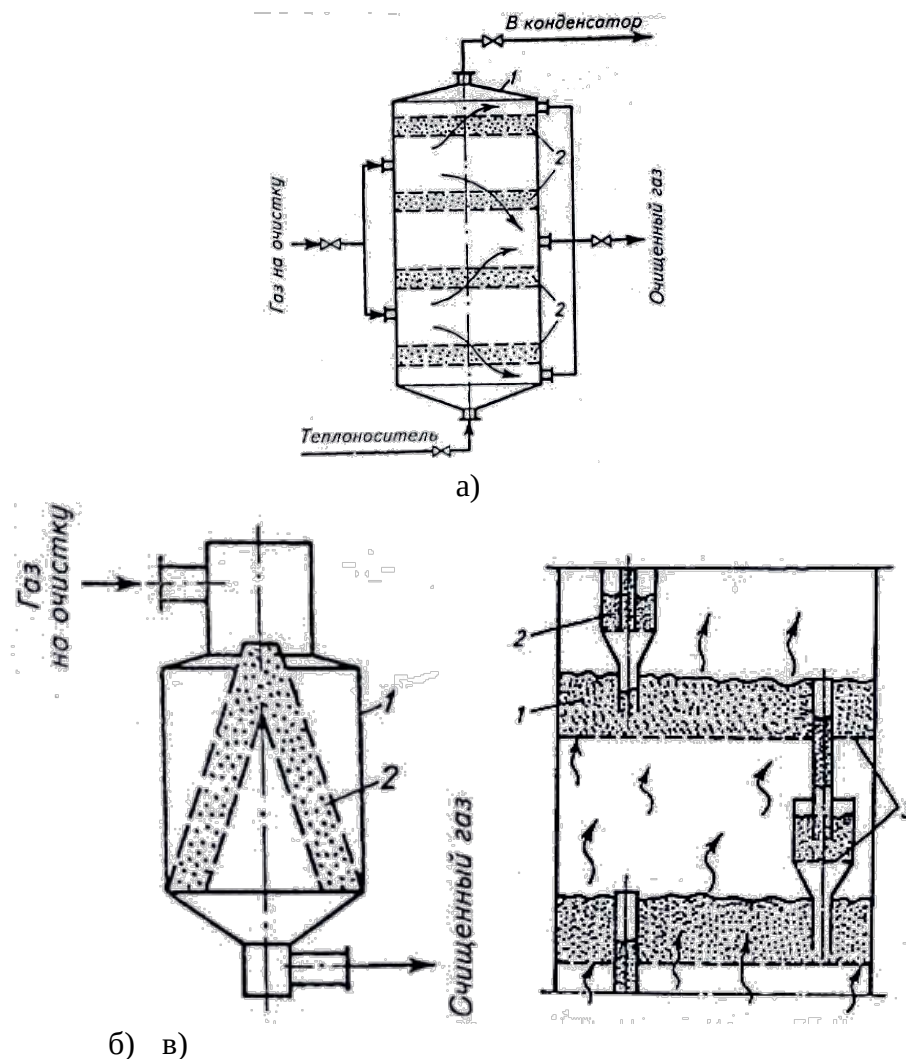


Рисунок 1 – Схемы адсорберов:

а – адсорбер полочный с неподвижным адсорбентом: 1 – корпус аппарата; 2 – слой адсорбента;

б – адсорбер с кольцевым слоем адсорбента: 1 – корпус; 2 – слой адсорбента;

в – адсорбер с псевдооживленным слоем адсорбента: 1 – основной псевдооживленный слой; 2 – дополнительный слой; 3 – решетки.

Задача 1

Определить количество активированного угля, необходимое для поглощения 100 кг паров бензина из смеси с воздухом. Начальная концентрация бензина $C_0 = 20$ г/м³; скорость $\omega = 14$ м/мин.

Активность угля по бензину 7 %; остаточная активность после десорбции 0,8 мас. %; насыпной вес угля $\Delta = 0,5$ г/см³. Рассчитать продолжительность периода поглощения и диаметр адсорбера, полагая, что высота слоя угля в нем не должна превышать 0,8 м.

Решение:

Фактическая активность угля:

$$7 - 0,8 = 6,2 \text{ \%мас.}$$

Для поглощения 100 кг паров бензина в адсорбер нужно загрузить активированного угля:

$$G_{\text{угля}} = \frac{G_{\text{бензина}} \cdot 100\%}{6,2} = \frac{100 \cdot 100}{6,2} = 1613 \text{ кг.}$$

Длительность адсорбции определяется по формуле:

$$\tau = \frac{100}{C_0 \omega} = \frac{100}{0,02 \cdot 14,0} = 357 \text{ мин} \approx 6 \text{ ч.}$$

При высоте слоя в адсорбенте $L=0,8$ м диаметр адсорбера:

$$D_a = \sqrt{\frac{G_{\text{угля}} \cdot 4}{\Delta \cdot L \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{1613 \cdot 4}{500 \cdot 0,8 \cdot 3,14}} = \sqrt{5,14} = 2,3 \text{ м.}$$

$$\Delta = 0,5 \text{ г/см}^3 = 500 \text{ кг/м}^3.$$

Задача 2.

По опытным данным продолжительность поглощения паров хлорпикрина ($C_0=6,6$ г/см³) слоем активированного угля высотой $L=5$ см и сечением $S=100$ см² при скорости $v=30$ л/мин составляет $\tau=336$ мин. По изотерме хлорпикрина активность угля $a_{\text{ст}}=0,222$ г/см³.

Диаметр частиц угля $d_3=1,5$ мм.

Определить: коэффициент защитного действия слоя K ; потерю времени защитного действия τ_0 ; величину динамических характеристик B_1 и B_2 .

Решение:

Процесс адсорбции в динамических условиях можно также охарактеризовать временем, прошедшим от начала пропускания парогазовой смеси через слой адсорбента до момента появления адсорбируемого вещества за слоем адсорбента.

Этот промежуток времени называется временем защитного действия слоя поглотителя, или продолжительностью адсорбции, и определяется из уравнения Шилова:

$$\tau = KL - \tau_0,$$

где τ – продолжительность адсорбции, ч или мин.;

K – коэффициент защитного действия слоя, ч/м или мин/см;

L – высота слоя адсорбента, м или см;

τ_0 – кинетический коэффициент или потеря времени защитного действия слоя, ч или мин.

Коэффициент защитного действия слоя можно вычислить по формуле:

$$K = \frac{a_D}{\omega \cdot C_0},$$

где a_D – динамическая активность сорбента;

ω – скорость паро-газовой смеси, отнесенная к свободному сечению аппарата;

C_0 – начальная концентрация адсорбируемого вещества в паро-газовой смеси.

Определим линейную скорость паров по объемной скорости и поперечному сечению адсорбера:

$$\omega = \frac{V}{S} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-4}} = 3 \text{ м/мин.}$$

По изотерме активность адсорбента в статических условиях $a_{\text{ст}}$ и в динамических условиях a_D связаны отношением:

$$\frac{a_D}{a_{\text{ст}}} \leq 0,85 \div 0,95.$$

Тогда:

$$a_D = 0,85 a_{cm} = 0,85 \cdot 0,222 = 0,189 \text{ г/см}^3.$$

Далее получим:

$$K = \frac{a_D}{\omega C_0} = \frac{0,189 \cdot 10^6}{3 \cdot 6,6} = 9550 \text{ мин/м} = 160 \text{ ч/м}$$

Потеря времени защитного действия равна:

$$\tau_0 = KL_X - \tau = 9550 \cdot 0,05 - 336 = 142 \text{ мин.}$$

Экспериментально установлено, что для одного и того же адсорбента и поглощаемого вещества при постоянных концентрации и температуре паро-газового потока, имеют место следующие соотношения, называемые динамическими характеристиками B_1 и B_2 :

$$B_1 = K_1 \cdot \omega_1 = K_2 \cdot \omega_2 = const,$$
$$B_2 = \frac{\tau_{0-1} \sqrt{\omega_1}}{d_{3-1}} = \frac{\tau_{0-2} \sqrt{\omega_2}}{d_{3-2}} = const,$$

где K – коэффициент защитного действия;

ω – скорость паро-газового потока;

τ_0 – потеря времени защитного действия слоя;

d_3 – средний диаметр зерен адсорбента (зернение).

$$B_1 = K \cdot \omega = 9550 \cdot 3 = 28700,$$

$$B_2 = \frac{\tau_0 \sqrt{\omega}}{d_3} = \frac{143 \sqrt{3}}{0,0015} = 164000.$$

Вопросы и задания:

1. Ознакомиться с методикой расчета аппарата
2. Требования к адсорбентам
3. Конструкции адсорберов
4. Виды адсорберов
5. Особенности расчета аппарата.

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии : учебник для вузов / А. И. Скобло, Ю. К. Молоканов, А. И. Владимиров, В. А, Щелкунов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 2000. – 677 с.

4. Основные процессы и аппараты химической технологии : пособие по проектированию / [Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и др.] ; под ред. Ю. И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1991. – 496 с.

Практическая работа №19. Расчет теплообменных аппаратов

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Расчет теплообменного аппарата включает определение необходимой поверхности теплопередачи, выбор типа аппарата и вариант конструкции готового теплообменника, удовлетворяющих заданным технологическим условиям оптимальным образом.

Необходимую поверхность теплопередачи F определяют из основного уравнения теплопередачи

$$F = \frac{Q}{K t_{cp}} \quad (1)$$

где F – поверхность теплопередачи, m^2 ;

Q - тепловая нагрузка, Вт;

K – коэффициент теплопередачи, $Вт/м^2K$;

t_{cp} - средняя движущая сила $^{\circ}C$, K .

Предварительный расчет поверхности теплопередачи

1. Тепловую нагрузку Q в соответствии с заданными технологическими условиями находят из уравнения теплового баланса для одного из теплоносителей

а) Если агрегатное состояние теплоносителя не меняется, т.е. теплоноситель нагревается или охлаждается, то

$$Q = G_i C_{pi} (t_{нач} - t_{кон})_i \quad (2)$$

где G_i – массовый расход теплоносителя, $кг/с$;

C_{pi} – теплоемкость, $Дж/кг K$;

$t_{нач i}(t_{кон i})$ - начальная (конечная) температура теплоносителя

$i = 1, 2$

б) Если теплоноситель – кипящая жидкость, а также, если теплоноситель – насыщенный пар, который конденсируется без охлаждения конденсата:

$$Q = G_i r_i \quad (3)$$

где r_i - теплота парообразования, $Дж/кг$.

в) Если теплоноситель - пар, конденсирующийся с дальнейшим охлаждением конденсата:

$$Q = G_i (I_i - C_{pi} t_{кон i}) \quad (4)$$

где I_i – удельная энтальпия пара, Дж/кг.

Расчет теплообменника проводят без учета тепловых потерь, предполагая их незначительными.

2. Для расчета средней движущей силы теплопередачи необходимо знать движущую силу при входе (выходе) теплоносителей, т.е. t_6 и t_m . Тогда

$$\text{если } \frac{t_6}{t_m} \leq 2, \quad \text{то} \quad t_{cp} = \frac{t_6 + t_m}{2} \quad (5)$$

$$\text{если } \frac{t_6}{t_m} > 2, \quad t_{cp} = \frac{t_6 - t_m}{\ln \frac{t_6}{t_m}} \quad (6)$$

В случае если один теплоноситель кипит за счет тепла конденсации второго теплоносителя при постоянном давлении, тогда температуры кипения и конденсации остаются постоянными в течение всего процесса, и

$$t_{cp} = t_{\text{конд}} - t_{\text{кип}} \quad (7)$$

Условие: конденсат отводится при температуре конденсации.

3. Задаемся ориентировочным значением $K_{\text{ориент}}$

(Дальнейший расчет приведен для кожухотрубчатого теплообменника).

Для этого

- или выбираем подходящий вариант теплообмена и соответствующее значение коэффициента теплопередачи из таблицы [1, табл.4.8], [2, табл.2.1],

- или выбираем ориентировочные значение коэффициентов теплоотдачи из соответствующей таблицы [1, табл.4.7] и ориентировочные значение теплового сопротивления стенки теплообменника, а затем рассчитываем коэффициент теплопередачи по уравнению аддитивности:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_{\text{тр}}} + \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{мтр}}} \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{тр}}$ и $\alpha_{\text{мтр}}$ – коэффициенты теплоотдачи, Вт/м²К;

$\sum \frac{\alpha_i}{\alpha_i}$ – сумма термических сопротивлений стенки и загрязнений

Этот вариант дает более приближенное к реальному значению величину коэффициента теплопередачи.

4. Рассчитываем ориентировочное значение $F_{\text{ориент}}$ по формуле (1), используя $K_{\text{ориент}}$ и подбираем подходящий теплообменник.

Пользуясь $F_{\text{ориент}}$ выбираем подходящий теплообменник. Для этого могут быть использованы различные данные (информация производителей теплообменников – проспекты, интернет сайты, справочные данные, например [1, табл.4.12], [2, табл.2.3], [2, табл.2.9]).

Для того, чтобы сузить область подходящих конструкций для теплообменников – холодильников и конденсаторов проводят дополнительный расчет и оценивают число труб (N) в одном ходу (z)- величину N/z.

В теплообменниках-холодильниках (конденсаторах) в трубном пространстве движется жидкий теплоноситель. Для расчета предполагаем для него турбулентное течение ($Re > 10000$). Определим N/z_{ориент}, заранее выбрав внутренний диаметр $d_{\text{вн}}$ труб теплообменника из таблиц, где приведены поверхности теплообменников соответствующих конструкций.

$$Re = \frac{v d_3}{\mu} = \frac{G}{\left(\frac{d_3^2}{4}\right) \frac{N}{z_{\text{ориент}}}} \frac{d_3}{\mu} = 10000$$

$$\frac{N}{z_{\text{ориент}}} = \frac{4G}{10000 d_3} \quad (9)$$

где d_3 – эквивалентный диаметр трубного пространства, $d_3 = d_{\text{вн}}$, м;

v – скорость теплоносителя в трубе, м/с;

ρ – плотность теплоносителя, кг/м³;

μ – динамическая вязкость, Па·с;

Выбираем конструкцию из таблицы, например, теплообменников-холодильников [2, табл.2.3], и находим $F_{\text{табл}}$ и $N/z_{\text{табл}}$ при выбранном d_3 с учетом $F_{\text{табл}} \approx F_{\text{ориент}}$, $N/z_{\text{табл}} < N/z_{\text{ориент}}$. Записываем значения табличных параметров для выбранного теплообменника.

Уточняющий расчет поверхности теплопередачи

Цель расчета - определить «Обеспечивает ли данный теплообменник с поверхностью $F_{\text{табл}}$ требуемые параметры теплообмена?»

Для этого мы рассчитаем поверхность теплообмена $F_{\text{расч}}$, соответствующую заданным условиям и сравниваем ее с поверхностью выбранного теплообменника $F_{\text{табл}}$.

Поскольку Q – уже рассчитано, необходимо уточнить величину $t_{\text{ср}}$ и заново рассчитать коэффициент теплопередачи. Основной задачей здесь является расчет коэффициента теплопередачи. Для его нахождения следует рассчитать коэффициенты теплоотдачи для трубного и межтрубного пространств теплообменника.

1 шаг

Расчет коэффициента теплоотдачи при охлаждении (нагревании) теплоносителя

а). При течении жидкости в прямых трубах и каналах и турбулентном режиме течения $Re > 10000$ теплоотдача описывается следующим корреляционным соотношением

$$Nu = 0,021 \cdot \varepsilon_l \cdot Re^{0,80} \cdot Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \quad (10)$$

где ε_l – коэффициент, учитывающий увеличение теплообмена в коротких трубах за счет роста турбулентности; при соотношении $L/d_{\text{внутр}} > 50$ $\varepsilon_l = 1$;

$Pr = C_p \mu / \lambda$ критерий Прандтля;

$Nu = \alpha l / \lambda$ критерий Нуссельта.

Все свойства находятся при определяющей температуре – средней температуре теплоносителя в трубах.

l – определяющий (характеристический) размер. Для труб – это эквивалентный диаметр d_3 .

Критерий Прандтля $Pr_{\text{ст}}$ определяется при температуре стенки.

Дальнейший расчет будет итерационным. Для первой итерации предполагают отношение $Pr/Pr_{\text{ст}} = 1$.

Вычислив критерий Нуссельта Nu , определим коэффициент теплоотдачи в трубном пространстве α_1 .

б). При течении жидкости в прямых трубах и каналах и переходном режиме течения $2300 < Re < 10000$ ($GrPr$) $< 8 \cdot 10^5$ надежных корреляционных соотношений для расчета теплоотдачи не имеется. Для данной области, для определения Nu и расчета α_1 можно воспользоваться графиком [1. Рис.4-1].

(Gr – критерий Грасгофа $Gr = g l^3 \rho \beta \Delta t / \mu$, где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; l – определяющий размер, м ; β – температурный коэффициент объемного расширения, К^{-1} ; $\Delta t = t_{\text{ср}} - t_{\text{ст}}$)

в) При расчете межтрубного пространства кожухотрубчатых теплообменников следует воспользоваться соотношением для многократно-перекрестного движения теплоносителей. Такой характер движения имеет место при наличии в межтрубном пространстве межтрубных перегородок для интенсификации теплообмена.

Сначала следует определить скорость в межтрубном пространстве v_2 :

$$v_2 = \frac{V_2}{S_2} \quad (11)$$

где V_2 – объемный расход теплоносителя в межтрубном пространстве, $\text{м}^3/\text{с}$;

S_2 – наименьшая площадь межтрубного пространства теплообменника, м^2 .

Затем следует рассчитать критерий Re .

- При $Re < 1000$

$$Nu = 0,336 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \quad (12)$$

- При $Re > 1000$

$$Nu = 0,24 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \quad (13)$$

Приведенные формулы применимы для шахматных пучков труб.

Определяющим размером в критериях Re и Nu принят наружный диаметр труб.

Все свойства находятся при определяющей температуре – средней температуре теплоносителя в межтрубном пространстве.

В результате расчета мы получим коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве α_2 .

Вопросы и задания:

1. Ознакомиться с методикой расчета поверхности теплопередачи
2. Основное уравнение теплопередачи
3. Определение тепловой нагрузки
4. Определение турбулентного течения
5. Рассчитать коэффициенты теплоотдачи
6. Критерий Прандтля
7. Критерий Нуссельта
8. Определение скорости в межтрубном пространстве

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.

2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>

3. Леонтьева, А. И. Оборудование химических производств : учеб. / А. И. Леонтьева. – Москва : Химия : КолосС, 2008. – 479 с.

4. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / В.М. Потехин, В.В. Потехин. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. - 940 с.

Практическая работа №20. Расчет коэффициента теплоотдачи при конденсации теплоносителя

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Расчет приведен для пленочной конденсации насыщенного пара, не содержащего примесей неконденсирующихся газов (воздуха, азота). Процесс осуществляется на наружной поверхности труб в межтрубном пространстве кожухотрубчатого теплообменника.

Коэффициент теплоотдачи при конденсации вычисляется по-разному в зависимости от расположения труб. Для вертикальных труб $\alpha_{\text{конд}}$ вычисляется следующим образом:

$$\alpha_{\text{конд}} = 1,15 \left(\frac{\rho^3 \rho^2 r g}{H t} \right)^{1/4} \quad (14)$$

Для горизонтально расположенного теплообменника $\alpha_{\text{конд}}$ можно найти по формуле (15):

$$\alpha_{\text{конд}} = 0,72 \left(\frac{\rho^3 \rho^2 r g}{d t} \right)^{1/4} \quad (15)$$

где свойства конденсата (λ - теплопроводность, ρ - плотность и μ - динамическая вязкость) взяты при определяющей температуре $t = (t_{\text{конд}} + t_{\text{ст}})/2$;

r – удельная теплота парообразования при температуре конденсации, Дж/кг;

$\Delta t = t_{\text{конд}} - t_{\text{ст}}$

H – высота труб при вертикальном расположении труб, м;

d – наружный диаметр труб, м;

ϵ - множитель, учитывающий число рядов при горизонтальном расположении труб (для шахматного расположения труб $\approx 0,6$).

Определение коэффициентов теплоотдачи по этим формулам требует задания температуры стенки $t_{\text{ст}}$ со стороны пара.

В некоторых случаях можно воспользоваться следующим упрощением. Выразим Δt из уравнения теплоотдачи при конденсации, подставим в него поверхность труб и величину Q из уравнения (3):

$$t = \frac{Q}{F \alpha_{\text{конд}}} = \frac{Q}{d H N_{\text{конд}}} = \frac{G_{\text{пара}} r}{d H N_{\text{конд}}}$$

Подставим это выражение в уравнения (14) и (15) и получим следующие зависимости для расчета $\alpha_{\text{конд}}$:

- для вертикального теплообменника

$$\alpha_{\text{конд}} = 3,78 \left(\frac{\alpha^2 dN}{G_{\text{пара}}} \right)^{1/3} \quad (16)$$

- для горизонтального теплообменника с шахматным расположением труб длиной L

$$\alpha_{\text{конд}} = 2,02 \left(\frac{\alpha^2 NL}{G_{\text{пара}}} \right)^{1/3} \quad (17)$$

Теплофизические свойства конденсата берутся при температуре конденсации.

Таким образом, использование ур (16) и (17) для расчета $\alpha_{\text{конд}}$ приводит к упрощению расчетов из-за отсутствия итераций (в этом случае не задаются температурой, которую впоследствии следует проверять), но и к снижению точности.

Замена поверхности теплообмена (пленки конденсата) на поверхность теплообменных труб, использование в качестве определяющей - температуру конденсации может привести к значительной ошибке в расчетах, особенно если конденсируется водяной насыщенный пар.

2 шаг

Рассчитываем коэффициент теплопередачи по уравнению аддитивности по формуле (8), используя вычисленные коэффициенты теплоотдачи для трубного и межтрубного пространств теплообменника, учитывая термические сопротивления стенок и загрязнений [1, табл.XXXI],[2, табл.2.2].

3 шаг

Уточняем при необходимости значение средней движущей силы [2, ур.2.7]:

$$t_{\text{ср}} = \alpha_t t_{\text{ср противотока}} \quad (18)$$

4 шаг

Вычисляем поверхность теплопередачи $F_{\text{рассч}}$ по формуле (1).

Сравниваем $F_{\text{табл}}$ и $F_{\text{рассч}}$ и находим запас поверхности:

$$\text{Запас} = \frac{F_{\text{табл}} - F_{\text{рассч}}}{F_{\text{рассч}}} 100 \quad (19)$$

Если запас достаточен, т.е. удовлетворяет наложенным ограничениям, то данный теплообменник подходит. Но следует провести дополнительные расчеты, а именно, уточнить значения коэффициентов теплоотдачи и, соответственно, $F_{\text{рассч}}$.

Для этого, используя полученные значения коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{\text{тр}}$ и $\alpha_{\text{мтр}}$ и $F_{\text{рассч}}$, следует рассчитать температуры стенок, с помощью уравнений теплоотдачи.

Зная температуры стенок, можно рассчитать критерии $R_{\text{гст}}$ или $\alpha_{\text{конд}}$. Затем следует повторить шаги 2-4 с уточненными значениями $\alpha_{\text{тр}}$ и $\alpha_{\text{мтр}}$. Если погрешность в расчетах $F_{\text{рассч}}$ не более 5 %, то расчет закончен и теплообменник выбран. Иначе расчет следует повторить до сходимости результатов (Эту процедуру проводят по требованию)

Если запас недостаточен, то необходимо выбрать новый теплообменник с учетом полученной при расчете информации, и провести его расчет аналогично сделанному ранее. Такой перебор теплообменников осуществляется до тех пор, пока не будет получен запас поверхности, удовлетворяющий наложенным ограничениям.

Вопросы и задания:

1. Ознакомиться с методикой расчета для пленочной конденсации насыщенного пара
2. Расчет для вертикальных труб
3. Расчет для горизонтально расположенного теплообменника
4. Особенности расчета температуры конденсации
5. Расчет коэффициента теплопередачи по уравнению аддитивности.

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности

"Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.

2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>

3. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии : учебник для вузов / А. И. Скобло, Ю. К. Молоканов, А. И. Владимиров, В. А, Щелкунов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 2000. – 677 с.

4. Основные процессы и аппараты химической технологии : пособие по проектированию / [Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и др.] ; под ред. Ю. И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1991. – 496 с.

Практическая работа №21. Расчет кипятильника

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

В качестве кипятильника рассмотрим кожухотрубчатый теплообменник. Это должен быть вертикальный одноходовой аппарат, в трубном пространстве которого кипит жидкость, в межтрубном пространстве – конденсируется насыщенный пар.

Выразим коэффициенты теплоотдачи как функции от удельной тепловой нагрузки q .

Коэффициент теплоотдачи при кипении $\alpha_{\text{кип}}$:

$$\alpha_{\text{кип}} = 780 \frac{\lambda^{1,3} \sigma^{0,5} \mu_n^{0,08}}{\rho^{0,5} r^{0,6} c^{0,3} \rho_{n,0}^{0,66} \mu^{0,3}} q^{0,6} = A q^{0,6} \quad (20)$$

Где $\lambda, \rho, \sigma, \mu$ – теплопроводность, плотность, поверхностное натяжение, вязкость жидкости; $\rho_{\text{п0}}, \rho_{\text{п}}$ – плотность пара при атмосферном рабочем давлении; r – теплота парообразования.

Коэффициент теплоотдачи при конденсации на вертикальных трубах $\alpha_{\text{конд}}$ можно также представить как функцию удельной тепловой нагрузки q , подставив в уравнение (14) Δt из

уравнения теплоотдачи при конденсации $t = \frac{Q}{F \alpha_{\text{конд}}} = \frac{q}{\alpha_{\text{конд}}}$:

$$\alpha_{\text{конд}} = 1,21 \sqrt[3]{\frac{\lambda^2 r g}{H}} q^{\left(-\frac{1}{3}\right)} = B q^{\left(-\frac{1}{3}\right)} \quad (21)$$

Запишем уравнение (8), заменив K на выражение из основного уравнения теплопередачи $K = \frac{q}{t_{\text{ср}}}$:

$$\frac{t_{\text{ср}}}{q} = \frac{1}{\alpha_{\text{кип}}} + \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{конд}}}$$

Подставим в это уравнение выражение для $\alpha_{\text{кип}}$ (ур.20) и $\alpha_{\text{конд}}$ (ур.21):

$$\frac{t_{\text{ср}}}{q} = \frac{1}{A q^{0,6}} + \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i}{\alpha_i} + \frac{1}{B q^{\left(-\frac{1}{3}\right)}}$$

Данное уравнение содержит только одну переменную q в неявной форме.

После решения этого уравнения и определения q , можно рассчитать поверхность теплообменника

$$F_{\text{расч}} = \frac{Q}{q}$$

Таким образом, для выбора теплообменника-кипятильника необходимо задаваться только одним параметром – длиной труб (H для вертикально расположенного теплообменника, ур.21). Используя величину H и $F_{\text{рассч}}$, подбираем соответствующий кипятильник с поверхностью теплообмена $F_{\text{рассч}}$ и рассчитываем запас поверхности для него. Теплообменник с наиболее удовлетворяющим требованиям запасом поверхности является искомым.

Вопросы и задания:

1. Ознакомиться с методикой расчета кипятильника
2. Что применяют в качестве кипятильника
3. Особенности расчета

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / [Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Барабаш и др.] / [под ред. Г. М. Островского], Ч.1. – СПб. : Профессионал, 2004. – 848 с.

Практическая работа №22. Расчет массообменных аппаратов

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

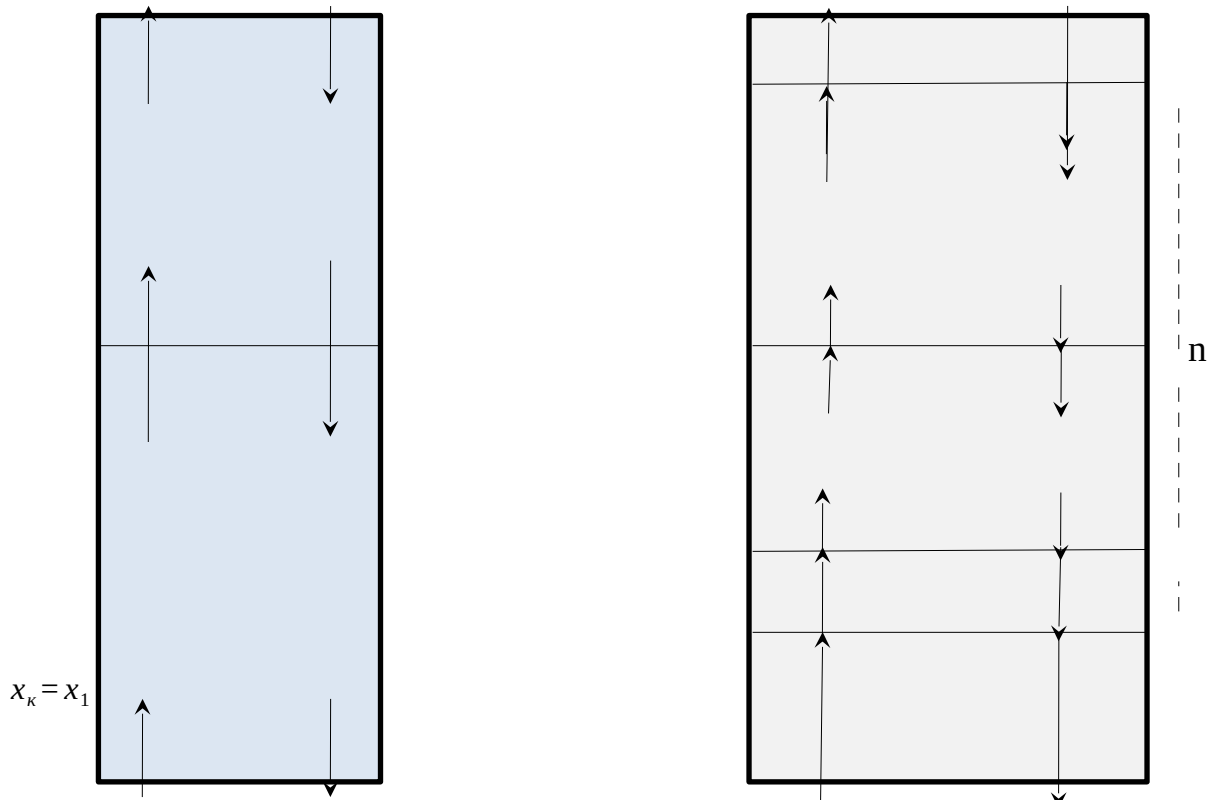
- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

1. Материальные балансы

Применяемые для массообмена в системах газ (пар) – жидкость [Г(П)–Ж], и жидкость-жидкость [Ж–Ж] аппараты принято подразделять на две группы: с **непрерывным** и **ступенчатым контактом фаз**. Принципиальные схемы аппаратов обоих типов показаны на рис. 1:



а)

б)

Рис. 1 Принципиальные схемы противоточных колонных аппаратов:

а – с непрерывным контактом фаз; б – со ступенчатым.

К аппаратам с **непрерывным контактом фаз** относятся насадочные, барботажные, распылительные колонны. К аппаратам со ступенчатым контактом фаз относят тарельчатые колонны. В обоих случаях назначение насадки или тарельчатых устройств состоит в развитии поверхности контакта взаимодействующих фаз.

Технологический расчет этих аппаратов состоит в определении основных размеров: внутреннего сечения (затем диаметра) и высоты рабочей части. При этом в случае аппаратов с непрерывным контактом фаз определяют высоту насадочной (рабочей) части, а для аппаратов со ступенчатым контактом фаз ищут число тарелок, из которого, зная расстояние между тарелками, также определяют рабочую высоту.

Рассматривая методы расчета, ограничимся случаем, когда в массообмене участвует только один из компонентов. Тогда каждую из взаимодействующих фаз можно считать бинарным раствором, состоящим из распределяемого (переносимого из одной фазы в другую) и инертного компонентов (все остальные компоненты данной фазы). Например, при абсорбции аммиака из воздуха водой газовая фаза состоит из аммиака (распределяемый компонент) и воздуха (смесь газов – инертный компонент), а жидкая – из воды и аммиака. В этом случае, для определения состава фазы достаточно указать концентрацию распределяемого компонента в фазе (y – в газовой, x – в жидкой).

В качестве исходных данных при расчете, например, абсорбционных аппаратов обычно заданы начальный состав и расход исходной смеси (G_n, y_n) и конечная концентрация извлекаемого компонента (y_k), а также характеристики абсорбента (L_n, x_n).

Материальный баланс непрерывного процесса абсорбции в установившихся условиях может быть представлен для всего аппарата следующей системой уравнений:

$$G_n y_n + L_n x_n - G_k y_k - L_k x_k = 0 \quad (1)$$

$$G_n (1 - y_n) - G_k (1 - y_k) = 0 \quad (2)$$

$$L_n (1 - x_n) - L_k (1 - x_k) = 0 \quad (3)$$

$$G_n + L_n - L_k - G_k = 0 \quad (4)$$

В этих уравнениях концентрации распределяемого компонента выражены в мольных (молярных) долях, расходы фаз – мольные (кмоль смеси/с). Если составы фаз задаются в массовых долях, то расходы будут массовыми (кг смеси/с). При этом первое уравнение – материальный баланс, составленный по распределяемому компоненту, второе и третье выражения – материальные балансы по инертным компонентам, четвертое уравнение – материальный баланс для смесей.

Материальные балансы для абсорбции упрощаются при выражении составов фаз в относительных концентрациях (кг распределяемого компонента/кг инертного компонента или кмоль распределяемого компонента/кмоль инертного компонента). Тогда материальный баланс по распределяемому компоненту приобретает вид:

$$G_{ин} (Y_n - Y_k) = L_{ин} (X_n - X_k) = M \quad (5)$$

где:

$$G_{ин} = G_n (1 - y_n) = G_k (1 - y_k) = G (1 - y)$$

$$L_{ин} = L_n (1 - x_n) = L_k (1 - x_k) = L (1 - x)$$

$$Y = \frac{y}{1 - y} \quad X = \frac{x}{1 - x}$$

x, y – средние концентрации в произвольном сечении;
 M – полный массовый или мольный поток распределяемого компонента, переносимого из одной фазы в другую.

Кроме уравнений (1-5), выражающих материальный баланс для всего аппарата, можно составить подобные выражения, описывающие работу части массообменного аппарата или отдельных его ступеней.

Материальные балансы такого рода, представляющие собой зависимости между средними составами взаимодействующих фаз в каком-либо сечении аппарата, называют **уравнениями рабочих линий**.

В зависимости от способа выражения состава фаз рабочие линии могут быть описаны следующими уравнениями:

$$y = \frac{L}{G}x + \frac{G_n y_n}{G} - \frac{L_k x_k}{G} = \frac{L}{G}x + \frac{G_k y_k}{G} - \frac{L_n x_n}{G} \quad (6)$$

$$Y = \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X + Y_n - \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X_k = \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X + Y_k - \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X_n \quad (7)$$

При выражении составов фаз в относительных концентрациях (X, Y) уравнения рабочих линий являются прямыми. При использовании других концентраций, эти уравнения линейны только в случае малого расхода фаз.

При существенном изменении расхода фаз уравнение (6) должно быть дополнено балансовыми соотношениями для инертных компонентов, которые позволяют находить расходы фаз в любом сечении аппарата.

$$G(1-y) = G_n(1-y_n) = G_k(1-y_k) \quad (8)$$

$$L(1-x) = L_n(1-x_n) = L_k(1-x_k) \quad (9)$$

$$G-L = G_k - L_n = G_n - L_k \quad (10)$$

Для противоточных аппаратов со ступенчатым контактом фаз (рис. 1б) уравнения рабочих линий связывают концентрацию распределяемого компонента в фазе, выходящей из какой-либо ступени, например n -ой с его концентрацией в другой фазе, поступающей на ту же ступень – $y_n(x_{n+1})$ (см. рис. 1б) или $Y_n(X_{n+1})$:

$$y_n = \frac{L_{n+1}}{G_n}x_{n+1} + \frac{G_n y_n}{G_n} - \frac{L_k x_k}{G_n} = \frac{L_{n+1}}{G_n}x_{n+1} + \frac{G_k y_k}{G_n} - \frac{L_n x_n}{G_n} \quad (11)$$

$$Y_n = \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X_{n+1} + Y_n - \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X_k = \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X_{n+1} + Y_k - \frac{L_{ин}}{G_{ин}}X_n \quad (12)$$

Следует отметить, что выражения (11) и (12) справедливы в отсутствие взаимного уноса фаз. При этом структура потоков внутри ступени может быть произвольной.

Как и для аппаратов с непрерывным контактом, если расходы фаз меняются по высоте аппарата – т.е. зависят от номера ступени, уравнение (11) не линейно и должно быть дополнено балансовыми соотношениями для инертных компонентов:

$$G_n(1-y_n) = G_n(1-y_n) = G_k(1-y_k) \quad (13)$$

$$L_{n+1}(1-x_{n+1}) = L_n(1-x_n) = L_k(1-x_k) \quad (14)$$

$$G_n - L_{n+1} = G_k - L_n = G_n - L_k \quad (15)$$

2. Определение диаметра противоточных колонн.

Расчет поперечного сечения противоточных абсорбционных колонн проводят по уравнению расхода:

$$V = W_0 S = W_0 \frac{\pi d^2}{4} \quad (16)$$

где: V – объемный расход **сплошной** (газовой) фазы, м³/с;
 S – поперечное сечение, м²;
 d – диаметр колонны, м;
 W_0 – фиктивная скорость **сплошной** фазы, м/с.

Площадь поперечного сечения противоточных аппаратов должна быть такой, чтобы скорости фаз не превышали значений, при которых происходит нарушение противоточного движения – так называемое «захлебывание» колонны.

В абсорбционных аппаратах предельная производительность характеризуется минимальной фиктивной скоростью газовой фазы, выше которой при определенном соотношении расходов фаз наблюдается нарушение противотока. В экстракционных колоннах режим захлебывания определяется по предельному значению суммарной фиктивной скорости обеих фаз. Предельные скорости позволяют найти минимально допустимые при заданной производительности площади поперечного сечения аппаратов и, соответственно, минимально требуемые диаметры. Диаметр колонн больше минимального выбирают с учетом действующих стандартов таким, чтобы колонна работала при скоростях фаз, близких к оптимальным.

Например, для тарельчатых колонн, диапазон эффективной работы тарелок характеризуется произведением $w_0 \sqrt{\rho_y}$ и для колпачковых тарелок должно соблюдаться условие $0,48 < w_0 \sqrt{\rho_y} < 2,8$ (здесь: w_0 – скорость газовой фазы в м/с, отнесенная к полному сечению колонны, ρ_y – плотность газовой фазы в кг/м³).

Предельную скорость газовой или паровой фазы для насадочных колонн (скорость захлебывания) можно рассчитать по известным эмпирическим выражениям, приведенным в специальной литературе.

3. Расчет высоты массообменных противоточных аппаратов

Как было отмечено ранее, основная задача расчета размеров колонных противоточных аппаратов состоит в определении высоты рабочей зоны и поперечного сечения колонны.

Существует два основных метода расчета высоты рабочей зоны колонных аппаратов:

1. **Метод, основанный на понятии теоретической ступени разделения.**
2. **Расчет на основе коэффициентов (уравнения) массопередачи.**

Оба этих способа применяют как для аппаратов с непрерывным контактом фаз, так и со ступенчатым. По мере изложения будут отмечены различия, характерные для этих типов колонн.

3. Расчет высоты аппаратов с непрерывным контактом фаз

Расчет на основе понятия теоретической ступени разделения.

Для этого типа аппаратов определение числа теоретических ступеней разделения N_T основывается на предположении, что процесс проводится в аппарате со ступенчатым контактом фаз, каждая из ступеней которого является теоретической.

Под теоретической ступенью разделения подразумевается аппарат или часть аппарата, из которого выходят фазы, находящиеся в состоянии равновесия. Для аппаратов, работающих в

изотермических условиях, состояние равновесия для n-го участка может быть представлено в виде уравнений (см. рис. 16):

$$y_n = y^*(x_n) \quad \text{или} \quad Y_n = Y^*(X_n) \quad (17)$$

Расчет числа теоретических ступеней проводят по уравнениям (11-15) с учетом соотношения (17), которые должны выполняться для любого n, т.е. для всех ступеней.

Возможный алгоритм расчета приведен на рис. 2:

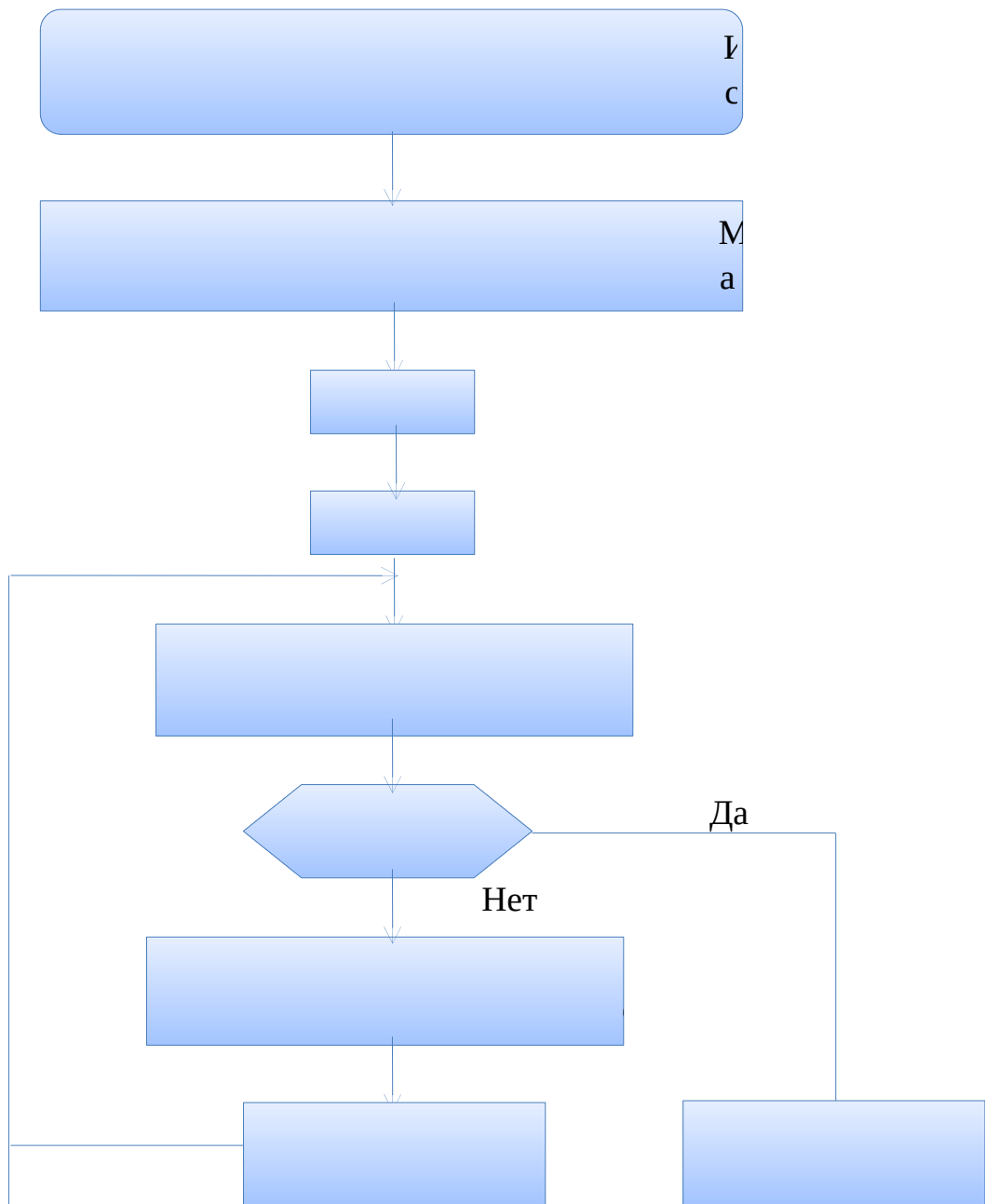


Рис. 2 Алгоритм расчета числа теоретических ступеней разделения

Как правило, задача абсорбции состоит в удалении из газовой смеси какого-либо компонента. Тогда известны величины G_n , y_n , y_k , характеризующие расход, состав и степень очистки газовой смеси, а также исходные характеристики абсорбента L_n , x_n . Если задача состоит в приготовлении раствора, например, аммиачной воды, то вместо y_k должна быть задана величина x_k .

Расчет начинают с определения по уравнениям материального баланса (11-15) конечного состава другой фазы и конечных расходов обеих фаз. Далее последовательно, от ступени к ступени, определяют составы фаз, выходящих со всех ступеней. Концентрацию в газовой фазе находят из выражения (17), а состав жидкой – из уравнений (11-15). Расчет продолжают до тех пор, пока y_n не станет меньше или равным y_k . Номер ступени, при котором это условие

удовлетворяется, равен числу теоретических ступеней N_T . При этом может быть обеспечена заданная степень извлечения распределяемого компонента.

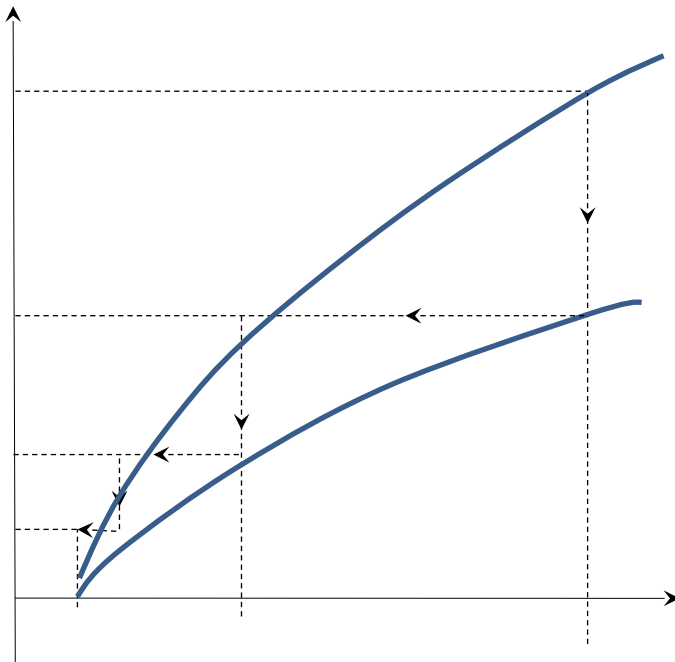


Рис. 3 Иллюстрация расчета числа теоретических ступеней разделения.

$y(x)$ – рабочая линия; $y^*(x)$ – равновесная. Число точек на равновесной линии, полученных при построении, определяет число теоретических ступеней разделения (в данном случае – 3).

Алгоритм расчета можно проиллюстрировать графически, как показано на рис. 3.

Высота рабочей части аппарата вычисляется по выражению:

$$H = (\text{ВЭТС}) \times N_T, \quad (18)$$

где: ВЭТС – высота, эквивалентная теоретической ступени (м).

Неудобство метода состоит в том, что ВЭТС определяется по опытным данным или из эмпирических уравнений. Например, для газожидкостных насадочных колонн используют уравнение:

$$\text{ВЭТС} = 70 \left(\frac{\rho_y w_y}{d_n \mu_x} \right)^{-0,5}$$

где: d_n – размер насадки, μ_x – вязкость жидкой фазы.

Вопросы и задания:

1. Ознакомиться с методикой расчета массообменных аппаратов
2. На какие группы делятся аппараты для массообмена
3. Технологический расчет этих аппаратов
4. Уравнения рабочих линий.
5. Уравнения для противоточных аппаратов со ступенчатым контактом фаз
6. Определение диаметра противоточных колонн
7. Расчет высоты массообменных противоточных аппаратов
8. Расчет высоты аппаратов с непрерывным контактом фаз.

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Технология переработки нефти : в 2 ч. : учеб.пособие / [О. Ф. Глаголева, В. М. Капустин, Т. Г. Гюльмисарян [и др.]] ; под ред. О. Ф. Глаголевой, В. М. Капустина, Ч.1, Первичная переработка нефти. – М. : Химия : КолосС, 2005. – 400 с. – Гриф: Доп. МО.
4. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / [Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Барабаш и др.] / [под ред. Г. М. Островского], Ч.1. – СПб. : Профессионал, 2004. – 848 с.

Практическая работа №23. Расчет высоты аппаратов со ступенчатым контактом фаз

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

1. Расчет на основе понятия теоретической ступени разделения (теоретической тарелки).

Отличительной особенностью тарельчатых аппаратов по сравнению с аппаратами с непрерывным контактом фаз является дискретность контакта взаимодействующих фаз, т.е. процесс массопередачи имеет место только на тарелке, а между тарелками фазы считают не взаимодействующими.

В этом случае рабочая линия не является сплошной, а представляется точками, в каждой из которых средние концентрации распределяемого компонента в фазах взяты для отдельных сечений колонны.

Расчет числа ступеней ведется также снизу вверх от тарелки к тарелке с использованием уравнений рабочих линий $y_n(x_{n+1})$ или $Y_n(X_{n+1})$ (уравнения 11 и 12) и равновесных зависимостей $y_n^*(x_n)$ или $Y_n^*(X_n)$ (соотношения 17). Отметим, что указанные зависимости справедливы в отсутствие взаимного уноса фаз. Алгоритм расчета тот же, что приведен на рис. 2.

При известной средней эффективности η (среднего коэффициента полезного действия ступени), число реальных ступеней (действительных тарелок) N находят из выражения:

$$N = N_m / \eta \quad (40)$$

Основная трудность метода – поиск среднего КПД η , значение которого, как правило, берется для известных конструкций тарелок и близких по свойствам смесей. Его значение вычисляется по известным эмпирическим корреляциям, которые можно найти в специальной литературе.

2. Расчет на основе уравнения массопередачи.

Полученные ранее выражения для чисел единиц переноса широко используются для расчета тарельчатых колонных аппаратов. При этом обычно определяют коэффициент эффективности контактного устройства (тарелки) E_y по Мэрффи. Тогда для "n"- ной тарелки имеем для газовой фазы:

$$E_y = \frac{y_{n-1} - y_n}{y_{n-1} - y_n^*(x_n)} \quad (41)$$

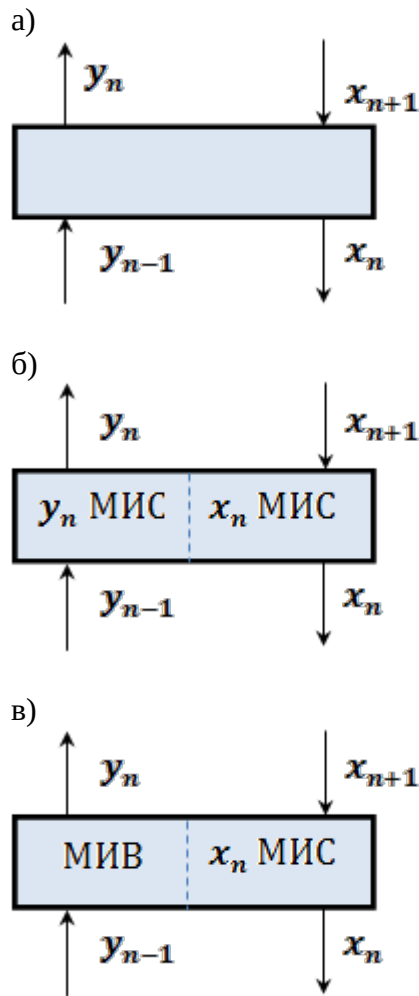


Рис. 6 Схематическое изображение "n"-ной тарелки (а); режим идеального смешения (МИС) в обеих фазах (б); режим идеального вытеснения (МИВ) в газовой фазе и режим идеального смешения (МИС) в жидкой фазе (в).

Эффективность по Мэрффри очень просто связать с числами единиц переноса, которые в данном случае рассматриваются **в пределах тарельчатого устройства**.

Так, в случае режима идеального смешения в обеих фазах на "n"-ной тарелке будем иметь (см. выражение 39 и рис. 6б):

$$n_{0y} = \frac{y_{n-1} - y_n}{y_n - y^*(x_n)} \quad (39')$$

Преобразуем (39') следующим образом, добавляя и вычитая из знаменателя y_{n-1} :

$$\begin{aligned} n_{0y} &= \frac{y_{n-1} - y_n}{y_n - y^*(x_n) + y_{n-1} - y_{n-1}} = \frac{1}{\frac{y_{n-1} - y^*(x_n)}{y_{n-1} - y_n} + \frac{y_n - y_{n-1}}{y_{n-1} - y_n}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{E_y} - 1} = \frac{E_y}{1 - E_y} \end{aligned}$$

Таким образом, в случае МИС в обеих фазах, имеем:

$$E_y = \frac{n_{0y}}{1 + n_{0y}} \quad (42)$$

Выражение (42) используется в случае малых концентраций. При этом никаких ограничений на $y^*(x_n)$ не накладывается.

Ранее было определено общее число единиц переноса по газовой фазе (см. выражение 28). Тогда для "n"-ной тарелки можно записать:

$$n_{0y} = \int_{y_n}^{y_{n-1}} \frac{dy}{y - y^*}$$

Если принять режим идеального вытеснения в газовой фазе и режим идеального смешения в жидкой (см. рис. 6в), величина y^* будет постоянной и равной $y^*(x_n)$, поскольку в пределах жидкой фазы концентрация будет постоянной и равной конечной x_n .

Тогда:

$$n_{0y} = \int_{y_n}^{y_{n-1}} \frac{dy}{y - y^*(x_n)} = \ln \frac{y_{n-1} - y^*(x_n)}{y_n - y^*(x_n)}$$

т.е.:

$$\frac{y_n - y^*(x_n)}{y_{n-1} - y^*(x_n)} = e^{-n_{0y}}$$

Добавляя и вычитая из числителя y_{n-1} и последующего почленного деления, будем иметь:

$$e^{-n_{0y}} = \frac{y_n - y^*(x_n) + y_{n-1} - y_{n-1}}{y_{n-1} - y^*(x_n)} = 1 - \frac{y_{n-1} - y_n}{y_{n-1} - y^*(x_n)} = 1 - E_y$$

Таким образом, для случая МИВ в газовой фазе и МИС в жидкой, получим:

$$E_y = 1 - e^{-n_{0y}} \quad (43)$$

Соотношение (43) применяется в случае малых концентраций при расчетах абсорбционных и экстракционных колонн а также, для ректификационных, если используются мольные концентрации и мольные потоки. Отметим, что в пределах данной тарелки линия равновесия должна быть линейной, поскольку при получении (28') коэффициент массопередачи K_y был вынесен из под знака интеграла (см. уравнение 28).

Следует подчеркнуть, что выражения (42) и (43) основаны на идеализированных представлениях о структуре потоков на тарелках. Расчет числа реальных тарелок строится на основе более сложных моделей движения фаз, таких как ячеечная, ячеечная с обратными потоками, диффузионная. При этом их комбинируют, учитывая реальную картину движения фаз.

Величины E_y в выражениях (42) и (43) называют **локальными эффективностями на тарелке и обозначают** E_0 , в отличие от эффективностей E_{My} , рассчитываемых для переточных тарелок с учетом взаимного направления движения фаз, неидеальности перемешивания, уноса и т.д.

Отметим также, что рекомендуемые в литературе соотношения для расчета E_{My} являются строгими при постоянстве расходов фаз и линейной равновесной зависимости. В пределах одной ступени (тарелки) изменение расходов фаз и наклона линии равновесия, как правило, невелико.

Расчет числа реальных ступеней можно построить на основе следующих уравнений:

$$G_{n-1} y_{n-1} + L_{n+1} x_{n+1} - G_n y_n - L_n x_n = 0 \quad (44)$$

$$G_{n-1} (1 - y_{n-1}) - G_n (1 - y_n) = 0 \quad (45)$$

$$L_{n+1} (1 - x_{n+1}) - L_n x_n = 0 \quad (46)$$

$$L_{n+1} + G_{n-1} - G_n - L_n = 0 \quad (47)$$

$$E_{yn} = \frac{y_{n-1} - y_n}{y_{n-1} - y^*(x_n)}; \quad E_{yn} = f[(n_{0y})_n] \quad (48)$$

В случае малых концентраций и линейности равновесной зависимости $y^* = mx + m_0$, расходы фаз можно считать неизменными, свойства будут мало изменяться, K_y и E_y можно принять постоянными.

Представим уравнение (44) в виде:

$$x_n - x_{n+1} = \frac{G}{L} (y_{n-1} - y_n) \quad (44')$$

А соотношение (48) в форме:

$$y_{n-1} - y_n = E_y [y_{n-1} - y^*(x_n)] = E_y (y_{n-1} - mx_n - m_0) \quad (49)$$

Для вышележащей ступени имеем:

$$y_n - y_{n+1} = E_y (y_n - mx_{n+1} - m_0) \quad (50)$$

Вычитая из (49) (50), получим:

$$\begin{aligned} y_{n-1} - y_n - (y_n - y_{n+1}) &= E_y (y_{n-1} - mx_n - m_0) - E_y (y_n - mx_{n+1} - m_0) = \\ &= E_y [y_{n-1} - y_n - m(x_n - x_{n+1})] \end{aligned}$$

Подставляя в последнее выражение значение $(x_n - x_{n+1})$ из (44'), будем иметь:

$$\begin{aligned} y_{n-1} - y_n - (y_n - y_{n+1}) &= E_y \left[y_{n-1} - y_n - \frac{mG}{L} (y_{n-1} - y_n) \right] = \\ &= E_y (y_{n-1} - y_n) \left(1 - \frac{mG}{L} \right) \end{aligned}$$

или:

$$(y_n - y_{n+1}) = (y_{n-1} - y_n) (1 - E_y + E_y F_M)$$

Обозначая $(1 - E_y + E_y F_M) = \lambda$, с учетом (49) и (50), получим:

$$\lambda (y_{n-1} - mx_n - m_0) = (y_n - mx_{n+1} - m_0)$$

т.е. имеем систему уравнений:

$$\begin{aligned} n=1 & \quad \lambda (y_0 - mx_1 - m_0) = (y_1 - mx_2 - m_0) \\ n=2 & \quad \lambda (y_1 - mx_2 - m_0) = (y_2 - mx_3 - m_0) \\ n=3 & \quad \lambda (y_2 - mx_3 - m_0) = (y_3 - mx_4 - m_0) \\ n=N & \quad \lambda (y_{N-1} - mx_N - m_0) = (y_N - mx_{N+1} - m_0) \end{aligned}$$

Откуда получим:

$$\lambda^N (y_0 - mx_1 - m_0) = y_N - mx_{N+1} - m_0$$

или:

$$N = \frac{\ln \frac{y_N - mx_{N+1} - m_0}{y_0 - mx_1 - m_0}}{\ln \lambda}$$

Но $y_0 = y_n$; $x_1 = x_n$; $y_N = y_n$; $x_{N+1} = x_n$ (см. рис. 1б). Таким образом, число реальных ступеней будет:

$$N = \frac{\ln \frac{y_n - mx_n - m_0}{y_n - mx_n - m_0}}{\ln \left(1 - E_y + E_y \frac{mG}{L} \right)} \quad (51)$$

Отметим, что эффективность по Мэрффи для теоретической тарелки равна 1. Подставляя $E_y = 1$ в (51), получим для числа теоретических ступеней N_m :

$$N_m = \frac{\ln \frac{y_n - mx_n - m_0}{y_n - mx_n - m_0}}{\ln \frac{mG}{L}} \quad (52)$$

И для среднего КПД ступени η будем иметь:

$$\eta = \frac{N_m}{N} = \frac{\ln \left(1 - E_y + E_y \frac{mG}{L} \right)}{\ln \frac{mG}{L}} \quad (53)$$

Расчет числа реальных ступеней с **учетом эффективности каждой ступени по Мэрффи**, как и расчет теоретических ступеней, основывается на последовательном определении составов фаз, уходящих со всех ступеней. Рекомендуется начинать расчет с того конца аппарата, куда входит фаза, по которой выражается эффективность ступени (E_{My} или E_{Mx}). Основное отличие алгоритма расчета числа реальных ступеней от приведенного ранее алгоритма расчета числа теоретических ступеней состоит в том, что для каждой ступени требуется определение ее эффективности. Для этого необходимо иметь данные, позволяющие находить общее число единиц переноса, а в случае применения сложных моделей структуры потоков – также и данные для определения параметров этих моделей.

Общие числа единиц переноса обычно определяют из эмпирических уравнений, составленных для частных (фазовых) чисел единиц переноса, которые связаны уравнениями аддитивности (следствие закона аддитивности диффузионных сопротивлений):

$$\frac{1}{n_{0y}} = \frac{1}{n_y} + \frac{mG}{L} \cdot \frac{1}{n_x}; \quad \frac{1}{n_{0x}} = \frac{1}{n_x} + \frac{L}{mG} \cdot \frac{1}{n_y}$$

где:

$$n_y = \beta_y \frac{F}{G} \text{ и } n_x = \beta_x \frac{F}{L}$$

Если расчет начинается с низа колонны, со ступени, на которую поступает исходный (очищаемый) газ, как показано на рис. 7, значение m обычно принимают равным тангенсу угла наклона линии равновесия в точке, соответствующей составу жидкости, покидающей эту ступень ($x_1 = x_k$). За расход жидкости (абсорбента) принимают его значение на выходе из рассматриваемой ступени, а в качестве расхода газа – его величину на входе в эту ступень. В случае, если расходы фаз существенно изменяются, принимают их средние для каждой ступени значения, которые можно определить, повторяя расчет несколько раз.

Возможная схема алгоритма расчета приведена на рис. 7:

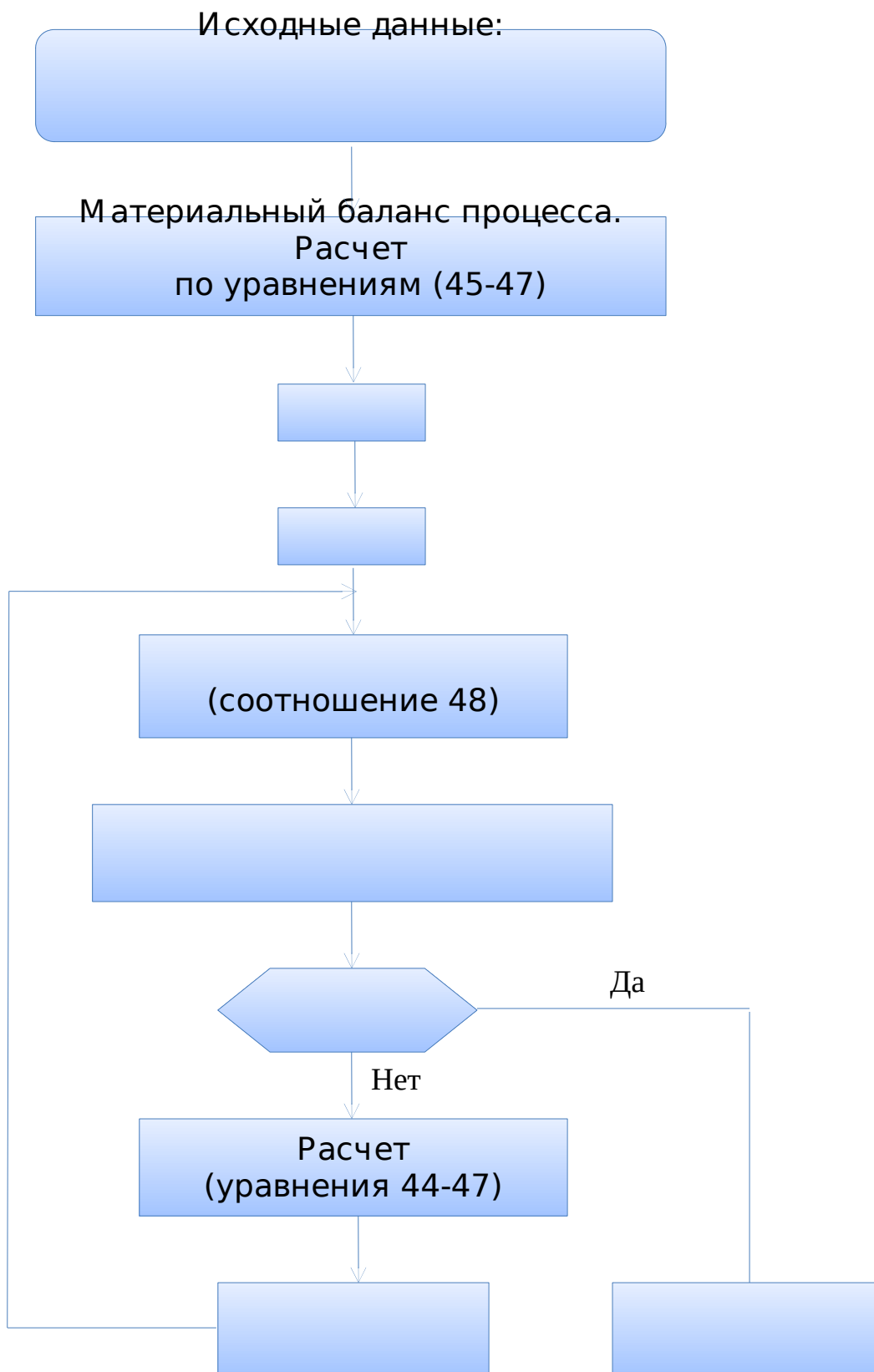


Рис. 7 Алгоритм расчета числа реальных ступеней (на примере абсорбции в изотермических условиях).

Описанный метод обычно называют расчетом “от ступени к ступени”.

Графической иллюстрацией данного способа расчета является так называемый **метод кинетической (псевдоравновесной) линии**.

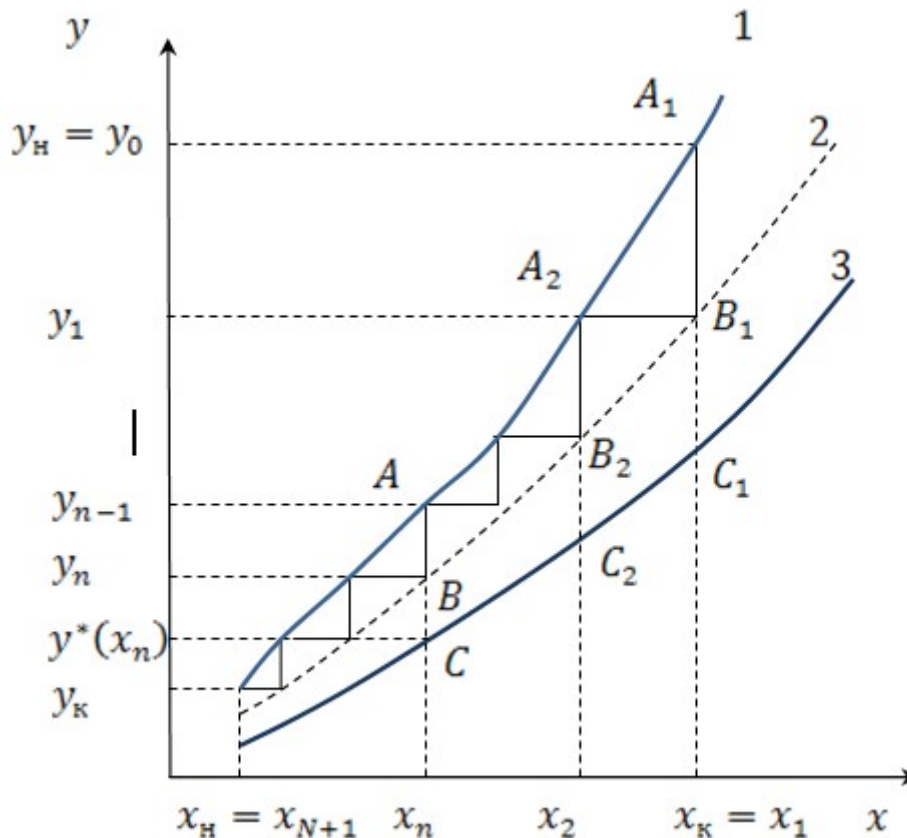


Рис. 8. К определению числа реальных ступеней разделения по методу кинетической (псевдоравновесной) линии. 1 – рабочая линия, 2 – кинетическая, 3 – равновесная.

В координатах x - y (или X - Y) строятся равновесная $y^*(x)$ и рабочая $y(x)$ линии (рис. 8). Для нескольких точек (в достаточном количестве, чтобы построить плавную линию), начиная от точки A_1 , определяются эффективности по Мэрффи. Для n -ной ступени имеем:

$$E_{My} = \frac{y_{n-1} - y_n}{y_{n-1} - y^*(x_n)} = \frac{\overline{AB}}{\overline{AC}}$$

Отрезки AC после построения равновесной $y^*(x)$ и рабочей $y(x)$ линий определяются в произвольных сечениях в интервале $x_n - x_k$. Если для этих сечений определить эффективности по Мэрффи, то отрезок $\overline{AB}$ определится как:

$$\overline{AB} = E_{My} \cdot \overline{AC}$$

Таким образом, отыскивая:

$$\overline{A_1 B_1} = E_{My_1} \cdot \overline{A_1 C_1}; \quad \overline{A_2 B_2} = E_{My_2} \cdot \overline{A_2 C_2},$$

Находят точки $B_1, B_2, \dots B$ и т.д., соединяя которые проводят кинетическую кривую. Число реальных ступеней разделения определяют как число ступеней, вписанных между рабочей (1) и кинетической (2) линиями (считают число точек на кинетической кривой; в данном случае 6 ступеней).

Средняя движущая сила

Если основное уравнение массопередачи модифицировать, заменив общую поверхность контакта фаз на произведение $a \cdot S \cdot H$, будем иметь:

$$M = K_y F \Delta y_{cp} = K_y \cdot S H_a \cdot \Delta y_{cp}$$

где, M – полный массовый (или мольный) поток;

Δy_{cp} – так называемая средняя движущая сила.

Выразив из последнего соотношения H и приравняв его к той же величине из уравнения (28), получим:

$$H = \frac{G(y_H - y_K)}{K_y \cdot a \cdot S \Delta y_{cp}} = \frac{G}{K_y a S} \int_{y_K}^{y_H} \frac{dy}{y - y^*}$$

откуда:

$$\Delta y_{cp} = \frac{y_H - y_K}{\int_{y_K}^{y_H} \frac{dy}{y - y^*}} = \frac{y_H - y_K}{n_{0y}} \quad (55)$$

Для частного случая малых концентраций (прямых рабочих и равновесной линий) ранее было показано:

$$n_{0y} = \frac{1}{1 - F_M} \ln \frac{y_H - m x_K - m_0}{y_K - m x_H - m_0} = \frac{1}{1 - F_M} \ln \frac{y_H - y^*(x_K)}{y_K - y^*(x_H)} \quad (32)$$

Подставив (32) в (55) будем иметь:

$$\Delta y_{cp} = \frac{(y_H - y_K)(1 - F_M)}{\ln \frac{y_H - y^*(x_K)}{y_K - y^*(x_H)}} = \frac{(y_H - y_K) - (y_H - y_K) \frac{mG}{L}}{\ln \frac{y_H - y^*(x_K)}{y_K - y^*(x_H)}}$$

Из уравнения (1) для всего аппарата имеем:

$$(y_H - y_K) = \frac{L}{G} (x_K - x_H)$$

тогда:

$$\Delta y_{cp} = \frac{(y_H - y_K) - \frac{L}{G} (x_K - x_H) \frac{mG}{L}}{\ln \frac{y_H - y^*(x_K)}{y_K - y^*(x_H)}} = \frac{(y_H - y_K) - (m x_K + m_0 - m x_H - m_0)}{\ln \frac{y_H - y^*(x_K)}{y_K - y^*(x_H)}}$$

Учитывая, что:

$$m x_K + m_0 = y^*(x_K)$$

$$m x_H + m_0 = y^*(x_H)$$

окончательно получим:

$$\Delta y_{cp} = \frac{[y_H - y^*(x_K)] - [y_K - y^*(x_H)]}{\ln \frac{y_H - y^*(x_K)}{y_K - y^*(x_H)}} \quad (56)$$

Выражение (56) носит название **среднелогарифмической движущей силы**.

Для тарельчатых колонн в пределах одной тарелки будем иметь:

$$\Delta y_{cp(n)} = \frac{[y_{n-1} - y^*(x_n)] - [y_n - y^*(x_{n+1})]}{\ln \frac{y_{n-1} - y^*(x_n)}{y_n - y^*(x_{n+1})}} \quad (57)$$

При расчете абсорбции рабочая линия $Y(X)$ является прямой в случае использования относительных массовых или относительных мольных концентраций. Если равновесная зависимость аппроксимируется функцией $Y^\square = mX + m_0$, то расчет по выражению (56) вполне обоснован.

$$\Delta Y_{cp} = \frac{[Y_H - Y^*(X_K)] - [Y_K - Y^*(X_H)]}{\ln \frac{Y_H - Y^*(X_K)}{Y_K - Y^*(X_H)}} \quad (56^\square)$$

В пределах одной ступени (тарелки) изменение расходов фаз и наклона линии равновесия, как правило, невелико, что делает обоснованным и использование соотношения (57).

Вопросы и задания:

1. Ознакомиться с методикой расчета высоты аппаратов со ступенчатым контактом фаз
2. Что такое локальные эффективности на тарелке
3. Как производится расчет числа реальных ступеней с учетом эффективности каждой ступени по Мэрфри
4. Пояснить схему алгоритма расчета
5. Описать метод расчета «от ступени к ступени»
6. Описать метод кинетической (псевдоравновесной) линии
7. Средняя движущая сила. Среднелогарифмической движущей силы.

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / В.М. Потехин, В.В. Потехин. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. - 940 с.
4. Технология переработки нефти : в 2 ч. : учеб.пособие / [О. Ф. Глаголева, В. М. Капустин, Т. Г. Гюльмисарян [и др.]] ; под ред. О. Ф. Глаголевой, В. М. Капустина, Ч.1, Первичная переработка нефти. – М. : Химия : КолосС, 2005. – 400 с. – Гриф: Доп. МО.
5. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / [Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Барабаш и др.] / [под ред. Г. М. Островского], Ч.1. – СПб. : Профессионал, 2004. – 848 с.

Практическая работа №24. Теплопередача в поверхностных теплообменниках

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

В поверхностных теплообменниках перенос тепла от более нагретого к менее нагретому теплоносителю происходит через разделяющую их стенку. В некоторых теплообменных аппаратах температура теплоносителей не меняется вдоль поверхности теплопередачи (например, испарители, в которых более нагретый теплоноситель конденсируется при постоянной температуре, а менее нагретый кипит при постоянной температуре). В основе расчета поверхности таких теплообменников лежит основное уравнение теплопередачи:

$$Q = KF \Delta t$$

Движущая сила Δt , в данном случае определяется как разница между температурой конденсации и температурой кипения теплоносителей.

Значительно чаще встречаются теплообменные аппараты в которых температуры теплоносителей изменяются вдоль поверхности теплообменников (например, подогреватели, холодильники, конденсаторы и др.) Основное уравнение теплопередачи в этом случае имеет вид:

$$Q = KF \Delta t_{cp}$$

Расчет средней движущей силы Δt_{cp} при переменных температурах теплоносителей будет рассмотрен ниже.

Рассмотрим перенос тепла от более нагретого к менее нагретому теплоносителю в поверхностных теплообменниках. Тепловой поток Q пропорционален движущей силе Δt_{cp} , поверхности теплопередачи F и обратно пропорционален общему термическому сопротивлению R (рис.1).

$$R = \frac{1}{K}, \text{ где } K - \text{коэффициент теплопередачи.}$$

Общее термическое сопротивление можно представить в виде суммы сопротивлений отдельных стадий переноса тепла:

$$R = \sum r$$

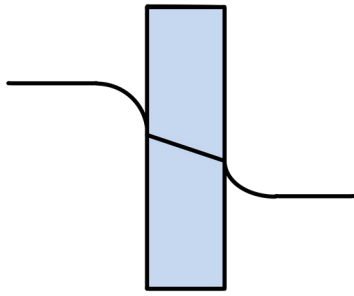


Рис.1 . Перенос тепла через стенку в поверхностных теплообменниках.

r_1 - сопротивление теплоотдачи со стороны более нагретого теплоносителя;

$$\frac{1}{r_1} = \alpha_1$$

- коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке ;

r_{cm} - сопротивление стенки;

$$\frac{1}{r_{cm}} = \frac{\lambda}{\delta}$$

; λ и δ - теплопроводность стенки и её толщина;

r_2 - сопротивление теплоотдачи со стороны менее нагретого теплоносителя;

$$\frac{1}{r_2} = \alpha_2$$

- коэффициент теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю

Теплопередача при постоянных температурах теплоносителей. Уравнение аддитивности термических сопротивлений.

Определим количество тепла, передаваемого в единицу времени от более нагретого теплоносителя t_1 к менее нагретому t_2 через многослойную стенку (рис. 2) при установившемся процессе. Предположим, что стенка состоит из двух слоев: первого слоя толщиной δ_1 и теплопроводностью λ_1 и второго слоя толщиной δ_2 и теплопроводностью λ_2 .

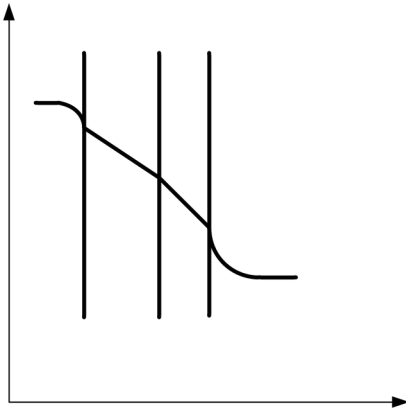


Рис.2. Профиль температур при переносе тепла через многослойную стенку.

Температуры по поверхности со стороны более и менее нагретых теплоносителей постоянны. Поверхность теплопередачи F .

Количество тепла, передаваемого от более нагретого теплоносителя к стенке за период времени τ равно:

$$Q = \alpha_1 F \tau (t_1 - t_{cm1})$$

То же самое количество тепла передается посредством теплопроводности через каждую стенку:

$$Q = \frac{\lambda_1}{\delta_1 F \tau} (t_{cm1} - t'_{cm})$$

$$Q = \frac{\lambda_2}{\delta_2 F \tau} (t'_{cm} - t_{cm2})$$

Количество тепла, отдаваемого стенкой менее нагретому теплоносителю за период времени τ :

$$Q = \alpha_2 F \tau (t_{cm2} - t_2)$$

Из представленных уравнений выразим термические сопротивления:

$$\frac{1}{\alpha_1} = \frac{F \tau}{Q} (t_1 - t_{cm1}) \quad \frac{\delta_1}{\lambda_1} = \frac{F \tau}{Q} (t_{cm1} - t'_{cm})$$

$$\frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{F \tau}{Q} (t'_{cm} - t_{cm2}) \quad \frac{1}{\alpha_2} = \frac{F \tau}{Q} (t_{cm2} - t_2)$$

$$\frac{1}{\alpha_1} \text{ и } \frac{1}{\alpha_2}$$

- термические сопротивления более нагретой и менее нагретой сред;

$$\frac{\delta_1}{\lambda_1} \text{ и } \frac{\delta_2}{\lambda_2}$$

- термические сопротивления стенок.

Сложим полученные уравнения и представим их относительно теплового потока Q :

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} F (t_1 - t_2)$$

Сравним полученное уравнение с основным уравнением теплопередачи:

$$Q = KF(t_1 - t_2), \text{ где } K - \text{коэффициент теплопередачи};$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ где } \frac{1}{K} - \text{общее термическое сопротивление } R.$$

Получим:

Полученное уравнение называют уравнением **аддитивности термических сопротивлений**.

Теплопередача при переменных температурах теплоносителей.

Наибольшее распространение имеют теплообменные процессы при переменной температуре по поверхности $t = f(F)$. При этом процессы могут быть стационарные и нестационарные.

Большое влияние на процесс теплообмена оказывает относительное движение теплоносителей. Возможны следующие варианты взаимного направления движения теплоносителей (рис. 3).

А). Прямоток



Б). Противоток



В). Перекрестный ток



Г). Смешанный ток

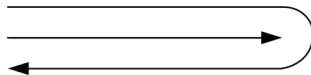


Рис.3. Схемы относительного движения теплоносителей в теплообменниках.

Относительное движение теплоносителей оказывает существенное влияние на величину движущей силы процесса теплопередачи. Кроме того, взаимное направление движения теплоносителей может существенно изменить технологические условия протекания процесса теплообмена (экономия теплоносителя, создание более мягких условий нагрева или охлаждения).

Рассмотрим процесс стационарного теплообмена при прямоточном взаимном направлении движения теплоносителей, теплоемкости теплоносителей принимаем независимыми от температуры, т.е. $c = const$.

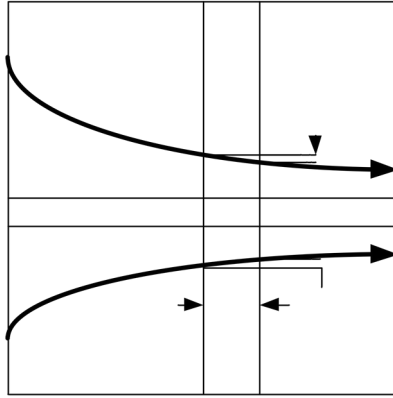


Рис.4. К выводу уравнения теплопередачи при переменных температурах теплоносителей.

С одной стороны стенки движется G_1 кг/сек более нагретого теплоносителя с теплоемкостью c_1 , с другой стороны стенки G_2 кг/сек менее нагретого теплоносителя с теплоемкостью c_2 . Происходит процесс переноса тепла от более нагретого к менее нагретому теплоносителю через стенку.

Выберем элемент поверхности dF . На этом элементе поверхности более нагретый теплоноситель охлаждается на величину dt_1 , а более холодный нагревается на величину dt_2 .

Уравнение теплового баланса для элемента поверхности dF имеет вид:

$$dQ = G_1 c_1 (-dt_1) = G_2 c_2 dt_2$$

“–” указывает на охлаждение более нагретого теплоносителя.

$$-dt_1 = \frac{dQ}{G_1 c_1} \quad \text{и} \quad dt_2 = \frac{dQ}{G_2 c_2};$$

Сложим два этих выражения:

$$d(t_1 - t_2) = -dQ \left(\frac{1}{G_1 c_1} + \frac{1}{G_2 c_2} \right) \quad \text{или} \quad d(\Delta t) = -dQ \left(\frac{1}{G_1 c_1} + \frac{1}{G_2 c_2} \right)$$

На элементе поверхности dF можно применить основное уравнение теплопередачи при постоянных температурах теплоносителей т.к. изменение температуры незначительны:

$$dQ = K dF \Delta t,$$

Подставим это уравнение в балансовое уравнение:

$$d(\Delta t) = -K dF \Delta t \left(\frac{1}{G_1 c_1} + \frac{1}{G_2 c_2} \right)$$

Разделим переменные и проинтегрируем:

$$\int_{\Delta t_n}^{\Delta t_k} \frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = - \left(\frac{1}{G_1 c_1} + \frac{1}{G_2 c_2} \right) \int_{KF}^F dF$$

$$\ln \frac{\Delta t_k}{\Delta t_n} = - \left(\frac{1}{G_1 c_1} + \frac{1}{G_2 c_2} \right)_{KF}$$

Запишем уравнение теплового баланса для всей поверхности теплообмена:

$$Q = G_1 c_1 (t_{1n} - t_{1k}) = G_2 c_2 (t_{2k} - t_{2n})$$

Отсюда:

$$\frac{1}{G_1 c_1} + \frac{1}{G_2 c_2} = \frac{(t_{1H} - t_{1K})}{Q} + \frac{(t_{2K} - t_{2H})}{Q} = \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{Q}$$

Проведем замену:

$$\ln \frac{\Delta t_K}{\Delta t_H} = \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{Q} K F$$

$$Q = \frac{-KF \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{\ln \frac{\Delta t_K}{\Delta t_H}}}{\frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{\ln \frac{\Delta t_K}{\Delta t_H}}} = KF \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{\ln \frac{\Delta t_H}{\Delta t_K}}$$

Сравнивая полученное уравнение с основным уравнением теплопередачи, получим выражение для определения средней движущей силы (среднего температурного напора):

$$\Delta t_{cp} = \ln \frac{\Delta t_H}{\Delta t_K} \quad \text{или} \quad \Delta t_{cp} = \ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}$$

где Δt_{δ} и Δt_m - большая и меньшая разности температур на концах теплообменников.

Для противотока, используя ту же методику, можно получить аналогичное уравнение.

При отношении $\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m} \leq 2$ можно рассчитывать движущую силу как среднеарифметическую величину. При перекрестном токе теплоносителей вводится поправочный коэффициент $\epsilon_{\Delta t}$ для расчета средней движущей силы.

$$\Delta t_m = \epsilon_{\Delta t} \ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}$$

Выбор взаимного направления движения теплоносителей

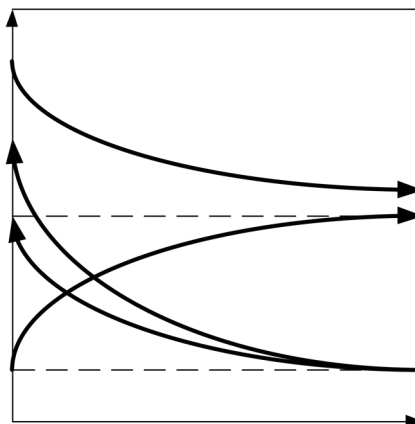


Рис.5. К выбору взаимного направления движения теплоносителей.

Для случая прямотока конечная температура менее нагретого теплоносителя (охлаждающего агента) t_{2K} не может превышать конечную температуру более нагретого

теплоносителя t_{1K} . При противотоке это возможно. Для осуществления процесса должна существовать некоторая разность температур $\Delta t_m = t_{1H} - t_{2K}$. При повышении t_{2K} сокращается расход охлаждающего агента, т.е. противоток предпочтителен с точки зрения экономии охлаждающего агента.

Если сопоставить противоток и прямоток при одинаковых начальных и конечных температурах теплоносителей, то при противотоке средняя движущая сила Δt_{cp} выше, а расход теплоносителей одинаков. Скорость теплообмена при противотоке выше, следовательно, противоток более эффективен.

Таким образом, противоток является более предпочтительным при проведении процессов теплообмена. Прямоток применяют только в том случае, если он обеспечивает какие либо технологические преимущества (например, создание более мягких условий обогрева).

Если один из теплоносителей меняет свое агрегатное состояние, то взаимное направление движения теплоносителей не имеет значения.

Вопросы и задания:

1. Ознакомиться с процессом теплопередачи в поверхностных теплообменниках.
2. Перенос тепла через стенку в поверхностных теплообменниках
3. Профиль температур при переносе тепла через многослойную стенку
4. Уравнение аддитивности термических сопротивлений.
5. Теплопередача при переменных температурах теплоносителей.
6. Выбор взаимного направления движения теплоносителей

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / В.М. Потехин, В.В. Потехин. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. - 940 с.
4. Технология переработки нефти : в 2 ч. : учеб.пособие / [О. Ф. Глаголева, В. М. Капустин, Т. Г. Гюльмисарян [и др.]] ; под ред. О. Ф. Глаголевой, В. М. Капустина, Ч.1, Первичная переработка нефти. – М. : Химия : КолосС, 2005. – 400 с. – Гриф: Доп. МО.
5. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / [Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Барабаш и др.] / [под ред. Г. М. Островского], Ч.1. – СПб. : Проффессионал, 2004. – 848 с.

Практическая работа №25. Теплоизлучение (лучеиспускание)

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Теплоизлучение (лучеиспускание) - один из видов передачи тепла.

Во всех телах при $T > 0$ возникает излучение. Тепло передается от одного тела, к другому по закону тепловых (инфракрасных) лучей. Длина волны световых лучей 0,4-0,8 мкм, длина волны тепловых лучей - 0,8-40 мкм.

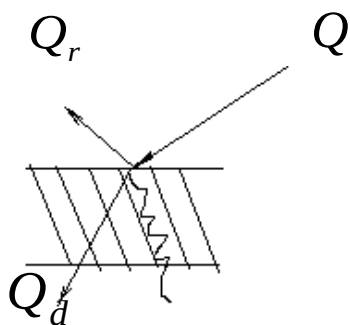
Рассмотрим случай теплоизлучения

$$Q = Q_a + Q_r + Q_d$$

где Q_a - поглощенное тепло,

Q_r - отраженное тепло

Q_d - тепло пропущенное



Разделим каждый член этого уравнения на Q:

$$\frac{Q_a}{Q} + \frac{Q_r}{Q} + \frac{Q_d}{Q} = 1$$

$A + R + D = 1$, где A, R, D соответственно коэффициенты поглощения, отражения, и (света) пропускания.

Рассмотрим ряд граничных случаев:

Если $A \rightarrow 1$, то $R, D \rightarrow 0$ абсолютно черное тело (на практике это поверхность, покрытая сажей, черный бархат)

Если $R \rightarrow 1$, то $A, D \rightarrow 0$ абсолютно белое тело (на практике полированная поверхность неокрашенного металла)

Если $D \rightarrow 1$, то $A, R \rightarrow 0$ диатермическое, абсолютно прозрачное тело (на практике одноатомные и некоторые двухатомные газы)

Понятие лучеиспускательной способности.

$$E = \frac{Q}{F} \left[\frac{Вт}{м^2} \right] \text{ или } \left[\frac{ккал}{м^2 \cdot час} \right]$$

Основной закон лучеиспускания – закон Стефана-Больцмана

Лучеиспускание – способность абсолютно черного тела.

Пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры.

$$E = c_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела (величина постоянная, равная

$$4,96 \left[\frac{ккал}{м^2 \cdot час \cdot K^4} \right] \text{ или } 5,67 \left[\frac{Вт}{м^2 \cdot K^4} \right])$$

Практически все тела серые, поэтому вводится понятие степени черноты:

$$\varepsilon = \frac{c}{c_0}$$

$$\varepsilon \cdot c_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

Тогда $E =$

Для теплоизлучения важен также закон Кирхгофа, который гласит, что отношение лучеиспускательной способности к её поглотительной способности для всех тел одинаково и равно лучеиспускательной способности тела при той же температуре и зависит только от t .

Общая формула передачи тепла для лучеиспускания:

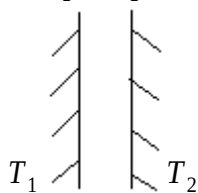
$$Q = c_{1-2} \cdot F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \tau \cdot \phi,$$

где c_{1-2} – общий коэффициент излучения системы, зависит от размера тел.

Если $F_1 = F_2$ (F – поверхность тела), то

$$c_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}} = \frac{1}{\frac{1}{c_0} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} = \frac{c_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 1}$$

Например

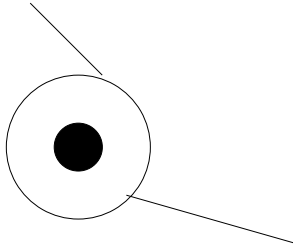


Если $F_1 \neq F_2$, например, одно тело заключено в другое, то

$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right)}$$

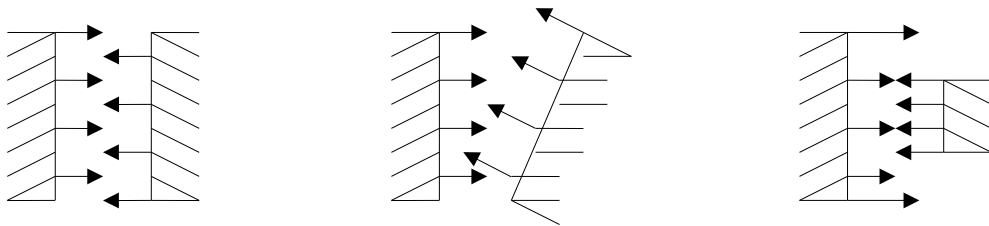
Пример:

T_2, C_2, F_2



T_1, C_1, F_1

ϕ – угловой коэффициент облучённости показывает, какая доля лучей падает на тело.
Например



$$\phi = 1 \quad \phi < 1 \quad \phi > 1$$

ϕ – это угол направления лучей к нормали к поверхности излучаемого тела.

$$\phi = \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \phi_1 \cdot \cos \phi_2}{r^2} dF_1 dF_2$$

ϕ можно определить по формуле

Сложный теплообмен

Часто конвекция сопровождается теплоизлучением.

В этом случае $Q = Q_{\text{конв}} + Q_{\text{изл}}$

$$Q_{\text{конв}} = \alpha \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{жидк}}) \cdot F \cdot \tau \quad \text{ - по тепловому закону Ньютона.}$$

$$Q_{\text{изл}} = C_{1-2} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{см}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{жс}}}{100} \right)^4 \right] \cdot F \cdot \tau$$

Нужно привести эти два выражения к унифицированной форме.

Разделим и умножим последнее на $(t_{\text{ст}} - t_{\text{жидк}})$, тогда

$$Q_{\text{изл}} = \frac{C_{1-2} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{см}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{жс}}}{100} \right)^4 \right]}{(t_{\text{ст}} - t_{\text{жидк}})} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{жидк}}) \cdot F \cdot \tau$$

$$\frac{C_{1-2} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{см}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{жс}}}{100} \right)^4 \right]}{(t_{\text{ст}} - t_{\text{жидк}})}$$

Отсюда видно, что

имеет размерность коэффициента теплоотдачи

$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$. Обозначим ее $\alpha_{\text{изл}}$.

Следовательно, можно записать, что

$$Q = (\alpha_{\text{конв}} + \alpha_{\text{изл}}) \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{жидк}}) \cdot F \cdot \tau = \alpha_{\text{прив}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{жидк}}) \cdot F \cdot \tau$$

$\alpha_{\text{прив}}$ - приведённый коэффициент теплоотдачи, который показывает количество тепла, отдаваемого или воспринимаемого единицей поверхности теплопередачи в единицу времени за счёт конвекции и излучения.

Важно учитывать излучательную составляющую при расчёте печей, теплообменников с ребристой поверхностью, колориферов, при электрообогреве, например в дуговых печах.

Вопросы и задания:

1. Ознакомиться с процессом теплоизлучения
2. Теплоизлучение (лучеиспускание)
3. Понятие лучеиспускательной способности
4. Закон Стефана-Больцмана
5. Формула передачи тепла для лучеиспускания
6. Сложный теплообмен

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>
3. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / В.М. Потехин, В.В. Потехин. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. - 940 с.
4. Технология переработки нефти : в 2 ч. : учеб.пособие / [О. Ф. Глаголева, В. М. Капустин, Т. Г. Гюльмисарян [и др.]] ; под ред. О. Ф. Глаголевой, В. М. Капустина, Ч.1, Первичная переработка нефти. – М. : Химия : КолосС, 2005. – 400 с. – Гриф: Доп. МО.
5. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / [Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Барабаш и др.] / [под ред. Г. М. Островского], Ч.1. – СПб. : Профессионал, 2004. – 848 с.

Практическая работа №26. Уравнение движения идеальной жидкости Эйлера

Цель: Приобретение практических навыков в особенностях современных фундаментальных исследований.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы семинара, формируемые компетенции или их части:

Знания: знать методику самоорганизации и самообразования, о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире.

Умения: применять навыки в самоорганизации и самообразовании, использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире

Компетенции или их части:

- способностью к самоорганизации и самообразованию ОК-7
- готовностью использовать знания о строении материалов, природе химической связи в различных классах химических соединений для понимания свойств материалов и механизма химических процессов, протекающих в окружающем мире ОПК-3

Актуальность темы: Актуальность практического занятия состоит в том, что знания, полученные в ходе работы, будут использованы при написании курсового проекта и для определения оптимальных условий управления производственными процессами.

Теоретическая часть:

Выделим в движущейся в поле сил тяжести идеальной (невязкой) жидкости произвольный объём V , ограниченный поверхностью S с единичной внешней нормалью $\vec{n}$. Найдём сумму внешних сил, действующих на данный объём.

Поскольку в идеальной жидкости действуют только нормальные напряжения, сила давления, действующая на выделенный объём со стороны окружающей жидкости равна интегралу

$$\iint_S \vec{\tau}_n dS = - \iint_S P \vec{n} dS$$

(в соответствии с уравнением (1) $\vec{\tau}_n = -P \vec{n}$)

Преобразуя поверхностный интеграл в объёмный, получим

$$- \iint_S P \vec{n} dS = - \iiint_V \text{grad } P dV$$

На данный объём действует также внешняя сила тяжести, равная интегралу

$$- \iiint_V \rho \vec{g} dV$$

где $\rho \vec{g}$ - сила тяжести единичного объёма.

Таким образом, сумма внешних сил, действующих на объём V , равна интегралу

$$- \iiint_V (\rho \vec{g} - \text{grad } P) dV$$

Из этого выражения видно, что на каждый элемент объёма dV действует сила $(\rho \vec{g} - \text{grad } P) dV$

Из механики известно, что сумма внешних сил, действующих на тело, равна произведению массы тела на его ускорение, следовательно

$$dV \rho \frac{d\vec{w}}{dt} = (\rho \vec{g} - \text{grad } P) dV$$

Сократив на величину dV , получим уравнение движения идеальной жидкости Эйлера

$$\rho \frac{d\vec{w}}{dt} = \rho \vec{g} - \text{grad } P$$

(28)

Запишем уравнение движения Эйлера в проекциях на оси координат

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dw_x}{dt} &= -\frac{\partial P}{\partial x} \\ \rho \frac{dw_y}{dt} &= -\frac{\partial P}{\partial y} \\ \rho \frac{dw_z}{dt} &= -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Индивидуальные производные проекций скорости находятся по формуле (21).

Например, для проекции скорости на ось x , получим

$$\frac{dw_x}{dt} = \frac{\partial w_x}{\partial t} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z}$$

Для несжимаемых невязких жидкостей решение уравнения (28) совместно с уравнением неразрывности (17) позволяет определить четыре неизвестных w_x, w_y, w_z, P .

Для изотермических процессов при значительном изменении давления в идеальных сжимаемых жидкостях, при решении аналогичной задачи, кроме уравнений (28) и (15) требуется знание зависимости плотности от давления

$$\rho = \Phi(P) \quad (30)$$

(Жидкости, у которых плотность подчиняется уравнению (32) называются *баротронными*).

Следует отметить, что случаи, когда необходим учёт сжимаемости при решении таких задач, в химической технологии достаточно редкие.

Равновесие жидкости в поле силы тяжести.

В покоящейся жидкости (реальной и идеальной) как и в движущейся идеальной жидкости действуют только нормальные напряжения с идентичными свойствами. Поэтому, приравняв скорость нулю в уравнении (28), получим уравнение равновесия Эйлера жидкости в поле сил тяжести

$$\text{grad}P = \rho \vec{g} \quad (31)$$

В проекциях на оси координат уравнение (31) превращается в систему уравнений

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (32)$$

Так как производные давления по x и y равны нулю, для несжимаемой жидкости получим

$$d(P + \rho gz) = 0$$

Отсюда получим основное уравнение гидростатики

$$P + \rho gz = \text{const} \quad (33)$$

Запишем уравнение (33) для ряда сечений покоящейся жидкости

$$P_0 + \rho gz_0 = P_1 + \rho gz_1 = P_i + \rho gz_i \quad (34)$$

Основное уравнение гидростатики (33) можно также записать в следующей форме

$$\frac{P}{\rho g} + z = \text{const} \quad (35)$$

$$\text{или} \quad \frac{P_0}{\rho g} + z_0 = \frac{P_1}{\rho g} + z_1 = \dots = \frac{P_i}{\rho g} + z_i \quad (36)$$

Все составляющие этого уравнения имеют размерность длины и называются напорами или высотами, кроме того, их можно рассматривать как величины удельной (отнесённой к единице веса) потенциальной энергии

$$\frac{P}{\rho g} \quad \text{— пьезометрический напор (пьезометрическая высота), м.}$$

z – геометрический напор (нивелирная высота), м.

Из уравнения (36) следует, что сумма пьезометрического и геометрического напора для любой точки покоящейся жидкости есть величина постоянная.

Основное уравнение гидростатики служит для определения величин давления, положений раздела фаз в покоящихся жидкостях, а также для определения сил, действующих на дно и стенки аппаратов.

Рассмотрим применение основного уравнения гидростатики на примере простейшего U-образного манометра (Рис.4), который представляет собой прибор (1) в виде прозрачной трубки, заполненной манометрической жидкостью.

Манометр присоединён к аппарату, содержащему газ, плотность которого пренебрежительно мала по сравнению с плотностью манометрической жидкости.

Уровни жидкости в U-образной трубке z_1 и z_2 , причём давление на уровне z_2 атмосферное $P_2 = P_{\text{атм}}$.

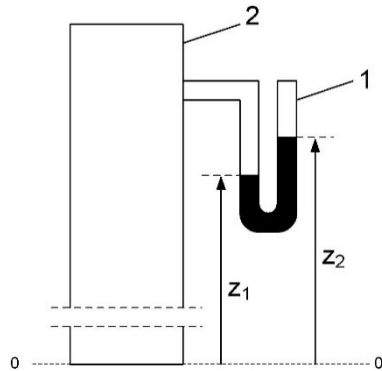


Рис.4. Измерение давления U-образным манометром

Запишем уравнение (34) для двух уровней жидкости

$$P_1 + \rho g z_1 = P_2 + \rho g z_2$$

Если давление в аппарате выше атмосферного $z_2 > z_1$, найдём избыточное давление в аппарате по сравнению с атмосферным

Избыточное давление ($P_{\text{изб}}$) равно разнице между абсолютным давлением в аппарате ($P_{\text{абс}} = P_1$) и атмосферным.

$$P_{\text{изб}} = P_{\text{абс}} - P_{\text{атм}} \quad (37)$$

Если давление в аппарате ниже атмосферного, уровень z_1 будет выше уровня z_2 , тогда можно записать

$$P_{\text{вак}} = P_2 - P_1 = \rho g (z_1 - z_2)$$

Эта величина ($P_{\text{вак}}$), называемая разрежением или вакуумом, равна разнице между атмосферным давлением и абсолютным давлением в аппарате.

$$P_{\text{вак}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{абс}} \quad (38)$$

Для сжимаемых жидкостей уравнение интегрируют совместно с уравнением состояния.

В случае баротронных жидкостей $\rho = \Phi(P)$ получим

$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{\Phi(P)} = -g \int_{z_0}^z dz = g(z_0 - z) \quad (40)$$

При использовании уравнения (40) следует иметь в виду, что оно даёт существенные расхождения с уравнением (34) только для больших масс (высоких слоёв) сжимаемых жидкостей.

Энергетический баланс потока идеальной жидкости

Рассмотрим стационарное движение физически бесконечно малого объёма идеальной жидкости по линии тока, как известно, совпадающей с траекторией движения этой жидкой

частицы. В проекциях на оси координат это движение описывается системой уравнений Эйлера(29).

Умножим правые и левые части системы уравнений (29) на соответствующие проекции элементарного пути пройденного частицей: dx, dy, dz

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dw_x}{dt} dx &= -\frac{\partial P}{\partial x} dx \\ \rho \frac{dw_y}{dt} dy &= -\frac{\partial P}{\partial y} dy \\ \rho \frac{dw_z}{dt} dz &= -\frac{\partial P}{\partial z} dz - \rho g dz \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Просуммировав левые и правые части этих уравнений с учетом того, что

$$\frac{dx}{dt} = w_x, \quad \frac{dy}{dt} = w_y, \quad \frac{dz}{dt} = w_z \text{ получим}$$

$$\rho d\left(\frac{w^2}{2}\right) + \rho g dz = -dP \quad (41)$$

В случае несжимаемой жидкости уравнение (41) упрощается

$$d\left(\rho \frac{w^2}{2} + P + \rho g z\right) = 0, \quad \text{следовательно}$$

$$\rho \frac{w^2}{2} + P + \rho g z = \text{const} \quad (42)$$

Чаще это уравнение записывают в таком виде

$$\frac{w^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z = c \quad (43)$$

Величина константы сменяется для различных линий тока.

Таким образом, получено уравнение энергетического баланса движения элементарного объёма несжимаемой идеальной жидкости по линии тока, называемое уравнением Бернулли. Согласно этому уравнению сумма удельной (отнесённой к единице веса) кинетической энергии

$\frac{w^2}{2g}$ и потенциальной энергии давления и положения $\left(\frac{P}{\rho g} + z\right)$ есть величина постоянная для любой точки на линии тока.

Величины удельных энергий также называют напорами, как и в уравнении гидростатики (36) с добавлением скоростного напора.

$\frac{w^2}{2g}$ - скоростной или динамический напор, м.

Для конечных сечений потока параметры уравнения (43) осредняют по всем линиям тока, т.е. по всему сечению, при этом вместо скорости в точке используют среднюю скорость по поперечному сечению (w_{cp}), поэтому удельная кинетическая энергия, рассчитанная по средней скорости, умножается на поправочный коэффициент α , зависящий от распределения скорости по сечению потока

$$\alpha = \frac{\iint_S w^3 dS}{w_{cp}^3 S} \quad (44)$$

В технических расчётах обычно принимают $\alpha=1$ по следующим причинам. Величина α при больших скоростях турбулентного течения незначительно превышает 1; при малых скоростях, соответствующих ламинарному движению $\alpha = 2$. Но поскольку сама величина кинетической энергии в этом случае очень мала по сравнению с величинами потенциальной энергии, приравнивание α единице не вносит существенных погрешностей в расчёты.

При средних скоростях турбулентной области из-за сравнительно малой величины кинетической энергии погрешности также незначительны.

Таким образом, получим уравнение Бернулли для конечных сечений потока несжимаемой идеальной жидкости.

$$\frac{w_{cp}^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z = \text{const}$$

В технических расчётах обычно используют средние по сечению величины скоростей, поэтому принимаем обозначения $w_{cp} = w$, тогда уравнение Бернулли принимает вид

$$\frac{w^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z = \text{const} \quad (45)$$

Следовательно, для любых сечений, получим

$$\frac{w_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 = \frac{w_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 = \dots = \frac{w_i^2}{2g} + \frac{P_i}{\rho g} + z_i \quad (46)$$

В случае сжимаемой жидкости уравнение (41) записывается в виде:

$$d\left(\frac{w^2}{2} + gz\right) = -\frac{dP}{\rho} \quad (47)$$

Чтобы решение этого уравнения имело вид аналогичный уравнению Бернулли для идеальной несжимаемой жидкости используют следующую функцию

$$P' = \int_{P_0}^P \frac{dP}{\rho}$$

где P_0 – значение давления в начальной точке линии тока, или, для конечных сечений, в начальном сечении.

Величину этой функции определяют по известной зависимости $\rho = \Phi(P)$

Проинтегрировав уравнение (47), получим уравнение Бернулли для сжимаемой идеальной жидкости

$$\frac{w^2}{2} + gz + P' = C \quad (48)$$

где C – константа.

В технических расчётах уравнение (48) используется очень редко, в случаях очень больших скоростей, сравнимых со скоростью звука, так как при обычных скоростях газа, расчёты проведенные по уравнениям (43) и (48) для сжимаемых и несжимаемых жидкостей не дают существенных расхождений.

Вопросы и задания:

1. Ознакомиться с уравнением движения идеальной жидкости Эйлера.
2. Что называется баротронными жидкостями
3. Что принимают за напор или высоту в уравнении
4. Применение основного уравнения гидростатики
5. Уравнение энергетического баланса движения

Список литературы

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.

2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>

3. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / В.М. Потехин, В.В. Потехин. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. - 940 с.

4. Технология переработки нефти : в 2 ч. : учеб.пособие / [О. Ф. Глаголева, В. М. Капустин, Т. Г. Гюльмисарян [и др.]] ; под ред. О. Ф. Глаголевой, В. М. Капустина, Ч.1, Первичная переработка нефти. – М. : Химия : КолосС, 2005. – 400 с. – Гриф: Доп. МО.

5. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / [Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Барабаш и др.] / [под ред. Г. М. Островского], Ч.1. – СПб. : Проффессионал, 2004. – 848 с.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>

Дополнительная литература

1. Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». – 2-е изд., испр. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. – 608 с.
2. Леонтьева, А. И. Оборудование химических производств : учеб. / А. И. Леонтьева. – Москва : Химия : КолосС, 2008. – 479 с.
3. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / В.М. Потехин, В.В. Потехин. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. - 940 с.
4. Технология переработки нефти : в 2 ч. : учеб.пособие / [О. Ф. Глаголева, В. М. Капустин, Т. Г. Гюльмисарян [и др.]] ; под ред. О. Ф. Глаголевой, В. М. Капустина, Ч.1, Первичная переработка нефти. – М. : Химия : КолосС, 2005. – 400 с. – Гриф: Доп. МО.
5. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / [Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Барабаш и др.] / [под ред. Г. М. Островского], Ч.1. – СПб. : Проффессионал, 2004. – 848 с.
6. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии : учебник для вузов / А. И. Скобло, Ю. К. Молоканов, А. И. Владимиров, В. А, Щелкунов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 2000. – 677 с.
7. Основные процессы и аппараты химической технологии : пособие по проектированию / [Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и др.] ; под ред. Ю. И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1991. – 496 с.
8. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии : учеб.пособие : в 2 кн. / Ю.И. Дытнерский, Ч.1, Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М. : Химия, 2002. – 400 с.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Направление подготовки/специальность	21.03.01 Нефтегазовое дело
Направленность (профиль)/специализация	«Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта, хранения и переработки нефти и газа»
Форма обучения	Очная
Год начала обучения	
Реализуется в	5-6 семестре

СОДЕРЖАНИЕ

Цели и задачи курсовой работы	6
Тематика курсовых работ	6
Структура и объем курсовой работы	7
Содержание курсовой работы	7
Оформление курсовой работы	8
Организация и контроль выполнения курсовой работы	9
Защита курсовой работы	9
Критерии оценивания работы	9
Список рекомендуемой литературы	11

Введение

Целью освоения дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» является формирование компетенций ПК-1 ПК-2 будущего бакалавра по направлению подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело. Профиль Эксплуатация и обслуживание объектов транспорта, хранения и переработки нефти и газа.

Дисциплина "Процессы и аппараты химической технологии" относится к базовой части Б1.О.19. Ее освоение происходит в 5, 6 семестрах.

Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины:

Индекс	Формулировка:
ПК-1	Способен обеспечить технологическое сопровождение процесса переработки нефти, газа и химического сырья
ПК-2	Способен обеспечить документационное сопровождение разработки и внедрения мероприятий по повышению эффективности технологического процесса переработки нефти, газа и химического сырья

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа – обязательный вид учебной работы, выполняется студентом в течение семестра. Курсовая работа (проект) является самостоятельной исследовательской работой студента и представляет собой логически завершенное и оформленное научное исследование.

Цель курсового проектирования – формирование у студента навыков научно-исследовательской работы, повышение уровня его профессиональной (теоретической и практической) подготовки, углубление знаний по учебной дисциплине, развитие интереса и навыков самостоятельной работы с научной и справочной литературой.

Выполнение курсовой работы также имеет целью расширение знаний студентов, обучение методам теоретического анализа явлений и закономерностей науки, отработку навыков самостоятельного применения теоретических знаний к комплексному решению профессиональных задач, использования справочной литературы, методов математической обработки экспериментальных данных, компьютерных технологий. Системой курсовых работ (проектов) студент подготавливается к выполнению выпускной квалификационной работы.

В процессе выполнения курсовой работы студентом должны решаться следующие задачи:

- приобретение новых теоретических знаний в соответствии с темой работы и заданием руководителя;
- умение систематизировать, обобщать и логично излагать концепции, альтернативные точки зрения по исследуемой проблеме;
- развитие учебно-исследовательских и методических навыков, необходимых для системного научного анализа изучаемого явления;
- совершенствование профессиональной подготовки.

Результатом курсового проектирования является развитие компетенции: способность проводить технологические и технические расчеты по проектам, технико-экономический и функционально-стоимостный анализ эффективности проекта.

ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ РАБОТ

Темы курсовых работ (проектов) должны быть комплексными, т.е. содержать ряд взаимосвязанных между собой проблем и опираться на фактический материал профильных предприятий и учреждений, а также на итоги учебной и производственной практики студентов, на научные работы членов кафедры, студенческих научных кружков и проблемных групп; использовать новейшие достижения отечественной и зарубежной науки, актуальные прикладные аспекты.

Тема курсовой работы предлагается студентом с обоснованием им актуальности и целесообразности ее

разработки. Также темы могут быть предложены специалистами промышленных предприятий, научных и проектных организаций, заинтересованных в их разработке.

Тематика курсовых работ по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» должна соответствовать видам профессиональной деятельности, к которым готовятся выпускники бакалавриата. В соответствии с ФГОС ВО по направлению подготовки 18.03.01 Химическая технология к числу видов профессиональной деятельности относятся: производственно-технологическая, проектная. Тематика курсовых работ должна также отвечать современным требованиям развития науки, техники, производства в области нефтегазопереработки.

Примерная тематика курсовых работ:

1. Расчет реактора установки гидроочистки бензина
2. Расчет реактора установки гидроочистки дизельного топлива
3. Расчет реактора каталитического крекинга вакуумного газойля
4. Расчет трубчатой печи установки стабилизации
5. Расчет трубчатой печи блока вакуумной перегонки мазута
6. Расчет реактора каталитического риформинга бензиновой фракции
7. Расчет основной ректификационной колонны установки атмосферной перегонки
8. Расчет трубчатой печи установки стабилизации
9. Расчет реактора установки каталитического крекинга
10. Расчет трубчатой печи установки стабилизации
11. Расчет атмосферной ректификационной колонны установки перегонки
12. Расчет адсорбера установки осушения газа
13. Расчет насадочной вакуумной колонны блока
14. Расчет атмосферной ректификационной колонны
15. Расчет реактора гидрокрекинга вакуумного газойля
16. Расчет реактора гидроочистки вакуумного газойля
17. Расчет реактора изомеризации
18. Расчет реактора пиролиза прямогонной бензиновой фракции
19. Расчет тарельчатой вакуумной колонны
20. Расчет реактора каталитического риформинга со стационарным слоем катализатора

Темы курсовых работ утверждаются на заседании выпускающей кафедры технологии переработки нефти и промышленной экологии в течение 2-х недель после начала семестра. Выписка из протокола заседания кафедры передается в дирекцию института нефти и газа, где формируется распоряжение об утверждении тем курсовых работ. В течение 10 дней после выхода распоряжения об утверждении тем курсовых работ специалист по учебно-методической работе дирекции вносит темы работ в автоматизированную базу университета.

Основные содержательные и процессуальные аспекты, необходимые для выполнения работы, оформляются кафедрой в заданиях по курсовому проектированию (*Приложение 1*). В заданиях необходимо четко сформулировать тему работы и требования, определяющие ее объем, содержание, а также исходные данные.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа должна полностью соответствовать утвержденной теме, содержать элементы новизны, быть актуальной, иметь научную и практическую значимость.

Курсовая работа имеет следующую структуру: титульный лист, задание, содержание, введение, основной текст, заключение, список используемой литературы, приложения.

Титульный лист содержит следующие сведения: название учредителя СКФУ, название университета, института, выпускающей кафедры, наименование темы курсовой работы, инициалы и фамилию автора работы с указанием курса, группы, формы обучения; ученую степень, звание, должность, инициалы и фамилию научного руководителя, дату защиты, выставленную оценку, место и год защиты (*Приложение 2*).

Содержание включает названия разделов, подразделов работы с указанием страницы начала каждой части.

Введение содержит обоснование актуальности проблемы, цель и задачи исследования, формулировки теоретической и практической значимости работы.

Основной текст представлен, как правило, литературным обзором, эмпирическим и расчетным разделами. Разделы по содержанию должны быть логически связаны между собой и завершаться

выводами.

В заключении содержатся выводы по работе в целом, перспективы дальнейшего изучения проблемы, связь с практикой.

Список используемой литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ к оформлению библиографии; в нем указываются все использованные студентом источники научно-технической литературы и документации.

В приложение входят таблицы, схемы, графики, диаграммы и другие материалы, иллюстрирующие или подтверждающие ход исследования, основные теоретические положения и выводы.

Рекомендуемый объем курсовой работы по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» – не менее 40 страниц печатного (компьютерного) текста, отпечатанного на стандартных листах А4 через полтора интервала стандартным шрифтом (тип – TimesNewRoman, размер 14 пт).

СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа должна содержать ряд обязательных разделов, которые располагаются в определенном порядке: титульный лист; задание; содержание; введение; литературный обзор; эмпирический раздел; расчетный раздел; заключение; список используемой литературы.

Содержание включает наименования всех разделов, подразделов, пунктов (если они имеют наименования) работы с указанием их нумерации. Как правило, объем содержания не превышает 1 страницу печатного текста.

Введение содержит краткую характеристику и оценку современного состояния выбранного направления исследований, обоснование актуальности темы работы, формулировки цели и решаемых задач. Объем введения не должен превышать 1 страницы печатного текста.

Объем первого раздела – обзора имеющихся в научно-технической литературе сведений о проблеме исследований составляет до 15 страниц печатного текста. В разделе необходимо сжато, критически осветить известные работы, научные и технологические решения по теме курсовой работы, сформулировать нерешенные вопросы, наметить пути проработки конкретных задач. При написании литературного обзора следует использовать современные отечественные и зарубежные источники, широко привлекать сведения из научно-технических журналов и результаты патентного поиска.

Объем эмпирического раздела должен составлять до 15 страниц печатного текста. В разделе приводятся описания технологических схем, конструкций основных аппаратов, характеристики сырья, вспомогательных материалов, продуктов.

В расчетном разделе объемом до 20 страниц печатного текста на основе практических данных действующих производств или результатов научных исследований выполняется материальный расчет технологической установки и/или аппарата. Выполнение трудоемких технологических расчетов производится с использованием современных компьютерных программ.

В заключении приводятся выводы по работе в целом. Выводы должны строго соответствовать цели и задачам работы, сформулированным во введении, а также отражать научную и практическую ценность полученных результатов. Рекомендуемый объем заключения до 1 страницы печатного текста.

При написании курсовой работы автор обязан приводить ссылки на авторов и источники, из которых заимствует материалы, цитирует отдельные положения или использует результаты. В список используемой литературы допускается включать не только издания, которые были фактически использованы, но и названия близких по содержанию работ. Источники в списке следует располагать в порядке появления ссылок на них в тексте и нумеровать арабскими цифрами.

Приложения, если они необходимы, оформляют как продолжение курсовой работы на последующих ее страницах. В приложения следует включать вспомогательный материал, необходимый для полноты восприятия текста: таблицы данных; графики, схемы, поясняющие текст или необходимые для расчетов; иллюстрации вспомогательного характера.

Графический материал (схемы, рисунки, графики, таблицы), необходимый для защиты курсовой работы, представляется с использованием презентационной техники. Количество иллюстраций (слайдов) должно в полном объеме отражать основное содержание работы.

ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовые работы должны оформляться в соответствии с требованиями следующих государственных стандартов (ГОСТ) и нормативов: ГОСТ 2.105-95. Общие требования к текстовым документам; ГОСТ 2.106-96. Текстовые документы; ГОСТ 2.104-68. Основные надписи; Единая система конструкторской документации; Единая система технологической документации; Единая система программной документации; ГОСТ 7.32-2001. Отчет по научно-исследовательской работе. Структура и правила

оформления; ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание; ГОСТ 7.82-2001. Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов; ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления; ГОСТ 7.80-2000. Библиографическая запись. Заголовок. Общие требования и правила составления.

Курсовую работу оформляют с помощью средств компьютерной техники на одной стороне листа формата А4 (210x297 мм). Текст работы печатается с соблюдением полей следующих размеров: правое – 15 (10) мм; левое – 25 (30) мм; верхнее – 20 мм; нижнее – 20 мм. Используется шрифт TimesNewRoman чёрного цвета, размер шрифта – 14 пт, межстрочный интервал – полуторный, абзацный отступ – 1,25 см. В таблицах и подписях к рисункам допускается использование размера шрифта 12 пт.

Каждый раздел курсовой работы должен начинаться с новой страницы и иметь порядковый номер. Номера подразделов состоят из номера раздела и подраздела, разделенных точкой. Номера пунктов состоят из номера раздела, подраздела, пункта, разделенных точкой.

Разделы, подразделы, пункты должны иметь заголовки. Заголовки должны четко и кратко отражать содержание разделов, подразделов, пунктов. Заголовки следует выравнивать по центру, писать строчными буквами, кроме первой, заглавной, без точки в конце, не подчеркивая. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

Все структурные элементы курсовой работы включают в общую нумерацию страниц. Листы (страницы) работы нумеруют арабскими цифрами, номер проставляют в верхнем правом углу страницы. На титульном листе и задании номер не проставляют.

Ссылки на литературные источники следует указывать порядковым номером по списку источников, выделенным двумя квадратными скобками. При необходимости ссылки на конкретный фрагмент текста источника в квадратных скобках проставляют номер источника и номер страницы, на которой помещен фрагмент, например: [18, т.1, с. 753]. При ссылках в тексте на стандарты указывают только их обозначение, например: ГОСТ 2.201.

ОРГАНИЗАЦИЯ И КОНТРОЛЬ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Руководство курсовыми работами поручается наиболее квалифицированным преподавателям кафедры, обладающим научно-методическим опытом. В методических указаниях должны быть определены задачи работы, характер исходных данных, примерный объем и содержание отдельных частей, а также порядок выполнения курсового исследования.

Руководство курсовыми работами начинается с выдачи задания студентам. В этот период необходимым условием, обеспечивающим эффективность дальнейшего руководства, является индивидуальная беседа руководителя со студентом по заданию. В ходе беседы руководитель должен выяснить степень подготовленности студента к выполнению данного задания, рекомендовать необходимую литературу и информировать о порядке выполнения задания.

Задание выдается за подписью руководителя работы, датируется днем выдачи, утверждается заведующим кафедрой и регистрируется в кафедральном журнале.

В рамках отведенного для руководства курсовыми работами времени должны регулярно проводиться индивидуальные консультации.

Одной из важных форм руководства является предварительный просмотр выполненной части курсовой работы. Руководитель, прежде всего, должен провести экспертизу выполненной части работы, а затем указать все ошибки, неточности. После проверки руководителем выполнения одного этапа работы студенту (в случае положительного заключения) разрешается перейти к следующему этапу.

Курсовая работа перед сдачей руководителю подписывается студентом. Если работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к курсовым работам, она допускается к защите, о чем руководитель делает соответствующую запись на титульном листе.

ЗАЩИТА КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Защита работы является обязательной формой проверки выполнения курсовой работы. Защита производится на заседании кафедры, научно-методического семинара кафедры, научной проблемной группы специальной комиссией, утверждаемой директором института, состоящей обычно из 3 преподавателей кафедры, при непосредственном участии руководителя, в присутствии студентов. Результаты наиболее интересных курсовых работ могут быть доложены на научных конференциях. Публичная защита стимулирует научный интерес, творчество, ответственность студентов.

Защита состоит в коротком докладе студента по выполненной работе и в ответах на вопросы присутствующих на защите. Научный руководитель зачитывает отзыв на курсовую работу студента (Приложение 3).

Результаты защиты курсовой работы, согласно действующему Положению о текущем контроле и промежуточной аттестации в СКФУ, оцениваются дифференцированной отметкой по пятибалльной системе. Оценка курсовой работы заносится в зачетную книжку студента и зачетно-экзаменационную ведомость, составляемую в 2-х экземплярах, один из которых хранится на кафедре в течение всего срока обучения студента, другой представляется в дирекцию института.

КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РАБОТЫ

При оценке курсовой работы учитывается уровень сформированности компетенций по следующим критериям:

- глубина анализа проблемы, уровень ее теоретической проработки;
- объем и качество экспериментальных исследований;
- самостоятельность разработки;
- полнота и качество вносимых предложений по рассматриваемой проблеме;
- степень владения современными программными продуктами и компьютерными технологиями;
- качество презентации результатов работы;
- навыки публичной дискуссии, защиты научных идей, предложений и рекомендаций;
- общий уровень культуры общения с аудиторией;
- готовность к практической деятельности в области нефтегазопереработки;
- отзыв руководителя.

Оценка «отлично» выставляется студенту, если он имеет положительный отзыв руководителя, при защите демонстрирует:

- глубину анализа проблемы, высокий уровень ее теоретической проработки; полноту и качество вносимых предложений по рассматриваемой проблеме; высокое качество презентации результатов работы; высокий уровень культуры общения с аудиторией;
- умение обосновать объем и обеспечить качество экспериментальных исследований; возможность внедрения результатов работы в производство; готовность к практической деятельности в области нефтегазопереработки;
- владение современными программными продуктами и компьютерными технологиями; навыками самостоятельной разработки проблемы; публичной дискуссии, защиты собственных научных идей, предложений и рекомендаций.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он имеет положительный отзыв руководителя, при защите демонстрирует:

- хороший уровень теоретической проработки проблемы; полноту вносимых предложений по рассматриваемой проблеме; качество презентации результатов работы; уровень культуры общения с аудиторией;
- умение обеспечить качество экспериментальных исследований; возможность внедрения результатов работы в производство; готовность к практической деятельности в области нефтегазопереработки;
- владение современными компьютерными технологиями; навыками разработки проблемы; публичной дискуссии, защиты собственных научных идей, предложений и рекомендаций.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет положительный отзыв руководителя, при защите демонстрирует:

- недостаточно высокие уровень теоретической проработки проблемы, качество вносимых предложений, качество презентации результатов работы; средний уровень культуры общения с аудиторией;
- готовность к практической деятельности в области нефтегазопереработки; испытывает затруднения при обосновании объема экспериментальных исследований, возможности внедрения результатов работы в производство;
- владение современными компьютерными технологиями, навыками разработки проблемы с помощью руководителя; испытывает затруднения в ходе публичной дискуссии, защиты собственных предложений и рекомендаций.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет отзыв руководителя с серьезными замечаниями, при защите демонстрирует:

- недостаточные уровень теоретической проработки проблемы, качество вносимых предложений, качество презентации результатов работы, уровень культуры общения с аудиторией;
- испытывает затруднения при обосновании объема экспериментальных исследований, недостаточно подготовлен к практической деятельности в области нефтегазопереработки;
- слабое владение современными компьютерными технологиями, навыками разработки проблемы; испытывает затруднения в ходе публичной дискуссии.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

1. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи) [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Химическая технология и биотехнология" и специальности "Химическая технология" / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк. - 3-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2010. – 542 с.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы химической технологии. Учебное пособие [Электронный ресурс] / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. - СПб : Химиздат, 2011. - 439 с. - ISBN 978-5-93808-194-9. - URL: <http://biblioclub.ru/>

Дополнительная литература:

1. Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». – 2-е изд., испр. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. – 608 с.
2. Леонтьева, А. И. Оборудование химических производств : учеб. / А. И. Леонтьева. – Москва : Химия : КолосС, 2008. – 479 с.
3. Потехин, В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки : учебник для студентов химико-технологических специальностей высших учебных заведений / В.М. Потехин, В.В. Потехин. - [2-е изд., испр. и доп.]. - Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. - 940 с.
4. Технология переработки нефти : в 2 ч. : учеб.пособие / [О. Ф. Глаголева, В. М. Капустин, Т. Г. Гюльмисарян [и др.]] ; под ред. О. Ф. Глаголевой, В. М. Капустина, Ч.1, Первичная переработка нефти. – М. : Химия : КолосС, 2005. – 400 с. – Гриф: Доп. МО.
5. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / [Г. М. Островский, Р. Ш. Абиев, В. М. Барабаш и др.] / [под ред. Г. М. Островского], Ч.1. – СПб. : Проффессионал, 2004. – 848 с.
6. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии : учебник для вузов / А. И. Скобло, Ю. К. Молоканов, А. И. Владимиров, В. А, Щелкунов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 2000. – 677 с.
7. Основные процессы и аппараты химической технологии : пособие по проектированию / [Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и др.] ; под ред. Ю. И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1991. – 496 с.
8. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии : учеб.пособие : в 2 кн. / Ю.И. Дытнерский, Ч.1, Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – М. : Химия, 2002. – 400 с.

Интернет-ресурсы:

1. [http:// biblioclub.ru](http://biblioclub.ru) – Университетская библиотека онлайн
2. <http://e.lanbook.com> – Издательство «Лань»
3. <http://edu-online.su> – единый образовательный портал.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ И ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. зав. кафедрой ТПНиПЭ

А.Ю. Калиниченко

подпись, инициалы, фамилия

«__» _____ 201_ г.

ЗАДАНИЕ
на курсовую работу

Студент

фамилия, имя, отчество

_____ группа

1. Тема:

2. Срок представления проекта к защите

3. Исходные данные для проектирования:

4. Содержание пояснительной записки:

4.1. Литературный обзор:

4.2. Аппаратурное оформление процесса:

4.3. Расчетный раздел:

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Дата выдачи задания

Руководитель проекта

подпись

инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению:

подпись, дата

инициалы, фамилия

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ И ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. зав. кафедрой ТПНиПЭ

А.Ю. Калиниченко

подпись, инициалы, фамилия

«__» _____ 201_ г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовой работе по дисциплине

«Процессы и аппараты химической технологии»

наименование учебной дисциплины

на тему:

Автор работы

подпись, дата

инициалы, фамилия

Направление

шифр, наименование

Группа

Руководитель курсовой работы

подпись, дата

инициалы, фамилия

Работа защищена _____ Оценка

Члены комиссии:

подпись, дата

инициалы, фамилия

подпись, дата

инициалы, фамилия

подпись, дата

инициалы, фамилия

Ставрополь
201_ г.

ОТЗЫВ
на курсовую работу студента/ки ____ курса, группы _____
ФИО
тема

Актуальность: курсовая работа посвящена

В первой главе

Вторая глава

Третья глава

Выводы, сделанные в Заключение, соответствуют целям работы.

Проанализирован объем литературы...

За время работы студент/ка проявил/а себя как.....

Таким образом, работа выполнена на ... уровне, соответствует требованиям, предъявляемым к курсовым работам, и заслуживает ... оценки.

Научный руководитель

степень, звание,

должность, место работы

ФИО

Дата