

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Инженерно-физический факультет

Ю.А. Гужель

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие. Часть 1. Гидромеханические процессы и
аппараты

Благовещенск
2019

ББК 35

Г 93

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета
инженерно-физического факультета
Амурского государственного
университета*

Гужель Ю.А.

Процессы и аппараты химической технологии: Учебное пособие. Часть первая. Гидромеханические процессы и аппараты / Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. – 96 с.

В учебном пособии рассмотрены теоретические основы построения, описание и инженерного расчета основных гидромеханических процессов, а также принципы устройства и функционирования аппаратуры. Раскрыты основные понятия и соотношения, основные закономерности протекания гидромеханических процессов. Особое внимание уделяется вопросам гидравлики, структуре потоков и режимам течения жидкостей, перемещению жидкостей и газов.

Пособие может быть использовано при написании конспектов и подготовке к практическим занятиям.

В авторской редакции

Рецензенты: И.В. Бибик, доцент кафедры техносферной безопасности и природообустройства Дальневосточного ГАУ
Н.А. Фролова, к.т.н., доцент кафедры безопасности жизнедеятельности АмГУ.

© Амурский государственный университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И СООТНОШЕНИЯ.....	5
1.1 Введение.....	5
1.2 Классификация основных процессов и аппаратов химической технологии	7
1.3 Общие принципы расчета, разработки и проектирования аппаратов химической технологии	11
ГЛАВА 2 ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ	13
2.1 Основы гидравлики. Основные определения	13
2.2 Гидростатика	19
2.3 Гидродинамика	22
ГЛАВА 3 ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ	33
3.1 Классификация насосов. Типовая схема и основные характеристики насосной установки	33
3.2 Основные параметры насосов	38
3.3 Центробежные насосы	44
3.4 Поршневые насосы	50
3.5 Сжатие газов	53
3.6 Основные типы компрессоров, газодувок и вентиляторов	55
ГЛАВА 4 РАЗДЕЛЕНИЕ ЖИДКИХ И ГАЗОВЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ	62
4.1 Характеристика дисперсных систем	62
4.2 Разделение жидких систем	64
4.2.1 Материальный баланс процесса разделения	64
4.2.2 Отстаивание	65
4.2.3 Фильтрация	69
4.2.4 Центрифугирование	73

4.3 Разделение газовых систем (очистка газов)	77
ГЛАВА 5 ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В ЖИДКИХ СРЕДАХ	91
5.1 Общие сведения	91
5.2 Механическое перемешивание	92
5.3 Пневматическое перемешивание	94

ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И СООТНОШЕНИЯ

1.1 Введение

Почти каждая наука, в особенности связанная с последующим практическим использованием ее теоретических изысканий, проходит «собирательную стадию», когда она оперирует разрозненными объектами и фактами. По-настоящему наукой она становится на стадии обобщений, когда появляется возможность интерпретировать эти факты с общих позиций, обосновывать некие общие закономерности, прогнозировать ситуацию. Так, общая химия стала наукой с появлением периодического закона.

Вплоть до конца XIX века технологи в построении промышленных процессов ориентировались на знание отдельных фактов и правил – процессы и аппараты химической технологии (ПАХТ) находились на описательном (собирательном) этапе. Вместе с тем передовые деятели науки и промышленности в России и за рубежом уже в конце XIX – начале XX века ясно видели необходимость формирования технологических принципов, установления достаточно общих закономерностей явлений и процессов. Однако попытки к описанию процессов с единых научных позиций до начала 20-х годов XX века нельзя считать успешными. Вряд ли можно назвать дату становления науки и курса ПАХТ в современном их понимании, становление происходило постепенно. В начале 20-х годов появились одна за другой две книги Л.Ф. Фокина «Методы и орудия химической техники», где в отдельные главы были выделены некоторые технологические приемы в их современной классификации, например: компрессоры, разделение газов, центрифугирование, фильтрация, выпаривание, дистилляция и ректификация и др. Однако все же это был преимущественно подход на описательном уровне, а расчетные формулы приводились без их вывода и анализа.

В последние десятилетия наука и учебный курс ПАХТ претерпевают существенные количественные и качественные изменения. В курс вливаются новые элементарные технологические приемы, обогащающие химическую технологию; с другой стороны, отдельные разделы курса выделяются в

самостоятельные научные и учебные дисциплины. Появляются общие учебники. Постепенно усилиями отечественных и зарубежных ученых наука приобрела современные очертания – как по структуре, так и по содержанию. В нашей стране развитие этой науки связано с именами Н.И. Гельперина, А.Г. Касаткина, А.Н. Плановского и ряда других ученых и педагогов.

Процессы и аппараты химической технологии – наука о принципах организации и расчета химико-технологических процессов (ХТП) и принципах конструирования технологической аппаратуры.

Термин «процесс» (лат. processes – продвижение) в данном курсе трактуется как изменение состояния системы (природной и технологической), происходящее в тех или иных условиях. Система – это совокупность элементов, взаимодействующих между собой и окружающей средой. Процессы могут быть естественными (испарение воды с поверхности водоемов, нагрев и охлаждение поверхности земли и т.д.) и производственными (технологическими), целью которых является переработка природного сырья в средства производства и предметы потребления.

Аппарат (лат. apparatus – оборудование) – устройство, приспособление, оборудование, предназначенное для проведения технологических процессов. Обычно аппаратом является емкость, снабженная различными механическими приспособлениями.

Предметом курса ПАХТ являются процессы и аппараты, составляющие основу большинства химических производств.

Цель курса – знать базовые закономерности процессов и принципы их моделирования, усвоить общие подходы к выбору и расчету аппаратов для осуществления этих процессов, уметь производить эти расчеты с использованием экспериментальных и справочных данных, владеть навыками практической работы с типовыми аппаратами.

Овладение наукой ПАХТ позволяет решать следующие задачи:

а) эксплуатационные:

- выбирать наилучшие (оптимальные) технологические режимы;
- добиваться высокой производительности аппаратов;
- повышать качество продукции;
- успешно решать экологические проблемы;
- б) проектные:
 - разрабатывать высокоэффективные и малоотходные технологические схемы;
 - выбирать наиболее рациональные типы аппаратов;
- в) производственные:
 - технологически правильно и научно обоснованно рассчитывать выбранные аппараты с использованием современных вычислительных средств;
 - разрабатывать принципиально новые методы расчета ПАХТ;
- г) научно-исследовательские:
 - изучать основные факторы, определяющие течение процесса;
 - получать обобщенные зависимости для их расчета;
 - быстро внедрять результаты лабораторных исследований в производство.

Курс ПАХТ призван дать студенту достаточно широкие сведения, позволяющие ему в дальнейшем самостоятельно ориентироваться в конкретных технологических процессах – в их анализе, математическом описании и инженерном расчете, в подходах к конструированию аппаратуры.

1.2 Классификация основных процессов и аппаратов химической технологии

Классификация основных процессов химической технологии производится в зависимости от тех закономерностей, которые характеризуют и описывают их протекание. Все процессы химической технологии могут быть объединены в следующие группы:

1. Гидромеханические процессы описываются законами гидромеханические: осаждение взвешенных в газовой или жидкой среде

твердых или жидких частиц под действием силы тяжести, сил электрического поля, центробежной силы; фильтрование газов или жидкостей от твердых частиц через слой зернистого или пористого материала под действием разности давлений; перемешивание в жидкой среде; перемешивание газов, жидкостей и твердых частиц и др. Движущей силой этих процессов является разность плотностей фаз и разность давлений. К этой группе примыкают механические процессы, базирующиеся в основном на законах механики твердого тела.

2. Тепловые (теплообменные) процессы описываются законами теплопередачи (теплообмена): нагревание, охлаждение, конденсация, испарение, плавление, затвердевание и др. Происходит передача тепла от одного тела к другому; движущей силой этих процессов является разность температур.

3. Массообменные (диффузионные) процессы описываются законами массопередачи (массообмена), их скорость определяется скоростью перехода вещества из одной фазы в другую. Вещество переходит из одной фазы в другую за счет диффузии. Фазы могут быть две газовые, две жидкие, газ-жидкость, газ-твердое тело, жидкость-твердое тело. Движущей силой процессов является разность концентраций вещества (компонента) в разных фазах. Примерами таких процессов являются ректификация, дистилляция, перегонка, абсорбция, адсорбция, экстракция, сушка и др.

4. Химические (реакционные) процессы чрезвычайно разнообразны; в них осуществляется химическое превращение исходного вещества. Скорость процесса определяется законами химической кинетики. В подавляющем большинстве современные химические процессы используют катализаторы, которые избирательно увеличивают скорость определенной реакции. Примеры химических процессов разнообразны: термический крекинг, пиролиз, каталитический крекинг, гидрокрекинг, каталитический риформинг, гидроочистка, алкилирование, изомеризация, полимеризация и др.

Приведенная выше классификация ПАХТ не является единственно

возможной. Не менее важны также другие классификационные срезы.

По способу организации процессы подразделяются на периодические, непрерывные и комбинированные.

Периодические процессы проводятся в аппаратах, в которые через определенные промежутки времени загружаются исходные материалы; и после их соответствующей переработки (например, проведения химической реакции) происходит выгрузка конечного продукта. По окончании разгрузки аппарата и его повторной загрузки процесс повторяется снова. Таким образом, периодический процесс характеризуется тем, что все его стадии протекают в одном месте (одном аппарате), но в разное время. Аппарат, работающий в периодическом режиме, состоящем из загрузки материалов, собственно процесса и выгрузки продуктов, может быть и замкнутой и открытой системой. Например, автоклав, герметически закрытый во время протекания процесса, – система замкнутая, а колонна периодической ректификации – система открытая, поскольку в ходе процесса непрерывно отводится дистиллят.

Непрерывные процессы осуществляются в проточных аппаратах. Поступление исходных материалов в аппарат и выгрузка конечных продуктов производится одновременно и непрерывно. Следовательно, непрерывный процесс характеризуется тем, что все его стадии протекают одновременно, но разобщены в пространстве, т.е. осуществляются в разных аппаратах или различных частях одного аппарата. Непрерывно работающий аппарат – обязательно открытая система.

Комбинированные процессы – это либо непрерывные процессы, отдельные стадии которых проводятся периодически, либо периодические процессы, одна или несколько стадий которых протекает непрерывно.

В зависимости от того, изменяются или не изменяются во времени параметры процесса, их подразделяют на стационарные (установившиеся) и нестационарные (неустановившиеся).

Стационарным называют режим, все параметры которого не

изменяются во времени; в любой точке все скорости, концентрации и температура с течением времени остаются постоянными. Такая ситуация характерна для непрерывных процессов.

В нестационарном режиме хотя бы часть параметров меняется во времени. К нестационарным относятся все периодические и полунепрерывные процессы.

Стационарные процессы отличаются стабильностью как ситуации в технологическом аппарате, так и характеристик получаемого продукта; они легко контролируются и управляются; для них обычно характерна высокая производительность. По этим причинам чаще всего стремятся к осуществлению технологических процессов в непрерывном режиме. Однако в ряде случаев технологические особенности процесса приводят к необходимости его проведения в периодическом режиме. Это нередко характерно для малотоннажных производств и при использовании одной и той же аппаратуры для попеременного получения партий разных продуктов; возможны и иные причины.

Для организации технологического процесса существенно агрегатное состояние рабочих тел, отсюда – возможность классификации на основе фазового состояния. В зависимости от количества участвующих в процессе фаз различают гомо- и гетерогенные процессы.

В зависимости от числа компонентов в системе различают процессы с одно- и многокомпонентными потоками.

Аналогична и классификация аппаратов по назначению основного процесса, протекающего в аппарате: гидромеханические аппараты (отстойники, фильтры, мешалки и др.); теплообменные аппараты (холодильники, конденсаторы, испарители и др.); массообменные аппараты (ректификационные, абсорбционные, экстракционные колонны, адсорберы, сушилки и др.); реакторы.

Классификация процессов и аппаратов весьма условна, так как в реальных аппаратах одновременно протекает несколько разных процессов.

Например, при массообменных процессах проходят также гидромеханические и тепловые процессы, а в реакторах к ним присоединяется и химический процесс.

1.3 Общие принципы расчета, разработки и проектирования аппаратов химической технологии

Целью расчета процессов и аппаратов химической технологии является определение материальных и энергетических затрат на проведение процесса, оптимальных условий протекания процесса, а также основных размеров аппаратов, применяемых для их осуществления.

Порядок расчета:

а) исходя из законов гидродинамики и термодинамики, выявляют условия равновесия и определяют направление течения процесса;

б) по данным о равновесии устанавливают начальные и конечные значения процессов;

в) на основании законов сохранения составляют материальный и тепловой балансы;

г) по величинам, характеризующим рабочие и равновесные параметры, определяют движущую силу процесса;

д) на основании законов кинетики находят коэффициент скорости процесса;

е) по полученным данным определяют основной размер аппарата. Это может быть площадь поперечного сечения, поверхность нагрева, поверхность контакта фаз.

Численные значения величин, входящих в математическое описание технологического процесса, зависят от единиц измерения этих величин. Совокупность согласованных единиц измерения составляет систему единиц.

В качестве предпочтительной в настоящее время принята Международная система единиц – СИ. Рекомендуется первоначально выразить единицы измерения всех величин в единой системе единиц (например, СИ), только после этого приступать к расчетам. Попытка вести

перерасчет единиц в ходе самого расчета – источник ошибок.

Для установления размерности и единиц измерения какой-либо величины используются два основных способа:

1) на основе физического смысла (определения) самой величины; если, например, скоростью называется путь, пройденный в единицу времени, то, очевидно, единица измерения скорости будет м/с; если давление определяется как сила, приходящаяся на единицу поверхности, то единица измерения выразится как Н/м²;

2) исходя из какого-либо теоретического соотношения, содержащего искомую величину, при условии, что единицы измерения остальных входящих в это соотношение величин известны.

Технологические расчеты должны проводиться с определенной точностью. Уровень этой точности (допустимая погрешность) обуславливается ответственностью расчета и точностью исходных величин, которыми мы располагаем. В равной мере неприемлемы как недостаточная, так и избыточная точность расчета.

ГЛАВА 2 ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ

2.1 Основы гидравлики. Основные определения

Многие технологические процессы химической промышленности связаны с движением жидкостей, газов или паров, перемешиванием в жидких средах, а также с разделением неоднородных смесей путем отстаивания, фильтрования и центрифугирования. Скорость всех указанных физических процессов определяется законами гидромеханики. Поэтому такие процессы называются гидромеханическими.

Законы гидромеханики и их практические приложения изучаются в гидравлике, которая состоит из двух разделов: гидростатики и гидродинамики. Гидростатика рассматривает законы равновесия в состоянии покоя, а гидродинамика – законы движения жидкостей и газов.

Практическое значение гидравлики весьма велико, так как она является основой ряда специальных дисциплин. Раздел гидравлики, в котором рассматриваются законы равновесия жидкостей, называют гидростатикой; часть гидравлики, где изучаются законы движения жидкости, называется гидродинамикой. Эти же задачи рассматриваются в теоретической гидромеханике. Однако методы исследования при этом различны. В гидравлике применяются упрощенные приемы решения задач, а в теоретической гидромеханике используются строгие математические методы, позволяющие получить общие теоретические решения задач.

Гидравлические машины предназначены для преобразования механической энергии двигателя в энергию перемещаемой жидкости (насосы) или гидравлической энергии потока жидкости в механическую энергию (гидродвигатели).

Основные понятия и определения гидравлики:

Жидкость – физическое тело, обладающее большой подвижностью частиц, которая объясняется слабой связью между молекулами. Поэтому жидкости легко изменяют свою форму, т.е. легко деформируются, не дробясь на части, под действием сил самой незначительной величины или, другими

словами, обладают текучестью при приложении к ним незначительных сил сдвига. Жидкость не имеет своей формы, но принимает форму сосуда, в котором она находится.

Все жидкости делятся на капельные и газообразные. Таким образом, под это определение попадают и газы, которые, в отличие от жидкостей в общепринятом смысле этого слова (или капельных жидкостей), называются «упругими» жидкостями.

Капельная жидкость имеет объем, и если объем меньше объема сосуда, то жидкость занимает часть объема сосуда и образует свободную поверхность. В отличие от капельных жидкостей газы, как упругие жидкости, не имеют своих определенных формы и объема. Они всегда занимают весь объем сосуда, в котором находятся.

Жидкости отличаются от твердых тел тем, что они обладают такими свойствами, как адгезия, удельный вес, поверхностное натяжение и упругость насыщенного пара.

Идеальная жидкость – жидкость, которая не сжимается под действием давления, не изменяет плотности при изменении температуры и не обладает вязкостью.

К основным физическим свойствам жидкостей относятся:

1. Плотность – количество массы жидкости, содержащееся в единице ее объема:

$$\rho = m/V, \text{ кг/м}^3 \quad (2.1)$$

Удельный вес (γ) (вес единицы объема жидкости) и плотность связаны зависимостью:

$$\gamma = \rho g, \text{ Н/м}^3, \quad (2.2)$$

где $g=9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

2. Давление

Жидкость оказывает давление на дно и стенки сосуда, в котором она находится, и на поверхность любого погруженного в нее тела. Давление в любой точке жидкости одинаково по всем направлениям, поскольку в

противном случае происходило бы перемещение жидкости внутри занимаемого ею объема. В СИ выражается в н/м².

В расчетах давление часто выражают в единицах высоты Н столба манометрической жидкости (воды, ртути и др.)

Между давлением, выраженным в н/м² и в единицах высоты столба жидкости, существует простая связь:

$$p = \gamma H = \rho g H \quad (2.3)$$

в соответствии с этим можно установить следующие соотношения между различными единицами давления: 1 атм = 760 мм.рт.ст. = 1,033 кгс/см² = 10330 кгс/м² = 101300 н/м²

Различают следующие виды давления: абсолютное, избыточное и вакуум.

Взаимосвязь между всеми видами давления представлена ниже:

$$P_{\text{абс}} - \text{абсолютное}, \quad P_{\text{абс}} = P_{\text{ат}} + P_{\text{изб}};$$

$$P_{\text{изб}} - \text{избыточное}, \quad P_{\text{изб}} = P_{\text{абс}} - P_{\text{ат}};$$

$$P_{\text{вак}} - \text{вакуумное}, \quad P_{\text{изб}} = -P_{\text{вак}}.$$

Приборы для измерения давления (манометры или вакуумметры) показывают не абсолютное давление внутри замкнутого объема, а разность между абсолютным и атмосферным давлением. Эту разность называют избыточным давлением, если давление в объеме превышает атмосферное, и разрежением, если оно ниже атмосферного.

3. Вязкость

Вязкость – это способность жидкости сопротивляться сдвигу, т.е. свойство, обратное текучести (более вязкие жидкости являются менее текучими). Вязкость проявляется в возникновении касательных напряжений (напряжений трения).

Согласно гипотезе Ньютона касательное напряжение, возникающее в слое жидкости на расстоянии у от стенки, определяется зависимостью:

$$\tau = \mu \frac{dw}{dy} \quad (2.4)$$

где dw/dy – градиент скорости (записан упрощенно), характеризующий интенсивность нарастания скорости w при удалении от стенки (по оси y).

Тогда сила сопротивления равна:

$$F_{mp} = -\mu S \frac{dw}{dn} \quad (2.5)$$

Знак минус означает, что нормаль направлена в сторону уменьшения скорости.

Зависимости (2.4) и (2.5) называют законом трения Ньютона. Он был позднее экспериментально обоснован профессором Н.П. Петровым. Течения большинства жидкостей, используемых в гидравлических системах, подчиняются закону трения Ньютона, и их называют ньютоновскими жидкостями. Однако следует иметь в виду, что существуют жидкости, в которых закон (2.4) в той или иной степени нарушается. Такие жидкости называют неньютоновскими.

Величина μ , входящая в (2.4) и (2.5), получила название динамической вязкости жидкости.

Однако на практике более широкое применение нашла кинематическая вязкость:

$$\nu = \mu/\rho, \text{ (м}^2\text{/с)} \quad (2.6)$$

Динамическая вязкость в СИ выражается в н·сек/м². В справочной литературе значения вязкости часто приводятся в пузах (пз), сантипузах (спз) $1 \text{ н·сек/м}^2 = 10 \text{ пз} = 1000 \text{ спз}$.

Единицей кинематической вязкости является стокс (ст), равный $1 \text{ см}^2\text{/сек}$ или 100 сантистоксам (сст). В СИ единица кинематической вязкости равна $1 \text{ м}^2\text{/сек} = 10^4 \text{ ст}$.

Вязкость жидкостей существенно зависит от температуры, причем вязкость капельных жидкостей с повышением температуры падает, а

вязкость газов – растет. Это объясняется различным молекулярным строением жидкостей и газов.

Вязкость среды оказывает существенное влияние на режимы течения жидкостей и на сопротивления, возникающие при их движении. Поэтому интенсификация многих гидродинамических, а также тепловых и массообменных процессов часто достигается при уменьшении вязкости среды, например путем повышения температуры капельных жидкостей.

4. Поверхностное натяжение. В ряде процессов химической технологии капельная жидкость при движении соприкасается с газом (или паром) или с другой капельной жидкостью, практически не смешиваясь с первой. Поверхность раздела между фазами стремится к минимуму под действием поверхностных сил. Соответственно капли, взвешенные в газе (паре) или в другой жидкости, и пузырьки газа в жидкости принимают форму, более или менее близкую к шарообразной. Это объясняется тем, что молекулы жидкости внутри объема испытывают примерно одинаковое воздействие соседних молекул, в то время как молекулы, находящиеся непосредственно у поверхности раздела фаз, притягиваются молекулами внутренних слоев жидкости сильнее, чем молекулами окружающей среды. В результате на поверхности жидкости возникает давление, направленное внутрь жидкости по нормали к ее поверхности, которое и стремится уменьшить эту поверхность до минимума.

Следовательно, для увеличения поверхности, т.е. для создания новой поверхности, необходима некоторая затрата энергии. Работу, требуемую для образования единицы новой поверхности, называют межфазным, или поверхностным, натяжением и обозначают σ .

$$\sigma = F/S, \quad (2.7)$$

где σ – поверхностное натяжение;

F – поверхностная энергия, Дж;

S – площадь поверхности, м².

Поверхностное натяжение выражают в следующих единицах в СИ:
 $\text{дж/см}^2 = \text{н}\cdot\text{м/м}^2 = \text{н/м}$.

5. Сжимаемость – это способность жидкости изменять свой объем под действием давления. Сжимаемость капельных жидкостей и газов существенно различается. Так, капельные жидкости при изменении давления изменяют свой объем крайне незначительно. Газы, наоборот, могут значительно сжиматься под действием давления и неограниченно расширяться при его отсутствии.

Сжимаемость капельных жидкостей характеризуется коэффициентом объемного сжатия β (Па^{-1}):

$$\beta = -\frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V_0}, \quad (2.8)$$

где Δp – изменение давления, Па;

ΔV – изменение объема под действием изменения давления, м^3 ;

V_0 – начальный объем, м^3 .

Знак минус в формуле обусловлен тем, что при увеличении давления объем жидкости уменьшается, т.е. положительное приращение давления вызывает отрицательное приращение объема.

Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия β , называется объемным модулем упругости жидкости (или модулем упругости).

Модуль упругости капельных жидкостей изменяется при изменении температуры и давления. Однако в большинстве случаев его считают постоянной величиной, принимая за нее среднее значение в данном диапазоне температур или давлений. Различают изотермический и адиабатический модули упругости. Причем обычно для расчетов используют изотермический модуль.

6. Температурное расширение

Капельные жидкости изменяют свой объем и при колебании температуры. Это их свойство, называемое температурным расширением

(так как с увеличением температуры объем их увеличивается), характеризуется коэффициентом объемного расширения β_t , (K^{-1}):

$$\beta_t = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta T}, \quad (2.9)$$

где ΔT – изменение температуры, К;

ΔV – изменение объема под действием изменения температуры, m^3 ;

V_0 – начальный объем, m^3 .

Газы весьма значительно изменяют свой объем при изменении температуры.

2.2 Гидростатика

В гидростатике изучается равновесие жидкостей, находящихся, в общем случае, в состоянии относительного покоя, при котором в движущейся жидкости ее частицы не перемещаются друг относительно друга. При этом силы внутреннего трения отсутствуют, что позволяет считать жидкость идеальной.

В состоянии относительного покоя форма объема жидкости не изменяется, и она, подобно твердому телу, перемещается как единое целое. Так, жидкость находится в относительном покое в перемещающемся сосуде (например, в цистерне), внутри вращающегося с постоянной угловой скоростью барабана центрифуги и т.д. в подобных случаях покой рассматривают относительно стенок движущегося сосуда.

Жидкость в неподвижном сосуде находится в абсолютном покое (относительно поверхности земли), который в таком понимании является частным случаем относительного покоя.

Независимо от вида покоя на жидкость действуют силы тяжести и давления.

Соотношение между силами, действующими на жидкость, которая находится в состоянии покоя, определяющее условия равновесия жидкости, выражается дифференциальными уравнениями Эйлера:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = X \quad ; \quad \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} = Y \quad ; \quad \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} = Z \quad (2.10)$$

или

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) = Xdx + Ydy + Zdz \quad (2.11)$$

Уравнение (2.11) можно записать в виде:

$$\frac{dp}{\rho} = Xdx + Ydy + Zdz \quad (2.12)$$

Уравнение (2.12) является основным уравнением гидростатики в дифференциальной форме.

Частные случаи основного уравнения гидростатики:

1) поверхности уровня (поверхности, давление во всех точках которых одинаково, т.е. $dp=0$):

$$Xdx + Ydy + Zdz = 0 \quad (2.13)$$

2) из массовых сил действует только сила тяжести ($X=0$; $Y=0$; $Z=-g$):

$$\frac{dp}{\rho} = -gdz \quad (2.14)$$

или, преобразовав, получим:

$$\frac{dp}{\rho g} + dz = 0 \quad (2.15)$$

В случае несжимаемой и однородной жидкости $\rho=\text{const}$. Тогда

$$dz + d\left(\frac{p}{\rho g}\right) = 0 \quad (2.16)$$

или

$$d\left(z + \frac{p}{\rho g}\right) = 0 \quad (2.17)$$

откуда после интегрирования получим

$$z + \frac{p}{\rho g} = \text{const} \quad (2.18)$$

Для двух произвольных плоскостей 1 и 2 уравнение (2.18) выражают в форме:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \quad (2.19)$$

Уравнение (2.18) или (2.19) часто называют основным уравнением гидростатики. Оно является частным случаем закона сохранения энергии.

В уравнении (2.19) z_1 и z_2 – высоты расположения двух точек внутри покоящейся однородной жидкости над произвольно выбранной горизонтальной плоскостью отсчета, а p_1 и p_2 – гидростатические давления в этих точках.

Член z в уравнении гидростатики (2.18), представляющий собой высоту расположения данной точки над произвольно выбранной плоскостью сравнения, называется нивелирной высотой (выражается в единицах длины, м).

Величину $\frac{p}{\rho g}$ называют напором давления или пьезометрическим напором.

Следовательно, согласно основному уравнению гидростатики, для каждой точки покоящейся жидкости сумма нивелирной высоты и пьезометрического напора есть величина постоянная.

Члены основного уравнения гидростатики имеют определенный энергетический смысл. Так, нивелирная высота z , называемая также геометрическим (высотным) напором, характеризует удельную потенциальную энергию положения данной точки выбранной поверхностью сравнения, а пьезометрический напор – удельную потенциальную энергию давления в точке. Сумма указанных энергий, называемая полным гидростатическим напором, или просто статическим напором, равна общей потенциальной энергии, приходящейся на единицу веса жидкости.

Уравнение (2.20) можно записать в форме

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2) \quad (2.20)$$

Данное уравнение является выражением закона Паскаля, согласно которому давление, создаваемое в любой точке покоящейся несжимаемой жидкости, передается одинаково всем точкам ее объема.

Основное уравнение гидростатики, выражаемое часто в виде закона Паскаля, имеет ряд важных практических приложений, рассмотрим некоторые из них.

1. Принцип сообщающихся сосудов и его использование. В открытых или закрытых находящихся под одинаковым давлением сообщающихся сосудах, заполненных однородной жидкостью, уровни ее располагаются на одной высоте независимо от формы и поперечного сечения сосудов. Этот принцип используется, в частности, для измерения уровня жидкости в закрытых аппаратах с помощью водомерных стекол.

2. Пневматическое измерение количества жидкости в резервуарах. Для контроля за объемом жидкости в каком-либо резервуаре, например, подземном.

3. Гидростатические машины, например гидравлические прессы, применяемые в химической промышленности для прессования и брикетирования различных материалов.

2.3 Гидродинамика

Гидродинамика – наука, изучающая законы движения жидкостей и практическое их применение.

Движущей силой при движении жидкостей является разность давлений, которая создается с помощью насосов или компрессоров либо вследствие разности уровней или плотностей жидкости.

К основным характеристикам движения жидкостей относят:

1. Скорость и расход жидкости. Рассмотрим движение жидкости по трубе постоянного сечения.

Количество жидкости, протекающей через поперечное сечение потока в единицу времени, называют расходом жидкости. Различают объемный

расход, измеряемый, например в м³/с или м³/ч, и массовый расход, измеряемый в кг/с, кг/ч.

В разных точках живого сечения потока скорость частиц жидкости неодинакова. Около оси трубы скорость максимальна, а по мере приближения к стенкам она уменьшается. Однако во многих случаях закон распределения скоростей в поперечном сечении потока неизвестен или его трудно учесть. Поэтому в расчетах обычно используют неистинные (локальные) скорости, а фиктивную среднюю скорость. Эта скорость ω (м/с) выражается отношением объемного расхода жидкости Q (м³/с) к площади живого сечения S (м²) потока:

$$\omega = \frac{Q}{S} \quad (2.21)$$

откуда объемный расход:

$$Q = \omega S \quad (2.22)$$

Массовый расход G (кг/с) определяется произведением:

$$G = \rho \omega S, \quad (2.23)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Величина $\rho \omega$ представляет собой массовую скорость жидкости (в кг/(м²·с)):

$$W = \rho \omega \quad (2.24)$$

2. Гидравлический радиус и эквивалентный диаметр. При движении жидкости через сечение любой формы, отличной от круглой, в качестве расчетного линейного размера принимают гидравлический радиус или эквивалентный диаметр.

Под гидравлическим радиусом r_r (м) понимают отношение площади затопленного сечения трубопровода или канала, через которое протекает жидкость, т.е. живого сечения потока, к смоченному периметру:

$$r_r = \frac{S}{\Pi}, \quad (2.25)$$

где S – площадь сечения потока жидкости, м²;

Π – смоченный периметр, м.

Для круглой трубы с внутренним диаметром d и, значит, площадью свободного сечения $S=\pi d^2/4$ при сплошном заполнении его жидкостью $\Pi=\pi d$, откуда гидравлический радиус

$$r_r = \frac{S}{\Pi} = \frac{\pi d^2/4}{\pi d} = \frac{d}{4} \quad (2.26)$$

Диаметр, выраженный через гидравлический радиус, представляет собой эквивалентный диаметр:

$$d=d_3=4r_r \quad (2.27)$$

Следовательно, согласно уравнению (2.25)

$$d_3 = \frac{4S}{\Pi} \quad (2.28)$$

Эквивалентный диаметр равен диаметру гипотетического трубопровода круглого сечения, для которого отношение площади S к смоченному периметру Π то же, что и для данного трубопровода некруглого сечения.

3. Установившиеся и неуставившиеся потоки. Движение жидкости является установившимся, или стационарным, если скорость частиц потока, а также все другие влияющие на его движение факторы (плотности, температуры, давления и др.), не изменяются во времени в каждой фиксированной точке пространства, через которую проходит жидкость. В этих условиях для каждого сечения потока расходы жидкости постоянны во времени.

В отличие от стационарного при неуставившемся, или нестационарном, потоке, факторы, влияющие на движение жидкости, изменяются во времени.

4. Режимы движения жидкости. Различные режимы течения жидкости можно проследить, вводя в поток подкрашенную струйку жидкости или какой-либо иной индикатор.

Впервые режимы течения жидкости изучались О. Рейнольдсом в 1883 г. на установке, изображенной на рис. 2.1.

К сосуду 1, в котором поддерживается постоянный уровень воды, присоединена горизонтальная стеклянная труба 2. В эту трубу по ее оси через

капиллярную трубку 3 вводится тонкая струйка окрашенной воды (индикатор). При небольшой скорости воды в трубе 2 окрашенная струйка вытягивается в горизонтальную нить, которая, не размываясь, достигает конца трубы (рис. 2.1 а).

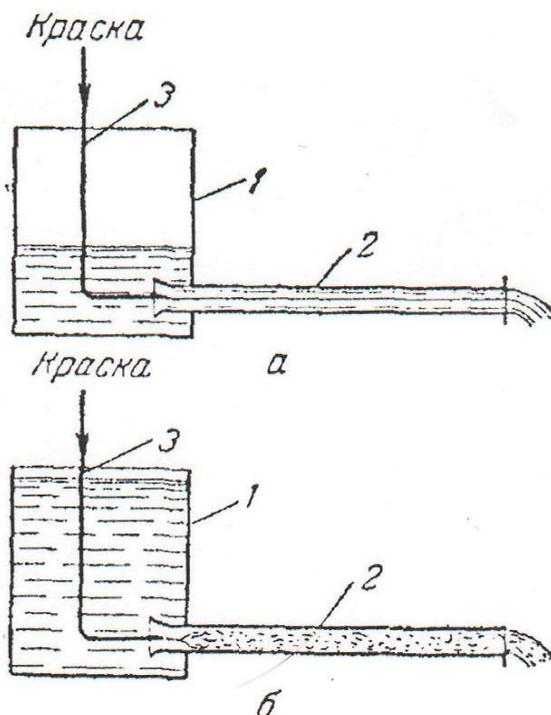


Рисунок 2.1 Установление режима течения жидкости

Это свидетельствует о том, что пути частиц прямолинейны и параллельны друг другу.

Такое движение, при котором все частицы жидкости движутся по параллельным траекториям, называют струйчатым, или ламинарным.

Если скорость воды в трубе 2 увеличить сверх определенного предела, то окрашенная струйка сначала приобретает волнообразное движение, а затем начинает размываться, смешиваясь с основной массой воды. Это объясняется тем, что отдельные частицы жидкости движутся уже не параллельно друг другу, а перемешиваются в поперечном направлении (рис 2.1 б).

Такое неупорядоченное движение, при котором отдельные частицы жидкости движутся в главном (осевом) направлении, получают также поперечные перемещения, приводящие к интенсивному перемешиванию

потока по сечению и требующие соответственно большей затраты энергии на движение жидкости, чем при ламинарном потоке. Представим себе, что частица жидкости, движущаяся у оси потока и поэтому имеющая максимальную скорость, за счет турбулентной пульсации переместилась ближе к стенке. Не трудно понять, что при этом она перенесет с собой в эту периферийную часть потока большую скорость (точнее большее количество движения), которой она обладала. Навстречу же ей перемещаются частицы, обладающие малыми поступательными скоростями, что снижает среднюю скорость у оси. Таким образом, из-за турбулентных пульсаций происходит перемешивание «быстрых» (движущихся у оси) и «медленных» (периферийных) частиц, выравнивающее средние скорости в сечении.

Совершенно таким же образом турбулентное перемешивание выравнивает по поперечному сечению температуру и концентрации.

Опыт показывает, что переход от ламинарного течения к турбулентному происходит тем легче, чем больше массовая скорость жидкости $\rho\omega$ и диаметр d и чем меньше вязкость жидкости μ . Рейнольдс установил, что указанные величины можно объединить в безразмерный комплекс $\omega d\rho/\mu$, значение которого позволяет судить о режиме движения жидкости. Этот комплекс носит название критерия Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega d\rho}{\mu} \quad (2.29)$$

Критерий Рейнольдса является мерой соотношения между силами вязкости и инерции в движущемся потоке.

Переход от ламинарного к турбулентному движению характеризуется критическим значением $Re_{кр}$. Так, при движении жидкостей по прямым гладким трубам $Re_{кр} \approx 2320$. При $Re < 2320$ течение обычно является ламинарным, поэтому данную область значений Re называют областью устойчивого ламинарного режима течения. При $Re > 2320$ чаще всего наблюдается турбулентный характер движения. Однако при $2320 < Re < 10000$ режим течения еще неустойчиво турбулентный (эту область изменения

значений Re часто называют переходной). Хотя турбулентное движение при таких условиях более вероятно, но иногда при этих значениях Re может наблюдаться и ламинарный поток. Лишь при $Re > 10000$ турбулентное движение становится устойчивым (развитым).

В случае движения жидкости через каналы некруглого сечения при расчете критерия Re вместо d используют эквивалентный диаметр, определяемый соотношением (2.28).

В промышленной практике наиболее распространено турбулентное движение жидкости.

К основным уравнениям гидродинамики относятся:

а) дифференциальное уравнение неразрывности (сплошности) потока

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\rho \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} \right) \quad (2.30)$$

Из данного уравнения легко получить уравнение расхода. В случае однонаправленного ($\omega_y = \omega_z = 0$) установившегося движения ($\frac{\partial P}{\partial \tau} = 0$) несжимаемой жидкости уравнение расхода в интегральной форме принимает вид: $\omega \rho S = const$;

б) уравнения Навье-Стокса, описывающие движение вязкой капельной жидкости:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = X - \frac{d\omega_x}{d\tau} + \nu \nabla^2 \omega_x \quad (2.31)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = Y - \frac{d\omega_y}{d\tau} + \nu \nabla^2 \omega_y \quad (2.32)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = Z - \frac{d\omega_z}{d\tau} + \nu \nabla^2 \omega_z \quad (2.33)$$

Система уравнений Навье-Стокса – один из важнейших законов сохранения количества движения. Его формулировка: Производная по времени от проекции количества движения системы на ось координат является суммой проекций на данную ось действующих на систему сил.

Частные случаи уравнения Навье-Стокса следующие.

1) Жидкость находится в относительном покое ($\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$) – получим дифференциальные уравнения равновесия Эйлера:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = 0; \quad -\frac{\partial P}{\partial y} = 0; \quad -\rho g - \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (2.34)$$

Проинтегрировав уравнение (2.34) получают основное уравнение гидростатики:

$$z + \frac{P}{\rho g} = H = const \quad (2.35)$$

2) Движение идеальной жидкости ($\mu = 0$):

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = X - \frac{d\omega_x}{d\tau}; \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = Y - \frac{d\omega_y}{d\tau}; \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = Z - \frac{d\omega_z}{d\tau} \quad (2.36)$$

Уравнения (36) являются дифференциальными уравнениями движения Эйлера.

При интегрировании уравнения (2.36) получаем уравнение Бернулли для идеальной жидкости:

$$z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\omega^2}{2g} = H = const \quad (2.37)$$

где z – нивелирная высота, или геометрический напор – это положение данной частицы жидкости относительно произвольно выбранной горизонтальной плоскости сравнения. Энергетический смысл: удельная потенциальная энергия положения;

$\frac{P}{\rho g}$ – статический, или пьезометрический, напор – давление столба жидкости над рассматриваемым уровнем. Энергетический смысл: удельная потенциальная энергия давления;

$\frac{\omega^2}{2g}$ – скоростной, или динамический, напор. Энергетический смысл: удельная кинетическая энергия в данном сечении потока;

H – полный (динамический) напор, или энергия жидкости, выраженная в метрах.

Для любого сечения или точки потока при установившемся движении идеальной жидкости сумма потенциальной $(z + \frac{P}{\rho g})$ и кинетической $(\frac{\omega^2}{2g})$ энергии жидкостей остается величиной постоянной. Таким образом, уравнение Бернулли выражает частный случай закона сохранения энергии.

Физический смысл уравнения Бернулли: в любом поперечном сечении потока идеальной жидкости полная удельная энергия жидкости постоянна и равна H .

Уравнение Бернулли для реальной жидкости выглядит иначе. Рассмотрим прямой участок трубопровода постоянного сечения (рис. 2.2).

В случае идеальной жидкости $E_1 = E_2$, так как отсутствуют силы трения.

В случае реальной жидкости $E_1 > E_2$, так как частицы жидкости встречают сопротивление, вызванное силами вязкости и различными препятствиями.

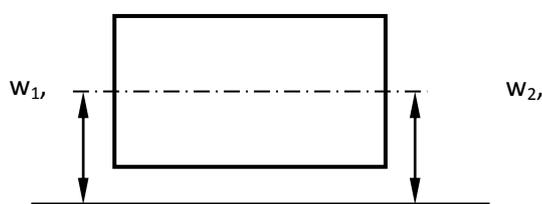


Рисунок 2.2 К уравнению Бернулли для реальной жидкости

Таким образом, уравнение Бернулли для реальной жидкости:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} + h_n \quad (2.38)$$

где h_n – величина гидравлического сопротивления или энергия, затрачиваемая на преодоление гидравлического сопротивления. Ее еще называют «потерянный напор».

То есть энергия движущейся жидкости расходуется на преодоление сопротивлений и превращается в тепло. Это тепло идет на нагревание потока и рассеивается в окружающую среду. Поэтому во всяком последующем положении или сечении потока энергия частицы будет меньше, чем в предыдущем.

Для жидкости, текущей по горизонтальному трубопроводу постоянного сечения с постоянной скоростью, потерянный напор рассчитывается по формуле:

$$h_n = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} \quad (2.39)$$

С помощью уравнения Бернулли можно определить необходимый напор (или давление) для того, чтобы жидкость с заданной скоростью транспортировалась по данному каналу (трубопроводу), а также скорость и расход жидкости, время истечения жидкости из отверстия в резервуаре.

Рассмотрим применение уравнения Бернулли для определения скоростей и расходов и времени истечения жидкостей из резервуаров.

Для определения скоростей и расходов жидкостей промышленной практике обычно применяются дроссельные приборы и пневмометрические трубки.

Разность уровней рабочей жидкости в трубках удобнее измерять не посредством пьезометрических трубок, а при помощи дифференциального манометра. Его U – образная трубка заполнена жидкостью, которая не смешивается с рабочей и имеет значительно большую плотность, чем последняя. Это позволяет измерять перепады давлений в случае значительного избыточного давления (или вакуума) в трубопроводе при относительно небольшой высоте прибора.

Более широко распространено определение скоростей и расходов жидкостей с помощью дроссельных приборов, принцип работы которых основан на измерении перепада давлений при изменении поперечного сечения трубопровода. В качестве дроссельных приборов используют мерные диафрагмы, сопла и трубы Вентури.

Для определения движущей силы гидродинамических процессов необходимо знать потерянный напор h_n (2.39), который складывается из потерь напора на трение $h_{тр}$ и на преодоление так называемых местных сопротивлений $h_{мс}$:

$$h_n = h_{mp} + h_{mc} \quad (2.40)$$

Причиной потерь на трение является вязкость жидкости. Потери на трение рассчитывают по формуле:

$$h_{mp} = \frac{\Delta P}{\rho g} = \lambda \frac{l}{d_э} \frac{w^2}{2g} \quad (2.41)$$

где l – длина трубопровода, м;

$d_э$ – эквивалентный диаметр трубопровода, м;

w – средняя скорость, м/с;

λ – коэффициент потерь на трение.

Коэффициент потерь на трение зависит от числа Рейнольдса и шероховатости трубы.

Коэффициент сопротивления трения $\zeta = \lambda \frac{l}{d_э}$, тогда величина потерь на трение будет равна:

$$h_{mp} = \zeta \frac{w^2}{2g} \quad (2.42)$$

Потери напора на преодоление местных сопротивлений возникают при движении жидкости через сужения и расширения в трубопроводах, через краны, задвижки и другие местные сопротивления. Местные сопротивления – это такие вставки трубопровода, которые изменяют поток по направлению, по величине, по величине и направлению одновременно.

Потери напора на преодоление местных сопротивлений h_{mc} , также как и $h_{тр}$, выражаются через скоростной напор $\frac{w^2}{2g}$:

$$h_{mc} = \xi_{mc} \frac{w^2}{2g} \quad (2.43)$$

где ξ_{mc} – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент местного сопротивления зависит от числа Рейнольдса и вида сопротивления и является справочной величиной.

Общий потерянный напор можно рассчитать как сумму потерь на трение и на преодоление местных сопротивлений:

$$h_n = \left(\lambda \frac{l}{d_3} + \Sigma \xi_{\text{мс}} \right) \frac{w^2}{2g} \quad (2.44)$$

Потеря давления:

$$\Delta P_n = \rho g h_n = \left(\lambda \frac{l}{d_3} + \Sigma \xi_{\text{мс}} \right) \frac{\rho w^2}{2} \quad (2.45)$$

ГЛАВА 3 ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

3.1 Классификация насосов. Типовая схема и основные характеристики насосной установки

В химической промышленности важное значение имеет транспортирование жидких и газообразных продуктов по трубопроводам как внутри предприятия между отдельными аппаратами и установками, так и вне его.

Движение жидкостей по трубопроводам и через аппараты связано с затратами энергии. В некоторых случаях, например при движении с более высокого уровня на более низкий, жидкость перемещается самотеком, т.е. без затрат внешней энергии, вследствие преобразования части собственной потенциальной энергии в кинетическую. При перемещении жидкостей по горизонтальным трубопроводам и с низшего уровня на высший применяют насосы.

Насосы – гидравлические машины, которые с помощью рабочих органов преобразуют механическую энергию двигателя в энергию перемещаемой жидкости, повышая ее давление. Разность давлений жидкости в насосе и в трубопроводе обуславливает ее перемещение. Такие насосы получили название механические.

К насосам относятся также устройства без движущихся механических частей, обеспечивающие разность напоров жидкости или ее подъем на некоторую высоту другими способами. Назовем их немеханическими насосами.

Итак, как уже было сказано, насосы подразделяются на две большие группы: механические и немеханические.

Применяемые в химической промышленности типы механических насосов чрезвычайно многообразны, их классифицируют по производительности и равномерности подачи, по устройству, характеру и скорости перемещения рабочих органов, а также по иным признакам.

Не останавливаясь на других классификациях, будем механические насосы группировать по принципу действия на объемные (насосы вытеснения), лопастные (насосы обтекания) и вихревые (насосы увлечения – за счет сил трения). Место каждой группы в общей классификации насосов видно из таблицы 3.1.

Таблица 3.1 – Классификация насосов

Вид	Разновидности	Отличительные признаки
Механические	1. Объемные: – поршневые	Движущийся рабочий орган – поршень или плунжер
	– ротационные: - пластинчатые - шестеренчатые - винтовые	рабочий орган – ротор с выдвигными пластинами рабочий орган – шестерни рабочий орган – винты
	– шланговые	рабочий орган – перемещающиеся прижимы
Механические	2. Лопастные: – центробежные	Рабочее колесо при вращении обеспечивает выброс жидкости на периферию
	–пропеллерные (осевые)	лопасти на вращающемся валу обеспечивают перемещение жидкости в осевом направлении
	3. Вихревые	Множественный выброс жидкости на периферию
Немеханические	1. Газлифт	Создание газожидкостной смеси с плотностью меньшей, чем у жидкости
	2. Струйные	Большая кинетическая энергия струи
	3. Монтежю	Неподвижный газ под давлением

Принцип действия объемных насосов заключается в отсечении рабочими органами насоса некоторого объема (порции) жидкости,

поступающего по всасывающей линии, и последующем его выталкивании в нагнетательную линию с изменением при этом давления.

В объемных насосах рабочие органы образуют замкнутые объемы, в которые из всасывающего трубопровода поступают порции жидкости за счет разрежения, создаваемого при движении этих рабочих органов. Затем эти порции жидкости под воздействием тех же рабочих органов выталкиваются в нагнетательный трубопровод. Количество подаваемой объемным насосом жидкости определяется геометрическими размерами его рабочих органов и числом актов всасывания и выталкивания в единицу времени.

В зависимости от вида совершаемого рабочими органами движения (возвратно-поступательного или вращательного) объемные насосы подразделяются на поршневые, ротационные и шланговые.

В поршневых насосах возвратно-поступательное движение совершает поршень или плунжер. Принцип действия, особенности работы и расчет таких насосов рассмотрим следующих лекциях.

К ротационным относят насосы, рабочие органы которых совершают вращательное движение: пластинчатые, шестеренные, винтовые.

Принцип действия пластинчатого насоса заключается в следующем: при вращении ротора, расположенного эксцентрично по отношению к цилиндрическому корпусу насоса, под действием центробежной силы пластины частично выдвигаются из пазов в роторе и прижимаются к корпусу, образуя замкнутые объемы. За счет увеличения объема между двумя соседними пластинами в этом пространстве создается разрежение, и жидкость из всасывающего трубопровода заполняет замкнутый объем между пластинами, корпусом и ротором. Затем эта порция жидкости перемещается вместе с пластинами, рабочий объем уменьшается и жидкость выталкивается в нагнетательный трубопровод.

В шестеренчатом насосе установлены две шестерни, одна из которых – ведущая, а другая – ведомая. Между корпусом и соседними зубьями шестерен образуются замкнутые объемы. При вращении шестерен,

вследствие создаваемого разрежения (за счет выхода зубьев из зацепления) жидкость из всасывающего патрубка поступает в корпус. Далее жидкость заполняет пространство между соседними зубьями и корпусом, перемещается вдоль стенки корпуса по направлению вращения шестерен и вытесняется в нагнетательный трубопровод. Следует заметить, что насос является реверсивным, т.е. при перемене направления вращения шестерен области всасывания и нагнетания меняются местами.

Винтовой насос по принципу действия аналогичен шестеренчатому. Он состоит из двух винтов, вращающихся при помощи шестерен в противоположных направлениях. Винты помещены в плотно охватывающий их корпус с внутренней гладкой цилиндрической поверхностью. Чтобы исключить осевые нагрузки, жидкость подают с обоих торцов, а отводят – в середине насоса. Жидкость поступает в нарезку винтов с торцов корпуса, заполняет объемы между витками винтов и корпусом. При вращении винтов жидкость перемещается к середине корпуса и вытесняется в нагнетательный трубопровод.

В лопастных насосах преобразование энергии двигателя происходит в центре обтекания лопастей колеса при их силовом воздействии на поток. Они подразделяются на центробежные (радиальные), пропеллерные (осевые) и диагональные.

В центробежных насосах при вращении рабочего колеса возникает центробежная сила; она действует на жидкость, находящуюся между лопатками колеса, и жидкость движется от центральной его части к периферии – в целом в радиальных направлениях.

В пропеллерных насосах движение жидкости происходит преимущественно в аксиальном (осевом) направлении за счет подталкивания жидкости лопастями.

В диагональных насосах осевые и радиальные составляющие абсолютной скорости жидкости – величины одного порядка.

У вихревых насосов преобразование энергии двигателя в перемещение жидкости происходит в процессе интенсивного образования вихрей и их последующего разрушения при взаимодействии рабочего органа с медленно движущимися частицами жидкости.

Среди немеханических насосов отметим газлифт, струйные и монтежю.

Газлифт (эрлифт) обеспечивает создание напора (и подъем жидкости) за счет введения в жидкость практически неподвижного газа.

В струйных насосах перепад давления (напор) создается за счет подачи струи газа, жидкости или пара с большой кинетической энергией. При использовании энергии струи газа (жидкости или пара) такой насос называют инжектором (при давлениях больше атмосферного) или эжектором (при давлениях ниже атмосферного).

Типовая схема насосной установки с механическим рабочим органом показана на рисунке 3.1.

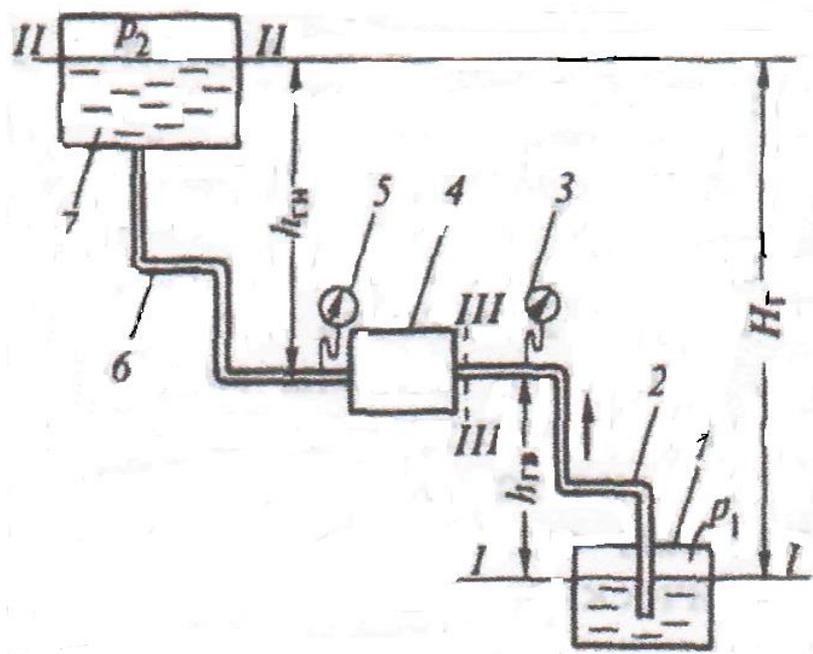


Рисунок 3.1 Типовая схема насосной установки:

1 – расходный резервуар, 2 – всасывающий трубопровод, 3, 5 – манометры (вакуумметры), 4 – насос, 6 – нагнетательный трубопровод, 7 – приемный резервуар.

Из расходного резервуара 1, где давление над свободной поверхностью составляет p_1 , жидкость под действием разности напоров в сечениях I и III по трубопроводу 2, называемому всасывающим, поступает в насос 4. Здесь ее давление повышается до уровня, достаточного для того, чтобы жидкость поднялась по нагнетательному трубопроводу 6, преодолевая его гидравлическое сопротивление и противодействие в приемном резервуаре, где давление над свободной поверхностью составляет p_2 . Для измерения давлений до и после насоса устанавливают манометры 3 и 5 (при абсолютных давлениях больше атмосферного). Нередко давление во всасывающем трубопроводе меньше атмосферного, тогда 3 – это вакуумметр.

Разность уровней установки насоса и жидкости в расходном резервуаре 1 называется геометрической высотой всасывания $h_{гв}$, а расстояние (по высоте) между насосом и уровнем жидкости в приемном резервуаре 7 – геометрической высотой нагнетания $h_{гн}$. Соответственно $H_{г} = h_{гв} + h_{гн}$ – полная геометрическая высота подъема жидкости.

3.2 Основные параметры насосов

Основными параметрами насоса любого типа являются его производительность, создаваемый насосом напор и мощность двигателя, обеспечивающего его работу. Рассмотрим несколько подробнее эти характеристики.

Производительность (подача), Q ($\text{м}^3/\text{ч}$) определяется объемом жидкости, подаваемой насосом в нагнетательный трубопровод в единицу времени.

Напор H (м) характеризует удельную энергию, которая сообщается насосом единице веса перекачиваемой жидкости. Этот параметр показывает насколько возрастает удельная энергия жидкости при прохождении ее через насос, и определяется с помощью уравнения Бернулли. Напор можно представить как высоту, на которую может быть поднят 1 кг перекачиваемой жидкости за счет энергии, сообщаемой насосом. Поэтому напор не зависит от удельного веса γ ($\text{кгс}/\text{м}^3$) или плотности ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$) перекачиваемой жидкости.

Полезная мощность $N_{\text{п}}$, затрачиваемая насосом на сообщение жидкости энергии, равна произведению удельной энергии H на весовой расход γQ жидкости:

$$N_{\text{п}} = \gamma QH = \rho gQH \quad (3.1)$$

Мощность на валу $N_{\text{в}}$ больше полезной мощности в связи с потерями энергии в насосе, которые учитываются коэффициентом полезного действия (к.п.д.) насоса $\eta_{\text{н}}$:

$$N_{\text{в}} = \frac{N_{\text{п}}}{\eta_{\text{н}}} = \frac{\rho gQH}{\eta_{\text{н}}} \quad (3.2)$$

Коэффициент полезного действия $\eta_{\text{н}}$ характеризует совершенство конструкции и экономичность эксплуатации насоса, отражает относительные потери мощности в самом насосе и выражается произведением

$$\eta_{\text{н}} = \eta_{\text{V}} \eta_{\text{Г}} \eta_{\text{мех}} \quad (3.3)$$

В выражение (3.3) входят следующие величины: $\eta_{\text{V}} = Q/Q_{\text{T}}$ – коэффициент подачи, или объемный КПД, представляющий собой отношение действительной производительности Q к теоретической Q_{T} (учитывает потери производительности при утечках жидкости через зазоры и сальники насоса, а также вследствие одновременного перекрытия клапанов и выделения воздуха из перекачиваемой жидкости при давлении ниже атмосферного – во время всасывания); $\eta_{\text{Г}}$ – гидравлический КПД – отношение действительного напора насоса к теоретическому (учитывает потери напора при движении жидкости через насос); $\eta_{\text{мех}}$ – механический КПД, характеризующий потери мощности на механическое трение в насосе (в подшипниках, сальниках и др.).

Значение $\eta_{\text{н}}$ зависит от конструкции и степени износа насоса и в среднем составляет: для центробежных насосов 0,6-0,7; для поршневых насосов 0,8-0,9; для наиболее совершенных центробежных насосов большой производительности 0,93-0,95.

Мощность, потребляемая двигателем, или номинальная мощность двигателя $N_{\text{дв}}$, больше мощности на валу вследствие механических потерь в

передаче от электродвигателя к насосу и в самом электродвигателе. Эти потери учитываются введением в уравнение (3.3) к.п.д. передачи $\eta_{\text{пер}}$ и к.п.д. двигателя $\eta_{\text{дв}}$:

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{в}}}{\eta_{\text{пер}}\eta_{\text{дв}}} = \frac{N_{\text{п}}}{\eta_{\text{н}}\eta_{\text{пер}}\eta_{\text{дв}}} \quad (3.4)$$

Произведение $\eta_{\text{н}}\eta_{\text{пер}}\eta_{\text{дв}}$ представляет собой полный КПД насосной установки η , который определяется как отношение полезной мощности $N_{\text{п}}$ к номинальной мощности двигателя $N_{\text{дв}}$ и характеризует полные потери мощности насосной установкой:

$$\eta = \frac{N_{\text{п}}}{N_{\text{дв}}} = \eta_{\text{н}}\eta_{\text{пер}}\eta_{\text{дв}} \quad (3.5)$$

Из уравнений (3.4) и (3.5) следует, что полный КПД насосной установки может быть выражен произведением пяти величин:

$$\eta = \eta_{\text{в}}\eta_{\text{г}}\eta_{\text{мех}}\eta_{\text{пер}}\eta_{\text{дв}} \quad (3.6)$$

Установочная мощность двигателя $N_{\text{уст}}$ рассчитывается по величине $N_{\text{дв}}$ с учетом возможных перегрузок в момент пуска насоса, возникающих в связи с необходимостью преодоления инерции покоящейся массы жидкости:

$$N_{\text{уст}} = \beta N_{\text{дв}} \quad (3.7)$$

Здесь β – коэффициент запаса мощности; его значение определяют в зависимости от номинальной мощности двигателя $N_{\text{дв}}$:

$N_{\text{дв}}$, кВт	Менее 1	1-5	5-50	Более 50
β	2-1,5	1,5-1,2	1,2-1,15	1,1

Для определения напора насоса применим уравнение Бернулли. Рассмотрим схему насосной установки, представленной на рис. 3.1. Примем за плоскость отсчета поверхность I-I уровня жидкости в расходном резервуаре и запишем полные напоры H_1 и H_2 соответственно для сечений I-I, совпадающего с плоскостью отсчета

$$H_1 = 0 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} \quad (3.8)$$

и II-II, соответствующего поверхности уровня в приемном резервуаре

$$H_2 = H_{\Gamma} + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} \quad (3.9)$$

При течении идеальной жидкости в отсутствие насоса $H_1 = H_2$. В случае течения реальной жидкости $H_2 < H_1$, и для сохранения равенства в правой части уравнения Бернулли учитываются гидравлические потери h_{Π} в трубопроводах. Но насос – это источник энергии, он создает дополнительный напор H , увеличивающий сумму слагаемых правой части. Чтобы сохранить знак равенства, необходимо в левую часть добавить этот напор:

$$0 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} + H = H_{\Gamma} + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} + H_{\Pi}, \quad (3.10)$$

где $H_{\Pi} = h_{\PiВ} + h_{\PiН}$ – полные гидравлические потери, т.е. сумма потерь во всасывающем ($h_{\PiВ}$) и нагнетательном ($h_{\PiН}$) трубопроводах.

В равенстве (3.10) напор H – это воспринятый жидкостью напор H_{Γ} за вычетом гидравлических потерь в самом насосе $h_{\Pi}^{\text{нас}}$, т.е. $H = H_{\Gamma} - h_{\Pi}^{\text{нас}}$. Из (3.10) получаем

$$H = H_{\Gamma} + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} - \frac{\omega_1^2}{2g} + H_{\Pi} \quad (3.11)$$

Если пренебречь скоростными напорами жидкости в резервуарах (в виду их крайней малости в подавляющем большинстве практических случаев), а тем более – их разностью, по сравнению с другими слагаемыми уравнения (3.11), то

$$H = H_{\Gamma} + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + H_{\Pi} \quad (3.12)$$

Таким образом, напор, развиваемый насосом и передаваемый жидкости, затрачивается на ее подъем на высоту H_{Γ} , на преодоление разности давлений $p_2 - p_1$ и гидравлическое сопротивление в трубопроводах H_{Π} .

На действующих насосных установках напор обычно определяют по показаниям манометра ($p_{\text{м}}$) и вакуумметра ($p_{\text{в}}$), установленных на нагнетательной и всасывающей линиях непосредственно около насоса. При этом манометр всегда показывает избыточное (по сравнению с атмосферным) давление, а вакуумметр – разность между атмосферным давлением и абсолютным давлением в аппарате. В рассматриваемом случае (рис. 3.1)

манометр показывает разность между абсолютным давлением жидкости после насоса (p_n) и атмосферным ($p_{атм}$), т.е. $p_m = p_n - p_{атм}$; вакуумметр показывает разность между атмосферным давлением ($p_{атм}$) и абсолютным давлением перед насосом ($p_{вс}$), т.е. $p_v = p_{ат} - p_{вс}$.

Полный напор жидкости после насоса (в месте подсоединения манометра) равен:

$$H_2^H = h_{ГВ} + \frac{p_n}{\rho g} + \frac{\omega_n^2}{2g}, \quad (3.13)$$

а перед насосом (в месте подсоединения вакуумметра)

$$H_1^{BC} = h_{ГВ} + \frac{p_{вс}}{\rho g} + \frac{\omega_{вс}^2}{2g}, \quad (3.14)$$

где ω_n и $\omega_{вс}$ – скорости жидкости в нагнетательном и всасывающем трубопроводах соответственно.

Реальный напор H , развиваемый насосом, есть разность напоров $H_2^H - H_1^{BC}$:

$$H = H_2^H - H_1^{BC} = \frac{p_n - p_{вс}}{\rho g} + \frac{\omega_n^2 - \omega_{вс}^2}{2g} \quad (3.15)$$

Вводя показания манометра $p_m = p_n - p_{атм}$ и вакуумметра $p_v = p_{ат} - p_{вс}$, получаем

$$H = \frac{p_m + p_{вс}}{\rho g} + \frac{\omega_n^2 - \omega_{вс}^2}{2g} \quad (3.16)$$

На практике чаще всего диаметры всасывающего и нагнетательного трубопроводов, а следовательно и скорости жидкости в них, одинаковы или отличаются незначительно: $\omega_n \approx \omega_{вс}$ (да и сами значения скоростных напоров невелики).

Тогда

$$H = \frac{p_m + p_{вс}}{\rho g} \quad (3.17)$$

Таким образом, напор на действующей насосной установке равен сумме показаний манометра и вакуумметра. Заметим, что при использовании на всасывающей и нагнетательной линиях одноименных приборов (например, манометров) напор насоса будет равен разности их показаний.

Всасывание жидкости насосом происходит под действием разности давлений в приемной емкости и на входе на насос или под действием разности напоров.

При размещении технологического оборудования и насосов, его обслуживающих, всегда возникает вопрос о геометрической высоте всасывания $h_{ГВ}$. Ведь даже при правильно подобранном насосе, но неправильно установленном (слишком большая $h_{ГВ}$), он не может всасывать жидкость, а значит – подавать ее потребителю.

При изменении геометрической высоты всасывания насоса $h_{ГВ}$ изменяется давление жидкости на входе в него $p_{вс}$ – соответственно уравнению Бернулли.

При установке насоса рядом с расходным резервуаром 1 (см. рис. 3.1) ($h_{ПВ} = 0$) и на одном с ним уровне ($h_{ГВ} = 0$) давление жидкости на входе в насос $p_{вс}$ практически равно давлению p_1 . С увеличением $h_{ГВ}$ давление на входе в насос $p_{вс}$ уменьшается и при некоторой геометрической высоте (назовем ее предельной геометрической высотой всасывания $h_{ГВ}^{пред}$) давление $p_{вс}$ понизится до упругости насыщенных паров p_t перекачиваемой жидкости при ее рабочей температуре t .

Предельная высота всасывания уменьшается с понижением давления p_1 и увеличением p_t , т.е. с увеличением температуры жидкости. К уменьшению $h_{ГВ}^{пред}$ приводят также повышенные скорости во всасывающем трубопроводе и гидравлические потери в нем.

На высоту всасывания насосов оказывает также влияние явление кавитации.

Кавитация возникает при высоких скоростях вращения рабочих колес центробежных насосов и при перекачивании горячих жидкостей в условиях, когда происходит интенсивное парообразование в жидкости, находящейся в насосе. Пузырьки пара попадают вместе с жидкостью в область более высоких давлений, где мгновенно конденсируются. Жидкость стремительно заполняет полости, в которых находился сконденсировавшийся пар, что

сопровождается гидравлическими ударами, шумом и сотрясением насоса. Кавитация приводит к быстрому разрушению насоса за счет гидравлических ударов и усиления коррозии в период парообразования. При кавитации производительность и напор насоса резко снижаются.

Практически высота всасывания насосов при перекачивании воды не превышает следующих значений:

Температура, °С	10	20	30	40	50	60	65
Высота всасывания, м	6	5	4	3	2	1	0

Для того, чтобы предотвратить возникновение кавитации при работе насоса, вычитают некоторую высоту, называемую кавитационным запасом (значения приводятся в каталогах насосов при $p = 1 \text{ кгс/см}^2 \approx 10 \text{ м вод.ст.}$ и $t = 20 \text{ °С}$).

3.3 Центробежные насосы

Принцип действия и типы насосов. В центробежных насосах всасывание и нагнетание жидкости происходит равномерно и непрерывно под действием центробежной силы, возникающей при вращении рабочего колеса с лопатками, заключенного в спиралеобразном корпусе.

Схема центробежного насоса представлена на рисунке 3.2

В одноступенчатом центробежном насосе (рис. 3.2) жидкость из всасывающего трубопровода 1 поступает вдоль оси рабочего колеса 2 в корпус 3 насоса и, попадая на лопатки 4, приобретает вращательное движение. Центробежная сила отбрасывает жидкость в канал переменного сечения между корпусом и рабочим колесом, в котором скорость жидкости уменьшается до значения, равного скорости в нагнетательном трубопроводе 5. При этом, как следует из уравнения Бернулли, происходит преобразование кинетической энергии потока жидкости в статический напор, что обеспечивает повышение давления. На входе в колесо создается пониженное давление, и жидкость из приемной емкости непрерывно поступает в насос.

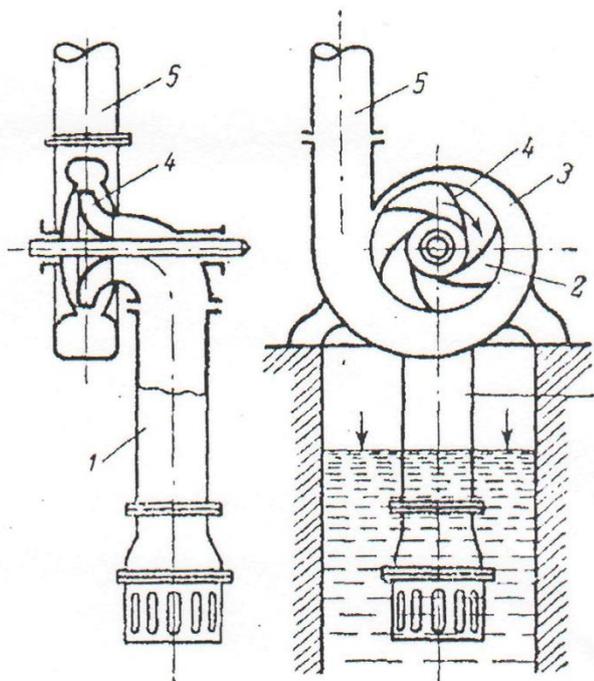


Рисунок 3.2 Схема центробежного насоса:

- 1 – всасывающий трубопровод; 2 – рабочее колесо; 3 – корпус; 4 – лопатки;
5 – нагнетательный трубопровод

Давление, развиваемое центробежным насосом, зависит от скорости вращения рабочего колеса. Вследствие значительных зазоров между колесом и корпусом насоса разрежение, возникающее при вращении колеса, недостаточно для подъема жидкости по всасывающему трубопроводу, если он и корпус насоса не залиты жидкостью. Поэтому перед пуском центробежный насос заливают перекачиваемой жидкостью. Чтобы жидкость не выливалась из насоса и всасывающего трубопровода при заливке насоса или при кратковременных остановках его, на конце всасывающей трубы, погруженном в жидкость, устанавливают обратный клапан, снабженный сеткой.

Пуск центробежного насоса производится обязательно под заливом при закрытой задвижке на нагнетательном трубопроводе – во избежание перегрузки двигателя. Затем при медленном открывании задвижки насос начинает подачу жидкости в нагнетательный трубопровод. Чем длиннее последний, тем медленнее следует открывать задвижку, сохраняя

нормальный рабочий режим, характеризующийся отсутствием ударов и резкого шума в трубопроводе.

Напор одноступенчатых центробежных насосов (с одним рабочим колесом) ограничен и не превышает 50 м. Для создания более высоких напоров применяют многоступенчатые насосы (рис. 3.3), имеющие несколько рабочих колес 1 в общем корпусе 2, расположенных последовательно на одном валу 3.

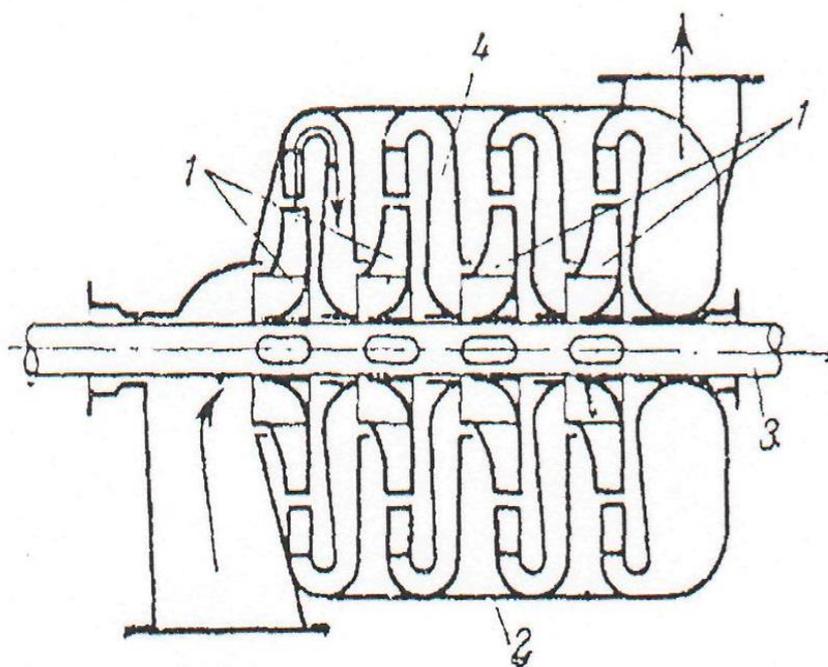


Рисунок 3.3 Схема многоступенчатого насоса:

1 – рабочее колесо; 2 – корпус; 3 – вал; 4 – отводной канал.

Жидкость, выходящая из первого колеса, поступает по специальному отводному каналу 4 в корпусе насоса на второе колесо (где ей сообщается дополнительная энергия), из второго колеса через отводной канал в третье колесо и т.д. Таким образом, можно считать, что напор многоступенчатого насоса равен напору одного колеса, умноженному на число колес. Число рабочих колес в многоступенчатом насосе обычно не превышает пяти.

Центробежные насосы изготавливают из различных конструкционных материалов – металлических (стали, чугуны, специальные сплавы, цветные металлы) и неметаллических (вплоть до керамических и фарфоровых) – в зависимости от химической активности перекачиваемой жидкостью.

Основное уравнение центробежных машин Эйлера. В каналах между лопатками рабочего колеса жидкость, двигаясь вдоль лопаток, одновременно совершает вращательное движение вместе с колесом.

Определим полный напор, развиваемый рабочим колесом при перекачивании идеальной жидкости. Допустим, что колесо неподвижно, а жидкость движется по каналам между лопатками с той же относительной скоростью, что и во вращающемся колесе. Абсолютные скорости движения жидкости на входе в колесо c_1 и на выходе из колеса c_2 являются каждая геометрической суммой относительной и окружной скоростей, поэтому их можно разложить на относительные составляющие ω_1 и ω_2 (направленные вдоль лопаток) и окружные составляющие u_1 и u_2 соответственно (направленные по касательной к окружности вращения). Составив баланс энергии по уравнению Бернулли, с учетом дополнительной энергии, которую жидкость приобретает на выходе, получим уравнение теоретического напора:

$$H_T = \frac{u_2 c_2 \cos \alpha_2 - u_1 c_1 \cos \alpha_1}{g} \quad (3.18)$$

Уравнение (3.18) называется основным уравнением центробежных машин и может быть применено к расчету всех центробежных машин, в том числе турбогазодувок, турбокомпрессоров и вентиляторов. Оно верно в том случае, когда все частицы жидкости движутся в насосе по подобным траекториям. Это возможно лишь при условии, что рабочее колесо имеет бесконечно большое число лопаток и сечение канала для прохода жидкости невелико.

Обычно жидкость, поступающая из всасывающего трубопровода, движется по колесу в радиальном направлении. В этом случае угол между абсолютным значением скорости жидкости на входе в рабочее колесо и окружной скоростью $\alpha = 90^\circ$.

Тогда уравнение (3.18) упрощается:

$$H_T = \frac{u_2 c_2 \cos \alpha_2}{g} \quad (3.19)$$

Действительный напор насоса меньше теоретического, так как часть энергии жидкости расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений внутри насоса и жидкость в нем при конечном числе лопаток не движется по подобным траекториям. Действительный напор составляет

$$H = H_T \eta_r \varepsilon, \quad (3.20)$$

где η_r – гидравлический КПД насоса, равный 0,8-0,95;

ε – коэффициент, учитывающий конечное число лопаток в насосе, равный 0,6-0,8.

Графические зависимости напора H , мощности на валу N_b и к.п.д. насоса η_H от его производительности Q при постоянном числе оборотов n называются характеристиками насоса (рис. 3.4)

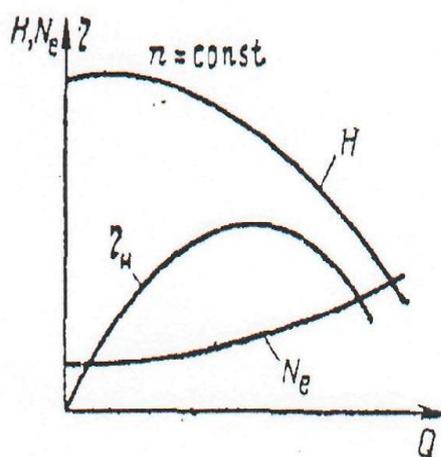


Рисунок 3.4 Характеристика центробежного насоса

Эти зависимости получают при испытаниях центробежных насосов, изменяя степень открытия задвижки на нагнетательной линии; они приводятся в каталогах на насосы.

Из рис. 3.4 следует, что с увеличением производительности при $n = \text{const}$ напор насоса уменьшается, потребляемая мощность возрастает, а КПД проходит через максимум. Небольшой начальный участок кривой $H - Q$, где напор слегка возрастает с увеличением производительности, соответствует неустойчивой работе насоса.

Насос потребляет наименьшую мощность при закрытой напорной задвижке (при $Q = 0$). Наиболее благоприятный режим эксплуатации центробежного насоса при данном числе оборотов соответствует максимуму на кривой $\eta_n - Q$.

Снимая характеристики насоса при различных числах оборотов насоса ($n_1, n_2, n_3 \dots$), получают ряд зависимостей $H - Q$. На каждой кривой $H - Q$ выделяют точки, отвечающие некоторому постоянному значению к.п.д., которые соединяют между собой плавной линией. Эти линии ограничивают области, внутри которых КПД насоса имеет значение не меньшее, чем указанное на границе области. Полученные таким путем графические зависимости между напором, КПД и производительностью насоса при различных числах оборотов колеса называют универсальными характеристиками. Пользуясь универсальной характеристикой, можно установить пределы работы насоса (соответствующие максимальному значению КПД) и выбрать наиболее благоприятный режим его работы.

При выборе насоса необходимо учитывать характеристику сети, т.е. трубопровода и аппаратов, через которые перекачивается жидкость.

Характеристика сети выражается зависимостью между расходом жидкости Q и напором H , необходимыми для перемещения жидкости по данной сети. Напор может быть определен как сумма геометрической высоты подачи H_r и потерь напора $h_{п.}$. потери напора пропорциональны квадрату расхода жидкости:

$$h_{п.} = \kappa Q^2, \quad (3.21)$$

где κ – коэффициент пропорциональности

Тогда характеристика сети выразится зависимостью, представляющей собой уравнение параболы:

$$H = H_r + \kappa Q^2 \quad (3.22)$$

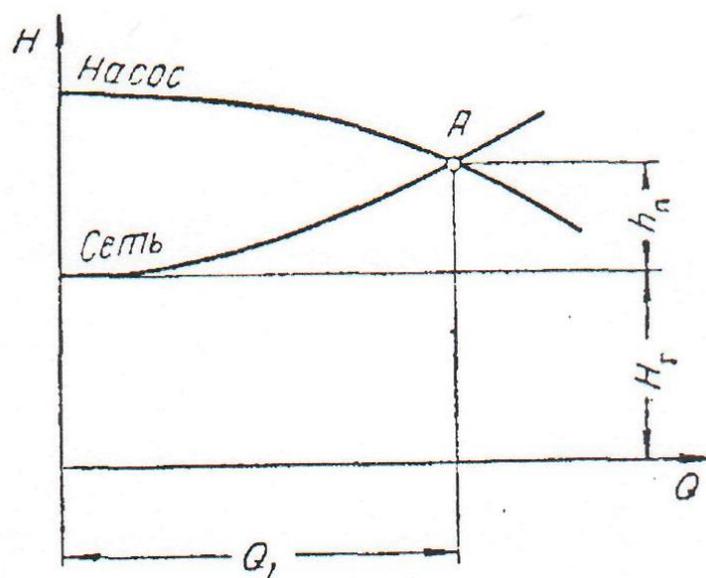


Рисунок 3.5 Совмещение характеристик насоса и сети.

Совмещение характеристик насоса и сети показано на рис. 3.5. Точка А пересечения этих характеристик называется рабочей точкой; она отвечает наибольшей производительности насоса Q_1 при его работе на данную сеть. Если требуется более высокая производительность, то необходимо либо увеличить число оборотов электродвигателя, либо заменить данный насос на насос большей производительности.

Совместная работа нескольких насосов на общий нагнетательный трубопровод применяется в тех случаях, когда требуемые значения Q и H (либо обе эти величины) не могут быть обеспечены одним насосом. Естественной представляется параллельная установка насосов при необходимости увеличения производительности и последовательная работа – для увеличения напора.

3.4 Поршневые насосы

Принцип действия и классификация насосов. В поршневом насосе всасывание и нагнетание жидкости происходит при возвратно-поступательном движении поршня в цилиндре насоса. При движении поршня вправо в замкнутом пространстве между крышкой цилиндра и поршнем создается разрежение. Под действием разности давлений в приемной емкости и цилиндре жидкость поднимается по всасывающему трубопроводу и

поступает в цилиндр через открывающийся при этом всасывающий клапан. нагнетательный клапан при ходе поршня вправо закрыт, т.к. на него действует сила давления жидкости, находящейся в нагнетательном трубопроводе. При ходе поршня влево в цилиндре возникает давление, под действием которого закрывается всасывающий клапан и открывается нагнетательный, через который жидкость поступает в нагнетательный трубопровод и далее в напорную (приемную) емкость. Таким образом, всасывание и нагнетание жидкости происходит неравномерно: всасывание – при движении поршня слева направо, нагнетание – при обратном направлении движения поршня. За два хода поршня жидкость один раз всасывается и один – нагнетается. Поршень насоса приводится в движение кривошипно-шатунным механизмом (состоит из штока, ползуна, шатуна и кривошипа), преобразующим вращательное движение вала в возвратно-поступательное движение поршня.

По числу всасываний или нагнетаний, осуществляемых за один оборот кривошипа или два хода поршня, поршневые насосы делятся на насосы простого и двойного действия. В зависимости от конструкции поршня различают собственно поршневые и плунжерные (скальчатые).

В плунжерных насосах поршень выполнен в виде продолговатого цилиндра, называемого плунжером (скалкой). Их применяют для перекачивания загрязненных и вязких жидкостей, а также для создания более высоких давлений.

В химической промышленности плунжерные насосы более распространены, чем поршневые.

Более равномерной подачей обладают поршневые и плунжерные насосы двойного действия. Горизонтальный плунжерный насос двойного действия можно рассматривать как совокупность двух насосов простого действия. Он имеет четыре клапана – два всасывающих и два нагнетательных.

По роду привода поршневые насосы делятся на приводные (от электродвигателя) и прямодействующие (от паровой машины). Прямодействующие паровые насосы используют главным образом на установках, где по условиям безопасности применение насосов с электрическим приводом недопустимо (огне- и взрывоопасные производства), а также при наличии дешевого отбросного пара (подача пара в паровые котлы).

По числу оборотов кривошипа различают тихоходные ($n = 40-60$ об/мин), нормальные (среднескоростные) ($n = 60-120$ об/мин) и быстроходные ($n = 120-300$ об/мин).

Производительность. Для насоса простого действия за один оборот кривошипа происходит один акт всасывания и один акт нагнетания порции жидкости. При этом теоретическая производительность (Q_T , м³/сек) равна произведению площади сечения F поршня, длины хода S поршня и числа оборотов n кривошипно-шатунного механизма (или числа двойных ходов поршня).

$$Q_T = F \cdot S \cdot n \quad (3.23)$$

Действительная производительность поршневого насоса меньше теоретической вследствие утечки жидкости через неплотности в сальниках, клапанах и местах стыковки трубопроводов, а также выделения из жидкости при давлении ниже атмосферного растворенного в ней воздуха. Все эти потери учитываются коэффициентом подачи, или объемным КПД (η_v)

$$Q = Q_T \cdot \eta_v \quad (3.24)$$

Коэффициент подачи зависит от производительности насоса и его физического состояния. Опыт эксплуатации насосов позволил установить следующие примерные значения η_v насосов при их нормальном рабочем состоянии:

малая производительность	$\eta_v=0,85-0,90$
средняя производительность	$\eta_v=0,90-0,95$
большая производительность	$\eta_v=0,95-0,99$

Характеристика насосов. Зависимость между напором H и производительностью Q поршневого насоса изображается вертикальной прямой и показывает, что производительность есть величина постоянная, не зависящая от напора. Практически, вследствие увеличения утечек жидкости, реальная характеристика (изображена на рис. 3.6 пунктирной линией) не совпадает с теоретической.

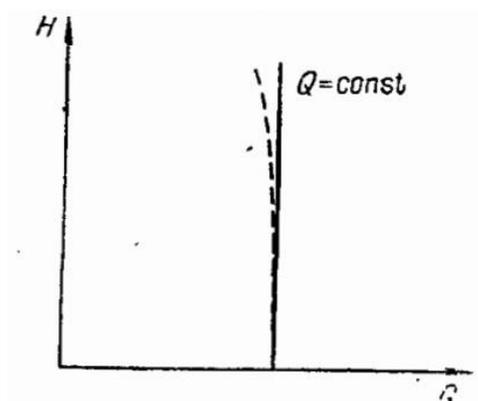


Рисунок 3.6 Характеристика поршневого насоса

Для уменьшения неравномерности подачи и смягчения гидравлических ударов поршневые насосы снабжают воздушными колпаками, которые устанавливают на входе жидкости в насос. Воздушный колпак представляет собой буферный промежуточный сосуд, около 50 % емкости которого занимает воздух.

3.5 Сжатие газов

На предприятиях химической промышленности подвергаются переработке значительные количества газов и их смесей. Проведение многих химических процессов в газовой фазе при давлении, отличном от атмосферного, часто приводит к увеличению их скорости и уменьшению необходимого объема реакционной аппаратуры. Сжатие газов используют для перемещения их по трубопроводам и аппаратам, создания вакуума. Сжатые газы применяют для перемешивания, распыления жидкостей и т.п. Интервалы используемых давлений от 10^{-8} до 10^3 атм.

Машины, предназначенные для перемещения и сжатия газов, называют компрессорными машинами.

Отношение конечного давления p_2 , создаваемого компрессорной машиной, к начальному давлению p_1 , при котором происходит всасывание газа, называется степенью сжатия.

В зависимости от степени сжатия различают следующие типы компрессорных машин:

1) вентиляторы ($\frac{p_2}{p_1} < 1,1$) – для перемещения больших количеств газов (создают избыточное давление до 0,015 МПа);

2) газодувки ($1,1 < \frac{p_2}{p_1} < 3,0$) – для перемещения газов при относительно высоком сопротивлении газопроводящей сети (до 0,2 МПа);

3) компрессоры ($\frac{p_2}{p_1} > 3,0$) – для создания высоких давлений (свыше 0,2 МПа);

4) вакуум-насосы – для отсасывания газов при давлении ниже атмосферного.

По принципу действия компрессорные машины делятся на компрессоры объемного сжатия (поршневые, ротационные) и компрессоры динамического сжатия (центробежные, осевые).

В поршневых машинах сжатие газа происходит в результате уменьшения объёма, в котором заключён газ, при возвратно-поступательном движении поршня; в ротационных – сжатие газа обусловлено уменьшением объёма газа при вращении эксцентрично расположенного ротора; в центробежных – за счёт воздействия лопаток рабочего колеса на поток газа, происходит передача кинетической энергии газу, и эта энергия преобразуется в давление в неподвижных элементах машины; в осевых – газ сжимается при его движении вдоль оси рабочего колеса и направляющего аппарата. Вакуум-насосы, аналогичны компрессорным машинам, но всасывание у них происходит при давлениях, значительно меньших, чем атмосферное давление, а нагнетание – при давлениях, на много превышающих атмосферное. Применяют также струйные компрессоры и вакуум-насосы; в них используют струи жидкости или пара. Для получения вакуума также

используют поршневые и ротационные вакуум-насосы, аналогичные по действию компрессорным машинам. В струйных компрессорах и вакуум-насосах отсасывание и сжатие газов осуществляется за счет кинетической энергии струи вспомогательной жидкости или пара.

Вентиляторы и газодувки большой производительности, создающие разрежение, называются *эксгаустерами*. Для получения более глубокого вакуума применяют поршневые и ротационные вакуум-насосы, не отличающиеся по принципу действия от компрессоров.

3.6 Основные типы компрессоров, газодувок и вентиляторов

1) Поршневые компрессоры делятся на компрессоры простого (одинарного) и двойного действия. Простой компрессор за один двойной ход поршня производит одно всасывание и одно нагнетание, компрессор двойного действия – два всасывания и два нагнетания.

Степенью сжатия называется часть компрессорной машины, где газ сжимается до конечного или промежуточного (перед поступлением на следующую ступень) давления.

По числу ступеней поршневые компрессоры делятся на одноступенчатые и многоступенчатые, которые могут быть горизонтальные и вертикальные.

В одноступенчатом компрессоре газ сжимается до конечного давления в одном или нескольких цилиндрах, работающих параллельно. В последнем случае одноступенчатые компрессоры называются многоцилиндровыми.

Одноступенчатый горизонтальный компрессор простого действия имеет цилиндр, в котором передвигается поршень, снабженный уплотнительными поршневыми кольцами. Цилиндр закрыт с одной стороны крышкой, в которой расположены всасывающий клапан и нагнетательный клапан. Поршень соединен непосредственно с шатуном и кривошипом, на валу которого установлен маховик. При ходе поршня слева направо в пространстве между крышкой цилиндра и поршнем создается разрежение. Под действием разности давлений во всасывающей линии и цилиндре

открывается всасывающий клапан и газ поступает в цилиндр. При ходе поршня справа налево всасывающий клапан закрывается, а находящийся в цилиндре газ сжимается поршнем до некоторого давления, при котором открывается нагнетательный клапан и газ выталкивается в нагнетательный трубопровод. Затем цикл повторяется снова.

В одноступенчатом компрессоре двойного действия газ в цилиндре попеременно сжимается по обе стороны поршня. За один двойной ход поршня происходит два раза всасывание и два раза нагнетание. Цилиндр снабжен двумя всасывающими клапанами и двумя нагнетательными клапанами. Компрессоры двойного действия имеют более сложное устройство, но обладают почти вдвое большей производительностью, чем компрессоры простого действия тех же габаритных размеров и того же веса.

Увеличение производительности достигается также в многоцилиндровых компрессорах простого или двойного действия.

Вертикальные одноступенчатые компрессоры имеют ряд преимуществ перед горизонтальными: они более быстроходны (для горизонтальных компрессоров $n = 100-240$ об/мин, для вертикальных $n = 300-500$ об/мин и более) и, следовательно, более производительны, занимают меньшую производственную площадь; поршни и цилиндры вертикальных машин изнашиваются значительно меньше.

Для уменьшения неравномерности подачи и смягчения толчков газ после сжатия в поршневых компрессорах предварительно направляют в сборник (ресивер), где он одновременно очищается от масла и влаги.

Многоступенчатое сжатие применяют для получения высоких давлений газа. Процесс многоступенчатого сжатия осуществляют в многоступенчатых компрессорах, в которых газ проходит последовательно ряд ступеней, постепенно сжимаясь до конечного давления. Между ступенями газ подвергают охлаждению в промежуточных холодильниках. Объемы цилиндров постепенно уменьшаются от первой к последней ступени.

Различают многоступенчатые компрессоры со ступенями сжатия в отдельно установленных цилиндрах и со ступенями сжатия в одном цилиндре и дифференциальным поршнем.

Многоступенчатые компрессоры со ступенями сжатия в отдельно установленных цилиндрах могут быть однорядного и двухрядного исполнения с расположением цилиндров по одну сторону вала. Такие компрессоры имеют большой вес и крупные габаритные размеры, так как значительные неуравновешенные силы инерции, возникающие при работе этих машин, не позволяют изготавливать их с большим числом оборотов коленчатого вала. Поэтому в последнее время получили широкое применение оппозитные компрессоры с взаимно противоположным направлением движения поршней. Цилиндры этих компрессоров располагаются по обе стороны коленчатого вала.

Оппозитные компрессоры хорошо динамически уравновешены, благодаря чему скорость вращения коленчатого вала может быть увеличена в 2-2,5 раза и тем самым повышена производительность машины. Вес таких компрессоров, а также электродвигателей к ним на 50-60% меньше, чем компрессоров с расположением цилиндров по одну сторону вала, при значительном снижении габаритных размеров. Для установки оппозитных компрессоров требуется меньшая площадь и небольшие фундаменты.

2) Ротационные компрессоры и газодувки. Пластинчатые компрессоры. В корпусе 1 компрессора (рис. 3.7) вращается ротор 2, эксцентрично расположенный относительно внутренней поверхности корпуса. Пластины 3 свободно перемещаются в пазах ротора и при его вращении выбрасываются центробежной силой из пазов. Эта же сила плотно прижимает пластины к внутренней поверхности корпуса. Таким образом, серповидное рабочее пространство между ротором и корпусом разделяется с помощью пластин на ряд неравных по объему камер.

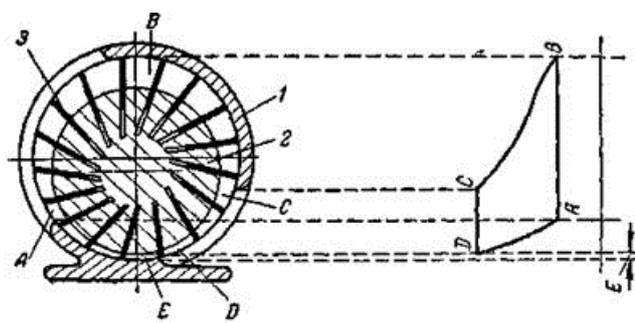


Рисунок 3.7 Схема ротационного пластинчатого компрессора:

1 – корпус; 2 – ротор; 3 – скользящие пластины

Газ поступает из всасывающего патрубка и заполняет полости камер. В камере, находящейся в положении В, всасывание прекращается (так как она разобщена со всасывающим пространством) и начинается сжатие газа. При вращении камеры вправо объем ее уменьшается и газ, находящийся в ней, сжимается. Сжатие заканчивается, когда камера достигает положения С. В этом положении полость камеры сообщается с нагнетательным трубопроводом, после чего происходит нагнетание газа. В положении D газ полностью вытесняется из рабочей камеры. Зазор между ротором и цилиндром в нижней части образует мертвое пространство Е. От положения D до А происходит расширение газа в мертвом пространстве. В точке А начинается всасывание газа. Затем цикл повторяется.

Ротационные пластинчатые компрессоры изготавливают одно- и двухступенчатыми. У одноступенчатых компрессоров давление нагнетания не превышает 2,5-5 ат, у двухступенчатых – 8-15 ат.

Водокольцевые компрессоры. В корпусе компрессора эксцентрично расположен ротор с лопатками плоской формы. Перед пуском компрессор заполняется примерно наполовину водой, которая при вращении ротора отбрасывается к периферии и образует водяное кольцо, соосное с корпусом компрессора и эксцентричное по отношению к ротору. Количество жидкости, заливаемое в компрессор, должно быть таким, чтобы концы всех лопаток были погружены в водяное кольцо. Между лопатками ротора и водяным кольцом образуются ячейки, объем которых за время первой половины

оборота ротора увеличивается, а за время второй половины – уменьшается. Газ засасывается в ячейки, объем которых возрастает, через отверстие в торцевой крышке компрессора. При дальнейшем вращении ротора газ сжимается вследствие уменьшения объема ячеек и в конце оборота выталкивается в нагнетательное отверстие в крышке компрессора. Установка снабжена бачком и переливной трубой для заполнения компрессора водой.

В компрессорах такого типа жидкостное кольцо играет по существу роль поршня; с помощью кольца изменяется объем рабочих камер. Поэтому эти компрессоры называются также компрессорами с жидкостным поршнем.

Ротационные водокольцевые компрессоры создают очень небольшое избыточное давление и поэтому используются в основном в качестве газодувок или вакуум-насосов.

Газодувки. В корпусе газодувки на двух параллельных валах вращаются два барабана, или поршня. Один из них приводится во вращение от электродвигателя, второй связан с первым зубчатой передачей, передаточное число которой равно единице. При вращении поршни плотно прилегают один к другому и к стенкам корпуса, образуя две разобщенные камеры: в одной из них происходит всасывание, в другой – нагнетание. Газ поступает в газодувку через всасывающий патрубок и перемещается поршнями по периферии газодувки (так же как в шестеренчатом насосе). При поступлении в нагнетательный патрубок газ сжимается и выталкивается в напорный трубопровод.

3) Центробежные машины. Принцип действия и теория центробежных машин для сжатия и перемещения газов аналогичны принципу действия и теории центробежных насосов.

Центробежные компрессоры и газодувки (иначе – турбокомпрессоры ТК) по развиваемому напору условно подразделяются на собственно ТК (напор свыше 0,3 МПа), турбогазодувки (напор от 0,01 до 0,3 МПа) и вентиляторы (напор не превышает 0,01 МПа).

Вентиляторы. В спиралеобразном корпусе вентилятора вращается рабочее колесо (барабан) с большим числом лопаток. Отношение ширины лопатки к ее длине зависит от развиваемого давления и является наименьшим для вентиляторов высокого давления. Газ поступает по оси вентилятора через патрубок и удаляется из корпуса через нагнетательный патрубок. Лопатки вентиляторов обычно выполняют загнутыми вперед или загнутыми назад по направлению вращения колеса. При лопатках, загнутых вперед, заданный напор получают при меньшей окружной скорости колеса, соответственно – при меньшем его диаметре, чем при лопатках загнутых назад; однако гидравлическое сопротивление последних ниже.

Турбогазодувки. В корпусе вращается рабочее колесо с лопатками, подобными лопаткам центробежного насоса. Колесо обычно помещают внутри направляющего аппарата, в котором происходит преобразование кинетической энергии газа в потенциальную энергию давления. Направляющий аппарат представляет собой два кольцевых диска, соединенных между собой лопатками с наклоном, противоположным наклону лопаток рабочего колеса. Газ поступает в турбогазодувку через патрубок и выходит из нагнетательного патрубка.

Одноступенчатые турбогазодувки имеют на валу одно рабочее колесо. Если на валу турбогазодувки установлены несколько колес, то такие турбогазодувки называются многоступенчатыми.

Вакуум-насосы служат для создания и поддержания вакуума, перемещения газа, подсоса жидкости. Особенностью вакуум-насосов, определяющей их конструктивное отличие от компрессоров, является высокая степень сжатия.

Поршневые вакуум-насосы. Эти машины делятся на сухие и мокрые. Сухие вакуум-насосы применяют для откачки только газа, мокрые – для откачки газа и жидкости одновременно, например, в конденсаторах смешения.

Сухие вакуум-насосы конструктивно не отличаются от поршневых компрессоров. Для увеличения объемного коэффициента некоторые из этих машин снабжены золотниковым распределительным механизмом. С помощью золотника мертвое пространство насоса в конце периода сжатия соединяется с камерой всасывания, в которой давление в данный момент равно давлению всасывания p_1 . Сжатый до давления p_2 газ из мертвого пространства переходит в камеру с давлением p_1 . Поэтому давление газа в мертвом пространстве падает (происходит выравнивание давлений p_1 и p_2) и всасывание газа начинается почти в самом начале хода всасывания поршня вакуум-насоса, что увеличивает его производительность.

Мокрые вакуум-насосы не имеют механизма золотникового распределения, а всасывающий и нагнетательный клапаны их несколько увеличены в связи с необходимостью отвода значительного количества жидкости, скорость течения которой через клапаны должна быть меньше, чем скорость движения газа. Поэтому мокрые вакуум-насосы имеют увеличенный объем мертвого пространства и создают разрежение значительно меньшее, чем сухие вакуум-насосы.

Ротационные пластинчатые и водокольцевые вакуум-насосы. Эти насосы конструктивно подобны соответствующим компрессорам. В ротационных насосах с выравниванием давления перепуск газа осуществляется при помощи специального канала, соединяющего мертвое пространство с камерой наименьшего давления. Таким путем достигается существенное увеличение объемного коэффициента вакуум-насоса. Разрежение, создаваемое водокольцевым вакуум-насосом, тем меньше, чем выше температура и парциальное давление рабочей жидкости, заливаемой в насос. Поэтому водокольцевые вакуум-насосы заливают жидкостью с возможно более низкой температурой.

Струйные вакуум-насосы. По принципу действия эти вакуум-насосы аналогичны струйным насосам для перекачивания жидкостей. Как правило, в качестве рабочей жидкости в струйных вакуум-насосах используется пар.

Пароструйные насосы, изготовленные из химически стойких материалов, широко применяются для отсасывания кислых паров. Разрежение, создаваемое одноступенчатым пароструйным насосом, не превышает 90% абсолютного. Для получения более глубокого вакуума применяют многоступенчатые пароструйные вакуум-насосы с конденсацией отработанного пара между ступенями.

В химической промышленности наибольшее распространение получили поршневые и центробежные компрессорные машины.

Турбокомпрессоры и турбогазодувки отличаются компактностью, простотой устройства, равномерностью подачи. Существенным достоинством их является чистота подаваемого газа, не загрязненного смазкой, что часто определяет выбор типа компрессора. Отсутствие инерционных усилий и быстроходность позволяют монтировать турбокомпрессоры на более легких фундаментах с непосредственным присоединением к приводу или к электродвигателю.

Ротационные и винтовые компрессоры, обладая достоинствами центробежных, имеют более высокий к. п. д., чем турбокомпрессоры, и применяются при производительностях обычно не более 6000 м³/ч и давлениях не выше 15 ат. (двухступенчатые пластинчатые ротационные компрессоры). Недостатками ротационных компрессоров являются сложность изготовления и обслуживания, а также высокий износ пластин ротора, из-за чего часто нарушается герметичность рабочих камер и происходит уменьшение степени сжатия.

Область применения вакуум-насосов определяется величиной создаваемого ими вакуума. Мокрые поршневые вакуум-насосы создают разрежение 80-85 % абсолютного, а наиболее совершенные конструкции этих машин – 93-97 %. Сухие поршневые вакуум-насосы с выравниванием давления могут обеспечивать разрежение, равное 99,9 %. Предельный вакуум, создаваемый ротационными пластинчатыми вакуум-насосами с выравниванием давления, составляет 98-99 %, без выравнивания 95-96 %.

ГЛАВА 4 РАЗДЕЛЕНИЕ ЖИДКИХ И ГАЗОВЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

4.1 Характеристика дисперсных систем

Неоднородными, или гетерогенными, системами называют системы, состоящие из двух или нескольких фаз. Фазы, составляющие систему, могут быть, в принципе, механически отделены одна от другой.

Любая неоднородная бинарная система состоит из дисперсной (внутренней) фазы и дисперсионной среды, или сплошной (внешней) фазы, в которой распределены частицы дисперсной фазы.

В зависимости от физического состояния фаз различают: суспензии, эмульсии, пены, пыли, дымы и туманы.

Суспензии – неоднородные системы, состоящие из жидкости и взвешенных в ней твердых частиц. В зависимости от размеров твердых частиц (в мкм) суспензии условно подразделяют на грубые – более 100, тонкие – от 0,5 до 100, мути – от 0,1 до 0,5 и коллоидные растворы – меньше 0,1.

Эмульсии – системы, состоящие из жидкости и распределенных в ней капель другой жидкости, не смешивающейся с первой. Размер частиц дисперсной фазы может колебаться в широких пределах. Под действием силы тяжести эмульсии расслаиваются, однако при незначительных размерах капель (менее 0,4-0,5 мкм) или при добавлении стабилизаторов эмульсии становятся устойчивыми и не расслаиваются в течение длительного времени.

Пены – системы, состоящие из жидкости и распределенных в ней пузырьков газа. Эти газо-жидкостные системы по своим свойствам близки к эмульсиям.

Пыли и дымы – системы, состоящие из газа и распределенных в нем частиц твердого вещества. Пыли образуются обычно при механическом распределении частиц в газе (при дроблении, смешивании и транспортировке твердых материалов и др.). Размеры твердых частиц пылей составляют приблизительно 3-70 мкм. Дымы получаются в процессах конденсации паров

(газов) при переходе их в жидкое или твердое состояние, при этом образуются твердые взвешенные в газе частицы размерами 0,3-5 мкм. При образовании дисперсной фазы из частиц жидкости примерно таких же размеров (0,3-5 мкм) возникают системы, называемые туманами. Пыли, дымы и туманы представляют собой аэродисперсные системы, или аэрозоли.

Указанные системы могут образовываться также при химическом взаимодействии газов, протекающем с образованием твердой или жидкой фазы. При этом дисперсность системы будет определяться скоростью образования центров (ядер) конденсации и скоростью их роста.

В химической технологии широко распространены процессы, связанные с разделением жидких и газовых неоднородных систем. Выбор метода их разделения обуславливается, главным образом, размерами взвешенных частиц, разностью плотностей дисперсной и сплошной фаз, а также вязкостью сплошной фазы. Применяют следующие основные методы разделения: осаждение, фильтрование, центрифугирование, мокрое разделение. Эти методы лежат в основе гидромеханических процессов разделения неоднородных систем.

4.2 Разделение жидких систем

4.2.1 Материальный баланс процесса разделения

Пусть разделению подлежит система, состоящая из вещества a (сплошной фазы) и взвешенных частиц вещества b (дисперсной фазы). Введем обозначения:

$G_{см}$, $G_{осв}$, $G_{ос}$ – масса исходной смеси, осветленной жидкости и получаемого осадка, кг;

$x_{см}$, $x_{осв}$, $x_{ос}$ – содержание вещества b в исходной смеси, осветленной жидкости и осадке, массовые доли.

При отсутствии потерь вещества в процессе разделения уравнения материального баланса имеют вид:

по общему количеству вещества:

$$G_{см} = G_{осв} + G_{ос} \quad (4.1)$$

по дисперсной фазе (веществу b):

$$G_{\text{см}} X_{\text{см}} = G_{\text{осв}} X_{\text{осв}} + G_{\text{ос}} X_{\text{ос}} \quad (4.2)$$

Совместное решение уравнений (4.1) и (4.2) позволяет определить массу осветленной жидкости и массу осадка, получаемых при заданном содержании вещества b в осадке и осветленной жидкости:

$$G_{\text{осв}} = G_{\text{см}} \frac{X_{\text{ос}} - X_{\text{см}}}{X_{\text{ос}} - X_{\text{осв}}} \quad (4.3)$$

$$G_{\text{ос}} = G_{\text{см}} \frac{X_{\text{см}} - X_{\text{осв}}}{X_{\text{ос}} - X_{\text{осв}}} \quad (4.4)$$

Содержание взвешенных частиц в осветленной жидкости и в осадке выбирается в зависимости от конкретных технологических условий процесса разделения. При этом содержание вещества в осветленной жидкости обычно ограничивается некоторым нижним пределом.

4.2.2 Отстаивание (осаждение)

Разделение дисперсных систем под действием силы земного притяжения называют отстаиванием. Если дисперсная фаза имеет плотность выше, чем дисперсионная (сплошная) фаза, то она движется вниз и, достигнув ограничительной поверхности, образует слой осадка или тяжелой жидкости и наоборот, если плотность дисперсной фазы меньше, то частицы всплывают. После разделения фаз они могут быть выведены из аппарата раздельно.

Процесс отстаивания широко применяется в нефтегазопереработке и нефтехимии для обезвоживания и обессоливания нефти, отделения дистиллятов от воды после перегонки с водяным паром, очистки нефтяных топлив от загрязнений (вода, частицы катализатора, продукты коррозии, соединения кремния, кальция, алюминия), отделения газа от жидкости в газосепараторах, очистки сточных вод от загрязнений (нефть, нефтепродукты, нефтесодержащий шлам, избыточный активный ил, твердые механические примеси) и т.п.

Важным показателем процесса отстаивания является скорость осаждения частиц под действием силы тяжести. Скорость осаждения частиц

можно увеличить путем воздействия на свойства системы, изменяя диаметр частиц, вязкость и разность плотностей. Укрупнение частиц может происходить при воздействии коагуляторов или в поле действия электрических сил; вязкость и разность плотностей можно изменять за счет повышения температуры или при добавлении в систему растворителей, имеющих меньшую вязкость и плотность.

Отстаивание дисперсной системы с небольшой концентрацией взвешенных частиц принято называть свободным осаждением, а с высокой – стесненным. При высокой концентрации оседающих частиц необходимо учитывать их взаимовлияние. Осаждение частиц в среде с высокой их концентрацией характеризуется явлениями как способствующими увеличению скорости осаждения, так и замедляющими эту скорость.

Отстаивание является более дешевым процессом, чем другие процессы разделения неоднородных систем, например фильтрование. Отстаивание используют в качестве первичного процесса разделения, проведение которого часто позволяет ускорить фильтрование или центрифугирование суспензий.

Отстаивание проводят в аппаратах, называемых отстойниками. Отстойники для сгущения суспензии называются сгустителями, а для классификации твердых частиц на фракции – классификаторами.

Различают отстойники непрерывного, полунепрерывного и периодического действия. В первых все процессы протекают непрерывно, в последних – периодически; в отстойниках полунепрерывного действия подача разделяемой смеси и вывод очищенной сплошной фазы проводятся непрерывно, а удаление сгущенной дисперсной фазы (осадка, шлама) – периодически.

Периодически действующие отстойники представляют собой низкие бассейны без перемешивающих устройств. Такой отстойник заполняется суспензией, которая остается в состоянии покоя в течение определенного времени, необходимого для оседания твердых частиц на дно аппарата. После

этого слой осветленной жидкости деконтируют, т.е. сливают через сифонную трубку или краны, расположенные выше уровня осевшего осадка. Последний, обычно представляющий собой подвижную текучую густую жидкую массу – шлам, выгружают вручную через верх аппарата или удаляют через нижний спусковой кран.

Размеры и форма аппаратов периодического действия зависят от концентрации дисперсной фазы и размеров ее частиц. Чем крупнее частицы и чем больше их плотность, тем меньший диаметр может иметь аппарат. скорость отстаивания зависит от температуры, с изменением которой меняется вязкость.

В промышленности наиболее распространены отстойники непрерывного действия.

Схема отстойника непрерывного действия с гребковой мешалкой показана на рисунке 4.1.

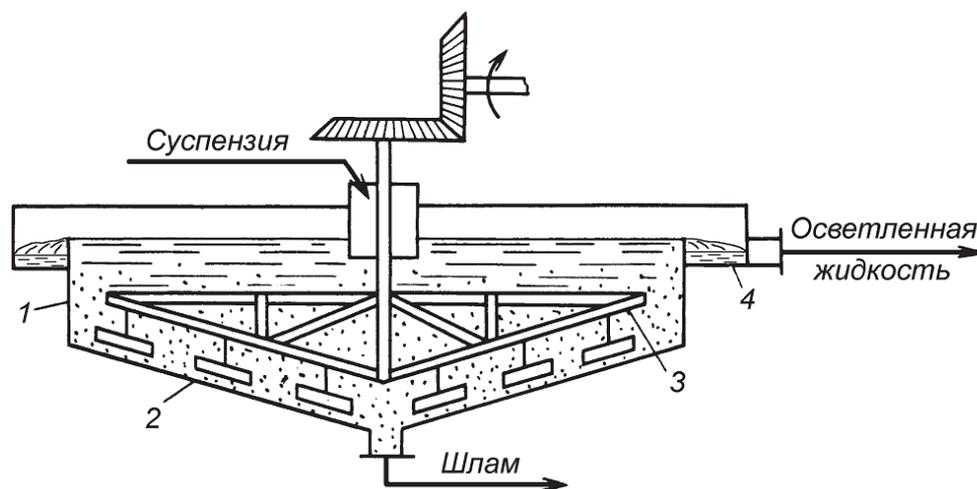


Рисунок 4.1 Схема отстойника непрерывного действия с гребковой мешалкой:

1 – корпус; 2 – днище; 3 – гребковая мешалка; 4 – кольцевой желоб

Эти аппараты представляют собой цилиндрический резервуар 1 с коническим днищем 2. В резервуаре установлена мешалка 3, снабженная гребками, которые непрерывно перемещают осадок к центральному разгрузочному отверстию и одновременно слегка взбалтывают осадок,

способствуя его обезвоживанию. Частота вращения мешалки незначительна, поэтому процесс осаждения не нарушается. Суспензия непрерывно по трубе в середине верхней части резервуара. Осветленная жидкость переливается в кольцевой желоб 4 и удаляется через штуцер. Осадок, представляющий собой сгущенную суспензию, удаляется через штуцер в коническом днище с помощью насоса.

Расчет отстойников. Отстойники проектируются в расчете на осаждение самых мелких частиц, находящихся в исходной смеси. Поэтому время пребывания смеси должно быть больше наибольшего времени осаждения частиц наименьшего размера на дно аппарата с заданной высоты.

Пусть в отстойнике прямоугольного сечения, имеющем длину l (м) и ширину b (м), суспензия разделяется на осадок и слой осветленной жидкости высотой h (м). Производительность отстойника по осветленной жидкости $Q_{осв}$ (м³/ч) в этом случае выразится уравнением

$$Q_{осв} = \omega_{п} \cdot b \cdot h, \quad (4.5)$$

где $\omega_{п}$ – скорость потока жидкости вдоль аппарата, м/сек.

Время прохождения τ (сек) суспензии отстойника составит

$$\tau = \frac{l}{\omega_{п}} \quad (4.6)$$

За это же время частицы, осаждающиеся со скоростью $\omega_{ос}$ (м/сек) должны пройти наибольший путь h (м). Следовательно, время отстаивания определится из уравнения

$$\tau = \frac{h}{\omega_{ос}} \quad (4.7)$$

Приравнивая правые части уравнений и подставляя значение $\omega_{п}$ получим:

$$\tau = \frac{h}{\omega_{ос}} = \frac{l}{\omega_{п}} = \frac{lh}{Q_{осв}} \quad (4.8)$$

Откуда производительность отстойника:

$$Q_{осв} = \omega_{ос} lb = \omega_{ос} F, \quad (4.9)$$

где F – поверхность отстойника, м²

Последнее уравнение показывает, что производительность отстойника не зависит в явном виде от высоты, а зависит только от скорости и поверхности осаждения. Поэтому отстойники имеют значительную поверхность осаждения при небольшой высоте, которая не превышает 1,8-4,5 м, а для отстойников очень больших диаметров – не более 7 м.

Необходимую поверхность осаждения находим из выражения

$$F = \frac{Q_{\text{осв}}}{\omega_{\text{ос}}} \quad (4.10)$$

Объемный расход осветленной жидкости $Q_{\text{осв}}$ при ее плотности $\rho_{\text{осв}}$ (кг/м^3) составляет $Q_{\text{осв}} = \frac{G_{\text{осв}}}{\rho_{\text{осв}}}$, где $G_{\text{осв}}$ – массовый расход осветленной жидкости в кг/сек . Тогда:

$$F = \frac{G_{\text{осв}}}{\rho_{\text{осв}} \omega_{\text{ос}}} \quad (4.11)$$

Отсюда поверхность:

$$F = \frac{G_{\text{см}}}{\rho_{\text{осв}} \omega_{\text{ос}}} \frac{x_{\text{ос}} - x_{\text{см}}}{x_{\text{ос}} - x_{\text{осв}}} \quad (4.12)$$

При выводе формулы не учитывалась неравномерность движения жидкости, образование вихрей жидкости по всей площади отстойника, что уменьшает скорость отстаивания в промышленных отстойниках. Поэтому в инженерных расчетах поверхность отстойника, определенную по уравнению обычно увеличивают ориентировочно на 30-35 %.

4.2.3 Фильтрация

Фильтрация – процесс разделения суспензий и аэрозолей с использованием пористых перегородок, на поверхности которых задерживаются взвешенные в жидкости или газе твердые частицы, образующие на перегородке слой осадка. Жидкость, отделенная от осадка, называется фильтратом.

Движение жидкости через пористые перегородки и слой осадка создают за счет разности давления в аппарате, являющейся движущей силой процесса. Процесс фильтрации обычно протекает в ламинарном режиме, и перепад давления линейно зависит от вязкости среды. Одним из основных

показателей процесса является скорость фильтрования C , определяемая как объем фильтрата, проходящий через поверхность фильтра за промежуток времени. Скорость фильтрования пропорциональна перепаду давления p (Па) в слое осадка и фильтрующей перегородке и обратно пропорциональна их сопротивлению (Па·с/м).

Перепад давления может создаваться: 1) столбом жидкости над фильтрующей перегородкой (гидростатическое фильтрование); 2) избыточным давлением жидкости, например, при подаче ее насосом (фильтрование под давлением); 3) путем создания разрежения под фильтрующей перегородкой при помощи вакуум-насоса (фильтрование под вакуумом).

В промышленной практике наибольшее распространение получили два режима фильтрования. Режим при постоянном перепаде давления p (вакуумное фильтрование, гидростатическое фильтрование с постоянным столбом жидкости над фильтрующей перегородкой). При этом режиме скорость фильтрования в связи с постоянным увеличением высоты слоя осадка и ростом его сопротивления с течением времени уменьшается.

Режим при постоянной скорости C (подача суспензии на фильтр поршневым или плунжерным насосом постоянной производительности). При режиме с постоянной скоростью фильтрования слой осадка и его сопротивление постоянно увеличиваются, вследствие чего должно непрерывно расти давление поступающей суспензии, а, следовательно, и перепад давления p .

Промывка осадка проводится с целью удаления содержащегося в нем фильтрата путем вытеснения его промывной жидкостью. Она удлиняет полный цикл работы фильтра.

Эффективность разделения и производительность фильтра зависят от свойств обрабатываемой суспензии, правильного выбора типа фильтра, его оснащения и режима работы.

Для фильтрования применяются следующие виды перегородок:

1) насыпные, состоящие из слоя мелкозернистых материалов (гравий, песок и др.), обладающие высокой полнотой разделения суспензий, но отличающиеся большим сопротивлением, поскольку осадок проникает внутрь фильтрующего слоя, и требуются специальные приемы для его отделения. Такие фильтровальные перегородки применяют для суспензий с малой концентрацией осадка;

2) набивные, состоящие из слоя волокнистых материалов (вата хлопчато-бумажная, шерстяная, шлаковая, стеклянная, асбестовое волокно и т.д.); характеристика та же, что и для насыпных перегородок;

3) керамические, состоящие из плоских пористых кислотоупорных плиток, применяющиеся для фильтрования кислых сред; характеристика та же, что и для насыпных перегородок;

4) тканевые, обладающие относительно малым сопротивлением и удобные в конструктивном отношении;

5) плетеные, представляющие собой сетки из тонкой проволоки, выполненные из цветных металлов и сплавов; отличаются пониженной задерживающей способностью и поэтому в начале фильтрования пропускают в фильтрат мелкие частицы. Однако осадок, который откладывается в последующем, обеспечивает высокую фильтровальную способность. Плетеные перегородки часто применяют для фильтрования при повышенной температуре, причем первые порции мутного фильтрата возвращаются на повторное фильтрование.

В ряде случаев фильтровальная перегородка не обладает достаточной задерживающей способностью и для придания ей необходимых фильтрующих свойств на ее поверхность намыывают слой вспомогательного фильтрующего вещества (кизельгура, диатомита, перлита и т.п.). Слой осадка из вспомогательного вещества служит фильтровальной перегородкой, которая и задерживает мелкие частицы суспензии (менее 1 мкм).

Важной характеристикой осадка является его пористость, влияющая на проницаемость жидкости и обуславливающая величину сопротивления,

оказываемого потоку фильтрата. Осадок, который при фильтровании независимо от давления имеет одну и ту же пористость, называется несжимаемым и состоит обычно из твердых кристаллических частиц. Большая часть осадков состоит из мягких частиц, которые с повышением давления уплотняются, вследствие чего их проницаемость уменьшается. Такие осадки называются сжимаемыми.

Аппараты для фильтрования, которые называют фильтрами, подразделяются на фильтры периодического и непрерывного действия.

Цикл работы периодически действующего фильтра состоит из основной операции – фильтрования и вспомогательных операций, связанных с промывкой, сушкой осадка, разборкой фильтра, выгрузкой осадка и др.

После удаления осадка фильтровальную перегородку регенерируют, удаляя из пор и с поверхности частицы твердой фазы. Регенерацию обычно осуществляют продувкой воздухом, инертным газом, паром или двусторонней промывкой жидкостью.

В фильтрах непрерывного действия все операции (основные и вспомогательные) осуществляются непрерывно в течение сравнительно длительного отрезка времени.

В зависимости от способа создания разности давлений фильтры классифицируются на работающие под вакуумом и работающие под давлением. К фильтрам, работающим под давлением, относят емкостные, рамные, камерные, листовые, патронные фильтр-прессы. Фильтры, работающие под вакуумом, разделяют на барабанные, дисковые, ленточные, карусельные, тарельчатые.

Рамные и камерные фильтр-прессы периодического действия имеют самый большой срок эксплуатации по сравнению с другим фильтровальным оборудованием. Они отличаются простотой и надежностью конструкции, компактностью, большой поверхностью фильтрования, приходящейся на единицу занимаемой площади, позволяют эффективно разделять труднофильтрующиеся суспензии, вести фильтрование в диапазоне

температур, не доступном для фильтров других конструкций (до 130 °С). Недостаток таких фильтров состоит в использовании ручного труда при разгрузке, а также относительно невысоком допустимом давлении при работе, что обусловлено опасностью нарушения плотности уплотнения в поверхности соприкосновения рам и плит с фильтровальной тканью.

Листовые фильтры, предназначены для разделения суспензий полиэфиров и других суспензий повышенной вязкости с применением намывного слоя.

Барабанный вакуум-фильтр широко применяются на установках депарафинизации масел.

4.2.4 Центрифугирование

Для разделения неоднородных систем – суспензий и эмульсий под воздействием центробежной силы применяется центрифугирование. Под действием центробежной силы в аппарате более тяжелые частицы отбрасываются к стенкам сосуда и неоднородная система разделяется. Создаваемое значение центробежной силы может во много раз превосходить значение силы тяжести.

В процессе разделения центробежную силу можно получить вращением сосуда, содержащего неоднородную смесь, или вращением разделяемого потока, вводимого с большой скоростью в неподвижный аппарат специальной формы.

Аппараты с вращающимся сосудом – ротором носят название центрифуг и жидкостных центробежных сепараторов; неподвижные аппараты с вращающимся в них потоком газа называют циклонами, а жидкости – гидроциклонами.

Стенки ротора центрифуги могут быть сплошными, тогда на их поверхности накапливается твердый осадок или тяжелая жидкость, которые периодически или непрерывно удаляются; такие центрифуги называются отстойными.

Применяются также центрифуги с перфорированными стенками ротора, на поверхности которых размещается фильтровальная ткань, задерживающая осадок и пропускающая фильтрат; такие центрифуги называются фильтрующими.

Суспензии можно разделять в роторах, как со сплошной, так и с перфорированной стенкой, а эмульсии – только в роторах, имеющих сплошную стенку.

В нефтегазоперерабатывающей и нефтехимической промышленности центрифугирование применяется для отделения воды и твердых частиц от нефти и нефтепродуктов, разделения суспензий с нерастворимой твердой фазой (обработка поливинилхлорида, полистирола, полиэтилена высокого давления, сажевой пульпы т.д.), при производстве парафина, церезинов и др. процессах.

Отношение центробежной силы к силе тяжести называется фактором разделения.

Конструкции центрифуг и сепараторов. Современные промышленные центрифуги и сепараторы – это сложнейшее технологическое оборудование, состоящее из многих механизмов высокой точности, обладающее высокими скоростями и управляемое с помощью сложных электрогидравлических или электрических систем.

Центрифуги могут быть классифицированы по следующим характерным признакам:

а) по характеру протекания процесса центрифуги делят на машины периодического и непрерывного действия;

б) по технологическому назначению или принципу разделения различают следующие типы центрифуг: осадительные (отстойные) и осветляющие – для разделения суспензий; разделяющие (сепарирующие) – для разделения эмульсий; фильтрующие – для разделения суспензий; комбинированные, в которых сочетаются два принципа разделения – осаждение и фильтрование;

в) по основному конструктивному признаку центрифуги бывают: горизонтальные (с горизонтальным расположением вала); вертикальные; наклонные; подвесные с верхним приводом; подвесные с нижним приводом (маятниковые); вертикальные трубчатые;

г) по способу выгрузки осадка из ротора различают центрифуги с ручной, контейнерной (кассетной), ножевой, шнековой, инерционной, механико-пневматической выгрузкой и выгрузкой пульсирующим поршнем.

В нефтехимических производствах наиболее перспективны саморазгружающиеся сепараторы. По конструкции разгрузочных устройств такие сепараторы разделяются на три основные группы: с непрерывным, пульсирующим и непрерывно-циклическим отводом осадка.

Гидроциклоны. Циклоны, предназначенные для разделения жидких неоднородных систем (суспензий и нестойких эмульсий), называют гидроциклонами. Они применяются для осветления жидкостей или обогащения суспензий, а также для разделения твердых частиц с различными размерами зерен. Циклоны всех видов отличаются простотой конструкции и обслуживания, компактностью и низкой стоимостью. По сравнению с аппаратами, в которых отделение частиц пыли осуществляется под действием силы тяжести или инерционных сил, циклоны обеспечивают более высокую степень очистки газа и требуют меньших капитальных затрат. Недостаткам циклонов следует отнести сравнительно большое гидравлическое сопротивление, невысокую степень улавливания частиц размером менее 10 мкм, истирание корпуса аппарата частицами пыли и чувствительность к колебаниям нагрузки по газу.

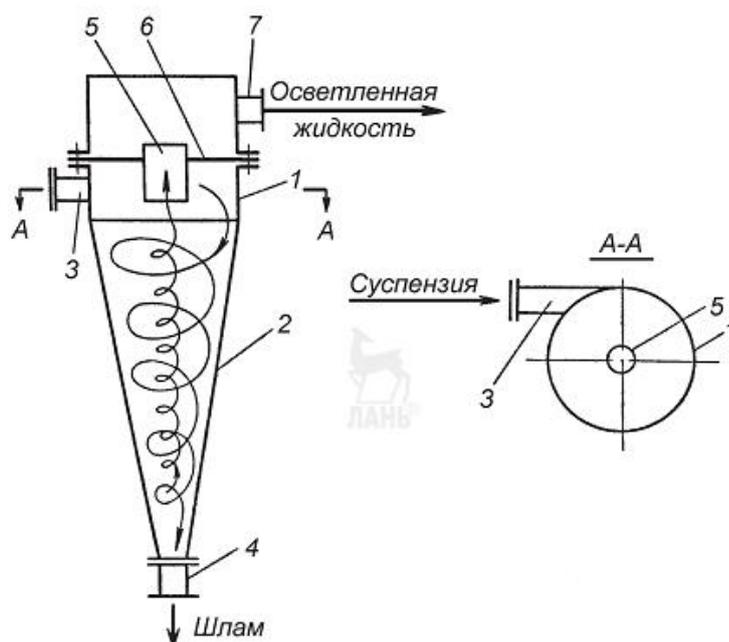


Рисунок 4.2 Принципиальная схема гидроциклона:

- 1 – цилиндрическая часть корпуса; 2 – коническое днище; 3 – штуцер для подачи суспензии; 4 – штуцер для вывода шлама; 5 – патрубок; 6 – перегородка; 7 – штуцер для вывода слива

Корпус гидроциклона состоит из верхней короткой цилиндрической части 1 и удлиненного конического днища 2. Суспензия подается тангенциально через штуцер 3 в цилиндрическую часть корпуса и приобретает интенсивное вращательное движение. Под действием центробежных сил наиболее крупные твердые частицы перемещаются к стенкам аппарата и концентрируются во внешних слоях вращающегося потока. Затем они движутся по спиральной траектории вдоль стенок гидроциклона вниз к штуцеру 4, через который отводятся в виде сгущенной суспензии (шлама). Большая часть жидкости с содержащимися в ней мелкими твердыми частицами (осветленная жидкость) движется во внутреннем спиральном потоке вверх вдоль оси аппарата. Осветленная жидкость, или слив, удаляется через патрубок 5, укрепленный на перегородке 6, или штуцер 7.

4.3 Разделение газовых систем (очистка газов)

Промышленная очистка газов от взвешенных в них твердых или жидких частиц проводится для уменьшения загрязненности воздуха, улавливания из газа ценных продуктов или удаления из него вредных примесей, отрицательно влияющих на последующую обработку газа, а также разрушающих аппаратуру.

Очистка отходящих промышленных газов является одной из важных технологических задач большинства химических производств. Поэтому разделение газовых неоднородных систем относится к числу широко распространенных основных процессов химической технологии.

В промышленных условиях пыль может образовываться в результате механического измельчения твердых тел (при дроблении, истирании, размалывании, транспортировке и т.д.), при горении топлива (зольный остаток), при конденсации паров, а также при химическом взаимодействии газов, сопровождающемся образованием твердого продукта.

Различают следующие способы очистки газов: гравитационная очистка; очистка газов под действием инерционных и центробежных сил; очистка фильтрованием; мокрая очистка; электрическая очистка.

На практике требуемая степень очистки газа не всегда может быть достигнута в одном газоочистительном аппарате. Поэтому в ряде случаев применяют двухступенчатые и многоступенчатые установки, включающие аппараты одного и того же или разных типов.

Степень очистки (в %) газа η определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \cdot 100\% = \frac{V_1 x_1 - V_2 x_2}{V_1 x_1} \cdot 100\% \quad (4.13)$$

где G_1 и G_2 – масса взвешенных частиц в исходном (загрязненном) и очищенном газе, кг/ч;

V_1 и V_2 – объемный расход исходного и очищенного газа, приведенного к нормальным условиям, м³/ч;

x_1 и x_2 – концентрация взвешенные частиц в запыленном и очищенном газе, приведенном к нормальным условиям, кг/м^3 .

Осаждение под действием сил тяжести (гравитационная очистка). Отстаивание твердых частиц в газовой среде подчиняется принципиально тем же закономерностям, что и осаждение их под действием сил тяжести в капельной жидкости. Скорость отстаивания пропорциональна, при прочих равных условиях, разности плотностей частиц и газа. Учитывая, что плотность газа на несколько порядков меньше плотности капельной жидкости, можно заключить, что скорость очистки газов в поле сил тяжести будет значительно выше скорости отстаивания в капельно-жидких средах. Несмотря на это, очистка газа отстаиванием является относительно малоэффективным процессом, так как действующие силы в данном случае невелики сравнительно с центробежными и другими силами, используемыми для той же цели.



Рисунок 4.3 Принципиальная схема пылеосадительной камеры:

1 – корпус; 2 – полки; 3 – отражательная перегородка; 4 – люки для удаления пыли

Очистку газов от пыли под действием сил тяжести производят в пылеосадительных камерах. Запыленный газ поступает в камеру 1, внутри которой установлены горизонтальные перегородки (полки) 2. Частицы пыли оседают из газа при его движении между полками, расстояние между

которыми обычно составляет 0,1-0,4 м. При такой небольшой высоте каналов между полками уменьшается путь осаждающихся частиц пыли. Вместе с тем наличие полок позволяет увеличить эффективную поверхность осаждения частиц. Уменьшение пути частиц и увеличение поверхности осаждения способствуют уменьшению времени осаждения и, следовательно, повышению степени очистки газа и производительности камеры. Однако скорость потока газа в камере ограничена тем, что частицы пыли должны успеть осесть до того, как они будут вынесены потоком газа из камеры.

Газ, пройдя полки, огибает вертикальную отражательную перегородку 3 (при этом из него осаждается под действием сил инерции дополнительно некоторое количество пыли) и удаляется из камеры. Одновременно отражательная перегородка способствует более равномерному распределению газа между горизонтальными полками камеры, так как в этом случае гидравлическое сопротивление каналов между ними одинаково. Пыль, осевшая на полках, периодически удаляется с них вручную специальными скребками через люки в боковой стенке 4. Для непрерывной очистки газа от пыли камеру делят на два самостоятельных отделения или устанавливают две параллельно работающие камеры. В одном отделении (или в одной камере) производится очистка газа, в это же время другое отделение (камера) очищается от осевшей в нем пыли.

Под действием силы тяжести удается достаточно полно выделить из газа лишь крупные частицы пыли. Поэтому пылеосадительные камеры используют только для предварительной, грубой очистки газов, содержащих частицы пыли относительно больших размеров (>100 мкм). Степень очистки газа от пыли в этих аппаратах обычно не превышает 30-40 %. В настоящее время пылеосадительные камеры ввиду их больших габаритных размеров и сравнительно малой эффективности вытесняются другими аппаратами, в которых применяются более совершенные способы очистки газа.

Осаждение под действием инерционных, в частности центробежных сил. Процесс циклонирования получил свое название от циклонов –

аппаратов для разделения неоднородных систем под действием центробежной силы. В промышленности применяют циклоны разнообразных конструкций. Наиболее распространены циклоны, разработанные в ОАО «НИИИГАЗ».

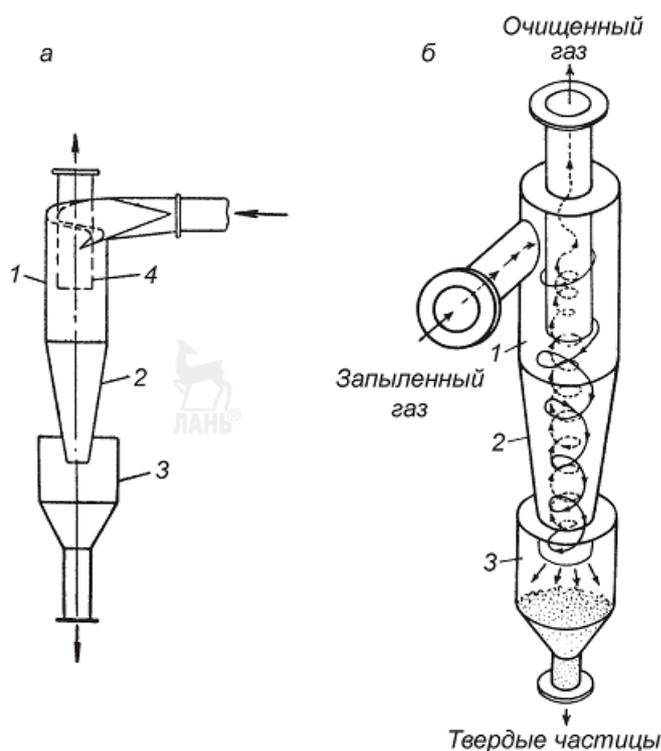


Рисунок 4.4 Принципиальные схемы:

а – циклон конструкции НИИОГАЗ; б – устройство циклона;

1 – цилиндрический корпус; 2 – коническое днище; 3 – разгрузочный бункер;

4 – выхлопная труба

Циклон состоит из цилиндрического корпуса 1 с коническим днищем 2. Запыленный газ вводится в корпус через штуцер тангенциально со скоростью 20-30 м/с, при этом приобретает вращательное движение вокруг трубы для вывода очищенного газа 4, расположенной по оси аппарата. Частицы пыли под действием центробежной силы отбрасываются к стенкам корпуса. В аппарате создаются два спиральных потока: внешний поток запыленного газа, который движется вниз вдоль поверхности стенок циклона, и внутренний поток очищенного газа, который поднимается вверх, располагаясь вблизи оси аппарата, и удаляется из него. Твердые частицы

концентрируются вблизи стенок и переносятся потоком в разгрузочный бункер.

При больших расходах запыленного газа для увеличения производительности аппарата применяют батарейный циклон, в котором несколько циклонных элементов объединены в одном корпусе и работают параллельно.

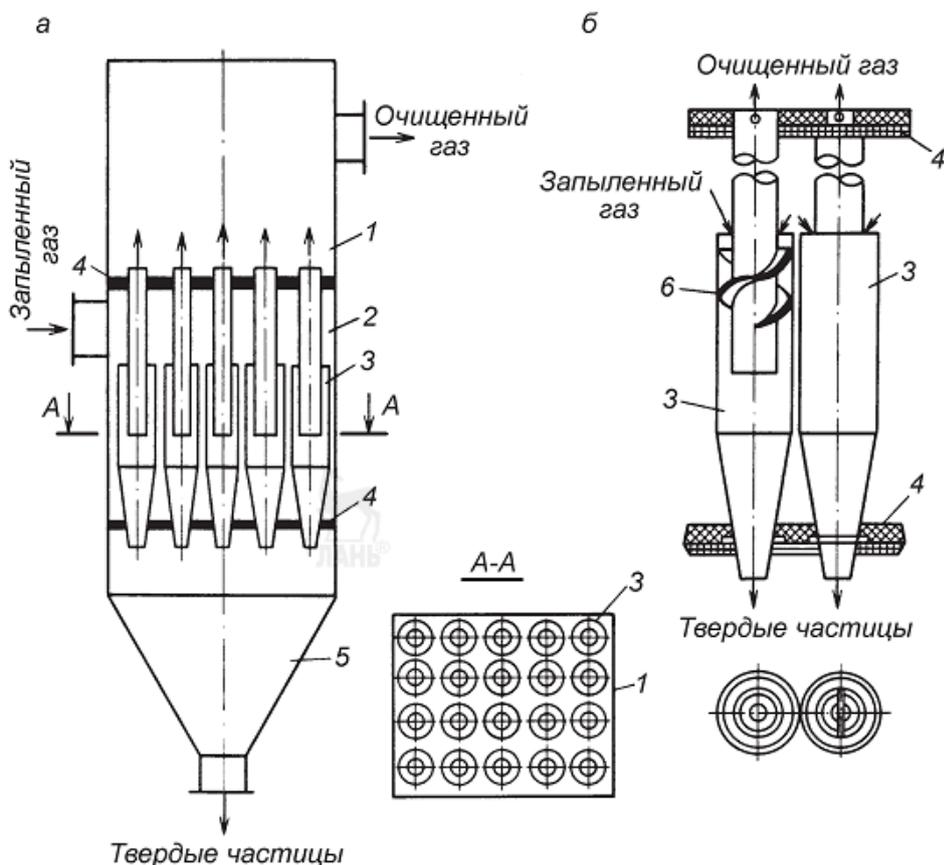


Рисунок 4.5 Схемы батарейного циклона (а) и его элементов (б):

1 – корпус; 2 – газораспределительная камера; 3 – корпуса циклонных элементов; 4 – трубные решетки; 5 – бункер для частиц пыли; 6 – лопастные устройства для закручивания газового потока внутри элементов

В цилиндрическом корпусе 1 расположены циклонные элементы 3, герметично закрепленные в трубных решетках 4. Запыленный газ через входной штуцер поступает в газораспределительную камеру 2, а из нее – одновременно в циклонные элементы, в кольцевое пространство между корпусом элемента 3 и патрубком для вывода очищенного газа. В этом

пространстве размещены лопастные устройства 6, которые придают газовому потоку вращательное движение. Твердые частицы отбрасываются к стенкам, движутся вниз по спирали и ссыпаются из всех элементов в общий бункер 5. Очищенный газ выходит из элементов по трубам в общую камеру и удаляется из аппарата через верхний штуцер.

Фильтрация. При очистке фильтрованием газы, содержащие взвешенные твердые частицы, проходят пористые перегородки, пропускающие газ и задерживающие на своей поверхности твердые частицы.

В зависимости от вида фильтровальной перегородки различают следующие фильтры для газов:

а) с гибкими пористыми перегородками из природных, синтетических и минеральных волокон (тканевые материалы), нетканых волокнистых материалов (войлок, картон и др.), пористых листовых материалов (губчатая резина, пенополиуретан и др.), металлоткани;

б) с полужесткими пористыми перегородками (слои из волокон, стружки, сеток);

в) с жесткими пористыми перегородками из зернистых материалов (пористые керамика, пластмассы, спеченные или спрессованные порошки металлов и др.);

г) с зернистыми слоями из кокса, гравия, кварцевого песка и др.

Выбор пористой перегородки обусловлен рядом факторов, из которых основными являются: химические свойства фильтруемого газа, его температура, гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки и размеры взвешенных в газе частиц.

К числу наиболее широко применяемых фильтров с гибкими пористыми перегородками относятся рукавные фильтры.

Рукавный фильтр представляет собой корпус, в котором находятся тканевые мешки (рукава) 1. Нижние открытые концы рукавов закреплены на патрубках трубной решетки 2. Верхние закрытые концы рукавов подвешены на общей раме.

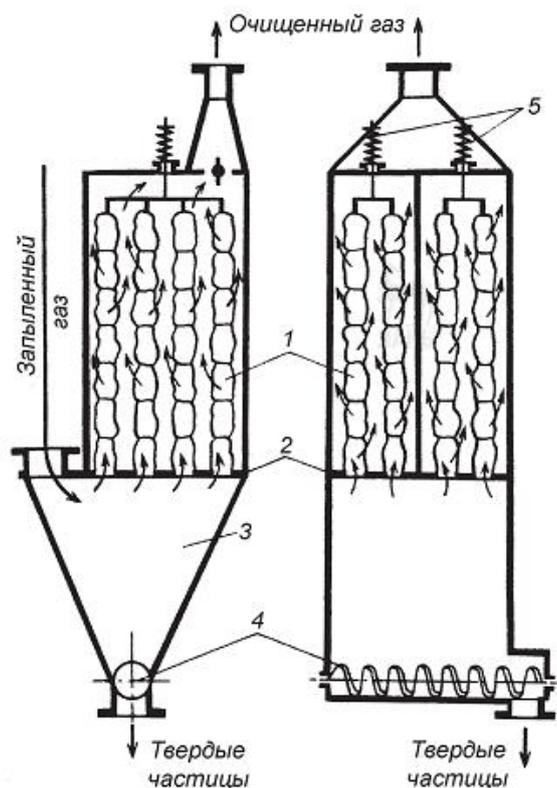


Рисунок 4.6 Принципиальная схема рукавного фильтра:

1 – рукава с кольцами жесткости; 2 – трубная решетка; 3 – разгрузочный бункер; 4 – шнек; 5 – устройства для встряхивания рукавов

Запыленный газ вводится в аппарат через штуцер и попадает внутрь рукавов. Проходя через ткань, из которой сделаны рукава, газ очищается от твердых частиц и выходит из аппарата через верхний штуцер. твердые частицы осаждаются на внутренней поверхности и в порах ткани, при этом гидравлическое сопротивление возрастает. Когда оно достигает максимально допустимого значения, рукава очищают. Для этого их встряхивают с помощью устройства 5, твердые частицы попадают в разгрузочный бункер 3 и удаляются из аппарата шнеком 4. Кроме того, рукава продувают воздухом, подаваемым с наружной их стороны, т.е. в направлении, обратном направлению движения очищаемого газа. Для того чтобы рукава при продувке не сплющивались, они снабжены кольцами жесткости.

В рукавных фильтрах достигается высокая степень очистки газа от тонкодисперсной пыли (при правильной эксплуатации – до 98-99 %).

Недостатками этих фильтров являются сравнительно быстрый износ ткани и закупорка пор в ней.

Выбор ткани для рукавов определяется ее механической прочностью, химической и термической стойкостью. Рукава изготавливают из тканей на основе натуральных (хлопок, лен) и химических волокон органического и неорганического происхождения (полиамидные, полиэтиленовые, полиакрилнитрильные волокна и др.).

Фильтры с полужесткими пористыми перегородками. Такие фильтры обычно состоят из ячеек-кассет, в которых между сетками зажат слой стекловолна, шлаковой ваты, металлической стружки, смоченной специальным (висциновым) маслом для лучшего улавливания пыли и т.д. Кассеты обычно собирают в секции, имеющие поверхность, соответствующую требуемой производительности фильтра.

Секции устанавливают перпендикулярно к газовому потоку или под углом к нему; возможна периодическая регенерация фильтра путем промывки или продувки. Эти фильтры применяют для очистки относительно мало запыленных газов, например вентиляционного воздуха (содержание пыли 0,001-0,005 г/м³).

Для очень тонкой очистки газов от высокодисперсных и радиоактивных аэрозолей (иногда такую очистку называют высокоэффективной, или «абсолютной») используют фильтры с перегородками, в которых в качестве фильтрующего материала применяют ультратонкие полимерные волокна, получившие название фильтрующих материалов ФП (фильтры Петрянова). Эти материалы, изготавливаемые на основе волокон из перхлорвинила, полиарилатов, эфиров целлюлозы и т.д. обладают высокой химической стойкостью, механической прочностью и термостойкостью.

Фильтры с жесткими пористыми перегородками. Для сверхтонкой очистки газов, требуемой в некоторых химических производствах, используют фильтры с жесткими перегородками из керамических, металлокерамических и пластмассовых пористых материалов или

мелкоячеистых металлических сеток и перфорированных листов. Весьма полная очистка газа в них достигается вследствие извилистости и многослойного расположения пор в фильтрующем материале.

В корпусе такого фильтра находится ряд открытых сверху металлокерамических гильз, герметически закрепленных в общей решетке. Запыленный газ поступает в аппарат через входной штуцер и проходит сквозь стенки гильз, очищаясь при этом от пыли. Очищенный газ удаляется через штуцер. Очистка фильтрующих элементов от осевшей на них пыли производится периодически обратной продувкой сжатым воздухом, поступающим через коллектор. Пыль собирается в бункере и удаляется из фильтра. С помощью металлокерамических фильтров можно отделять твердые частицы размером более 0,5 мкм.

Гильзы металлокерамических фильтров изготавливают из гранул, порошка или стружки металла путем прессования и спекания, проката или литья. Они более прочны и менее хрупки, чем керамические, отличаются высокой механической прочностью и химической стойкостью, а также хорошо противостоят резким температурным колебаниям. Поэтому металлокерамические фильтры применяются для очистки химически агрессивных горячих газов.

Фильтры с зернистыми слоями. Газы в таких фильтрах очищаются, проходя сквозь неподвижные (свободно насыпанные) периодически или непрерывно перемещающиеся слои зернистого материала – мелко раздробленный шлак, кокс, кварцевый песок, гравий и т.д. Фильтрующие слои могут быть расположены горизонтально или вертикально, при этом зернистый материал заключен в секции, состоящие из сеток, перфорированных листов и др.

В корпусе фильтра непрерывного действия с движущимся слоем зернистого фильтрующего материала находятся фильтровальные перегородки, внутри которых непрерывно движется сверху вниз фильтрующий материал (например, гранулированный шлак). Загрязненный

газ поступает через входной штуцер, проходит сквозь фильтрующие слои и в очищенном виде удаляется через штуцер. Отработанный фильтрующий материал выводится через затвор, очищается от загрязнений, например промывной водой и снова подается в фильтр.

Фильтры с зернистым слоем фильтрующего материала используют до тонкой очистки газов, например для очистки сжатого воздуха от масла, улавливания сажи, очистки от пыли синтез-газов.

Мокрая очистка. Для тонкой очистки газов от пыли применяют мокрую очистку – промывку газов водой или другой жидкостью. Тесное взаимодействие между жидкостью и запыленным газом осуществляется в мокрых пылеуловителях либо на поверхности жидкой пленки, стекающей по вертикальной или наклонной плоскости (пленочные или насадочные скрубберы), либо на поверхности капель (полые скрубберы, скрубберы Вентури) или пузырьков газа (барботажные пылеуловители).

Мокрая очистка газов наиболее эффективна тогда, когда допустимы увлажнение и охлаждение очищаемого газа, а отделяемые твердые или жидкие частицы имеют незначительную ценность. Охлаждение газа ниже температуры конденсации находящихся в нем паров жидкости способствует увеличению веса пылинок, играющих при этом роль центров конденсации, и облегчает выделение их из газа. Если улавливаемые частицы находятся в высокодиспергированном состоянии и плохо или совсем не смачиваются водой, то очистка газа в мокрых пылеуловителях малоэффективна. В таких случаях для улучшения смачиваемости частиц и увеличения степени очистки к используемой жидкости добавляют поверхностно-активные вещества.

Для повышения экономичности мокрой очистки и извлечения уловленных вредных или ценных веществ воду либо другую промывную жидкость вместе со шламом направляют из пылеуловителей в отстойники для осветления и последующего ее использования. Если одновременно с очисткой требуется охлаждение газа, то промывную жидкость предварительно охлаждают в градирнях или холодильниках.

Наиболее существенным недостатком мокрой очистки газов является образование большого количества сточных вод (шламов), которые вызывают коррозию аппаратуры и должны подвергаться дальнейшему разделению или очистке.

Для очистки сильно запыленных газов используют барботажные пылеуловители. В этих аппаратах жидкость, взаимодействующая с газом, приводится в состояние динамической пены, что обеспечивает большую поверхность контакта между жидкостью и газом и соответственно высокую степень очистки газа от пыли.

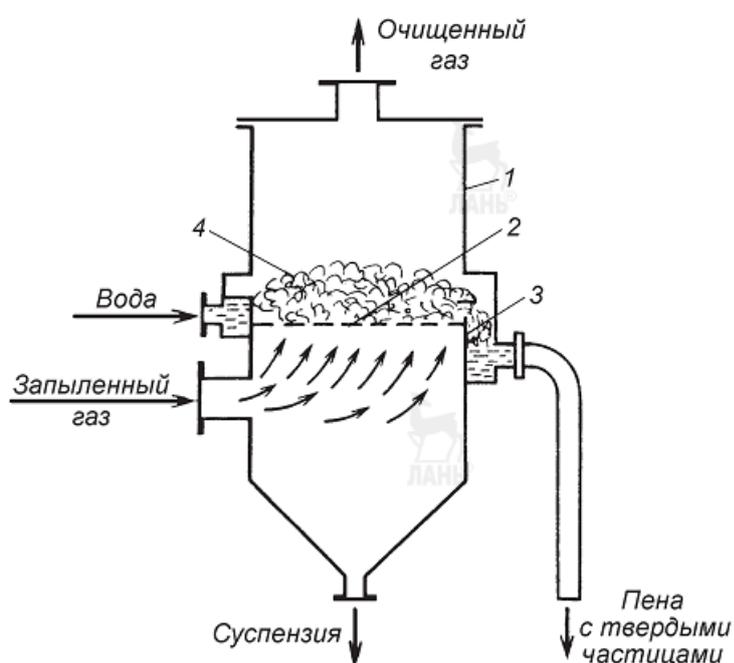


Рисунок 4.7 Схема барботажного (пенного) пылеуловителя:

1 – корпус; 2 – тарелка с перфорацией; 3 – переточный порог; 4 – слой пены на тарелке

Барботажный пылеуловитель представляет собой цилиндрический или прямоугольный корпус 1, внутри которого находится перфорированная тарелка 2. Вода или другая промывная жидкость через штуцер поступает на тарелку, а запыленный газ подается в аппарат через патрубок. Проходя через отверстия тарелки, газ барботирует через жидкость, превращая ее в слой подвижной пены 4.

В слое пены твердые частицы пыли поглощаются жидкостью, основная часть которой (около 80 %) удаляется вместе с пеной через регулируемый переточный порог 3. Оставшаяся часть жидкости сливается через отверстия в тарелке и улавливает в подтарелочном пространстве более крупные частицы. Образующаяся при этом суспензия выводится из нижней части аппарата через сливной штуцер.

Для тонкой очистки газов от высокодисперсной пыли применяют струйные турбулентные газопромыватели – скрубберы Вентури.

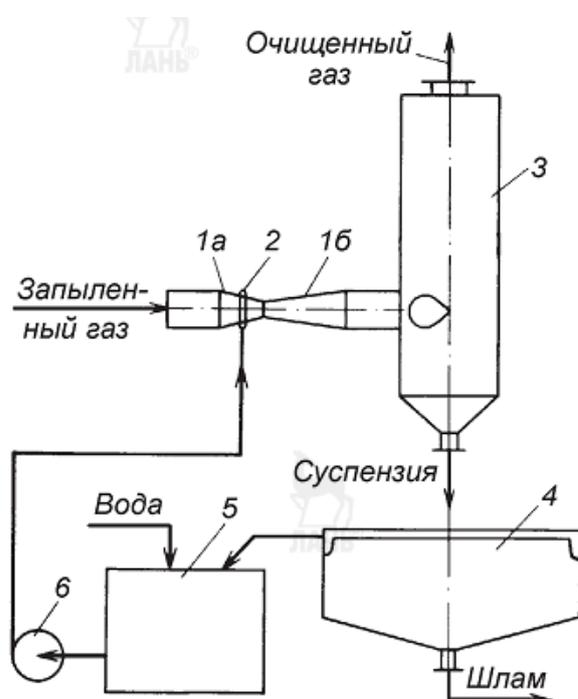


Рисунок 4.8 Схема очистки газа с применением скруббера Вентури: 1 – труба Вентури (1 а – конфузур, 1 б – диффузур); 2 – распределительное устройство для подачи воды; 3 – циклонный сепаратор; 4 – отстойник для суспензии; 5 – промежуточная емкость; 6 – насос

Запыленный газ вводится через конфузур в трубу Вентури 1. Через отверстия в стенке конфузора туда же впрыскивается вода с помощью распределительного устройства 2. В горловине трубы скорость газа достигает порядка 100 м/с. Сталкиваясь с газовым потоком, вода распыляется на мелкие капли. Высокая степень турбулентности газового потока

способствует коагуляции пылинок с каплями жидкости. Относительно крупные капли жидкости вместе с поглощёнными частичками проходят через диффузор трубы Вентури, где их скорость снижается до 20-25 м/с, и попадают в циклонный сепаратор 3. Здесь капли под действием центробежной силы отделяются от газа и в виде суспензии удаляются из нижней конической части.

Осаждение под действием электростатических сил (электрическая очистка). Электрическая очистка основана на ионизации молекул газа электрическим разрядом. Если газ поместить в электрическое поле, образованное двумя электродами, к которым подведен постоянный электрический ток высокого напряжения, то молекулы (атомы) газа ионизируются, т. е. расщепляются на положительно заряженные ионы и электроны, которые начинают перемещаться по направлению силовых линий. При повышении разности потенциалов между электродами до нескольких десятков тысяч вольт кинетическая энергия ионов и электронов возрастает настолько, что они при своем движении, сталкиваясь с нейтральными молекулами газа, будут расщеплять их на положительные ионы и свободные электроны. Вновь образовавшиеся заряды при своем движении также ионизируют газ. В результате образование ионов происходит лавинообразно и газ полностью ионизируется. Такая ионизация называется ударной.

По форме электродов электрофильтры делятся на трубчатые и пластинчатые, а в зависимости от вида удаляемых из газа частиц – на сухие (где улавливается сухая пыль) и мокрые (для удаления влажной пыли).

В сухих электрофильтрах пыль удаляется периодически при помощи различных ударных механизмов встряхивания электродов: молоткового, магнитно-импульсного и пр. В мокрых электрофильтрах осевшие частицы удаляются периодической или непрерывной промывкой внутренней поверхности осадительных электродов водой, распыляемой брызгалами или форсунками. В некоторых случаях промывная жидкость свободно стекает по

внутренней поверхности электродов в виде пленки, на которую оседают взвешенные частицы.

В пластинчатых электрофилтрах легче, чем в трубчатых, удаляется осевшая на электродах пыль и меньше расходуется энергии. Они более компактны, требуют меньшего расхода металла и отличаются простотой монтажа. Вместе с тем трубчатые электрофилтры позволяют получить большую напряженность электрического поля и соответственно допускают большие скорости газа, т.е. более производительны.

ГЛАВА 5 ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

5.1 Общие сведения

Перемешивание в жидких средах широко применяется в химической промышленности для приготовления эмульсий, суспензий и получения гомогенных систем (растворов), а также для интенсификации химических, тепловых и диффузионных процессов.

Цель перемешивания определяется назначением процесса.

Перемешивание применяют в процессах абсорбции, выпаривания, экстрагирования и других процессах химической технологии.

Способы перемешивания и выбор аппаратуры для его проведения определяются целью перемешивания и агрегатным состоянием перемешиваемых материалов. Широкое распространение в химической промышленности получили процессы перемешивания в жидких средах.

Независимо от того, какая среда смешивается с жидкостью – газ, жидкость или твердое сыпучее вещество, – различают два основных способа перемешивания в жидких средах: механический (с помощью мешалок различных конструкций) и пневматический (сжатым воздухом или инертным газом). Кроме того, применяют перемешивание в трубопроводах и перемешивание с помощью сопел и насосов.

Наиболее важными характеристиками перемешивающих устройств являются: 1) эффективность перемешивающего устройства; 2) интенсивность его действия.

Эффективность перемешивающего устройства характеризует качество проведения процесса перемешивания и может быть выражена по-разному в зависимости от цели перемешивания. Например, в процессах получения суспензий эффективность перемешивания характеризуется степенью равномерности распределения твердой фазы в объеме аппарата; при интенсификации тепловых и диффузионных процессов – отношением коэффициентов тепло- или массоотдачи при перемешивании и без него. Эффективность перемешивания зависит не только от конструкции

перемешивающего устройства и аппарата, но и от величины энергии, вводимой в перемешиваемую жидкость.

Интенсивность перемешивания определяется временем достижения заданного технологического результата или числом оборотов мешалки при фиксированной продолжительности процесса. Чем выше интенсивность перемешивания, тем меньше времени требуется для достижения заданного эффекта перемешивания. Интенсификация процессов перемешивания приводит к уменьшению размеров проектируемой аппаратуры и увеличению производительности действующей.

5.2 Механическое перемешивание

Наибольшее распространение в химической промышленности получило перемешивание с введением в перемешиваемую среду механической энергии из внешнего источника. Механическое перемешивание осуществляется с помощью мешалок, которым сообщается вращательное движение либо непосредственно от электродвигателя, либо через редуктор. Чаще всего применяют мешалки: лопастные, пропеллерные, турбинные, рамные, шнековые, ленточные.

Лопастные мешалки состоят из цилиндрической втулки, к которой приварены плоские лопасти. Ширина лопастей мешалки $b = 0,2 d_m$. Могут быть неразъемными и разъемными. Основные достоинства лопастных мешалок – простота устройства и невысокая стоимость изготовления. К недостаткам мешалок этого типа следует отнести низкое насосное действие мешалки (слабый осевой поток), не обеспечивающее достаточно полного перемешивания во всем объеме аппарата, перемешивают только те слои жидкости, которые находятся в непосредственной близости от лопастей мешалки. Поэтому их применяют для перемешивания жидкостей с низкой и повышенной вязкостью (до 5 Па·с). Эти мешалки непригодны для перемешивания в протоке, например в аппаратах непрерывного действия.

Пропеллерные (винтовые) мешалки представляют собой втулку, на которую приварены под углом 120° одна к другой три лопасти (плоские или

со сложной пространственной крыловидной формой), литые или штампованные.

Пропеллерные мешалки создают преимущественно осевые потоки перемешиваемой среды и большой насосный эффект, что позволяет существенно сократить продолжительность перемешивания. Вместе с тем пропеллерные мешалки отличаются сложностью конструкции и сравнительно высокой стоимостью изготовления. Их эффективность сильно зависит от формы аппарата и расположения в нем мешалки. Пропеллерные мешалки следует применять в цилиндрических аппаратах с выпуклыми днищами. При установке их в прямоугольных баках или аппаратах с плоскими или вогнутыми днищами интенсивность перемешивания падает вследствие образования застойных зон.

Для пропеллерных мешалок принимают следующие соотношения основных размеров: диаметр мешалки $d = (0,2-0,5) D$, шаг винта $s = (1,0-3,0) D$, расстояние от мешалки до дна сосуда $h = (0,5-1,0) d$, высота уровня жидкости в сосуде $H = (0,8-1,2) D$. Число оборотов пропеллерных мешалок достигает 40 в секунду, окружная скорость – 15 м/сек.

Турбинные мешалки имеют форму колес водяных турбин с плоскими, наклонными или криволинейными лопатками, укрепленными на вертикальном валу. В аппаратах с турбинными мешалками создаются преимущественно радиальные потоки жидкости. При работе турбинных мешалок с большим числом оборотов наряду с радиальным потоком возможно возникновение тангенциального (кругового) течения содержимого аппарата и образование воронки. Закрытые турбинные мешалки в отличие от открытых создают более четко выраженный радиальный поток. Закрытые мешалки имеют два диска с отверстиями в центре для прохода жидкости; диски сверху и снизу привариваются к плоским лопастям. Жидкость поступает в мешалку параллельно оси вала, выбрасывается мешалкой в радиальном направлении и достигает наиболее удаленных точек аппарата.

Турбинные мешалки обеспечивают интенсивное перемешивание во всем объеме аппарата.

При больших значениях отношения высоты к диаметру аппарата применяют многорядные турбинные мешалки. Мешалки этого типа могут применяться для смесей, вязкость которых во время перемешивания изменяется. Турбинные мешалки широко применяют для образования взвесей (размер частиц для закрытых мешалок может достигать 25 мм), растворения, при проведении химической реакции, абсорбции газов и интенсификации теплообмена.

В зависимости от области применения турбинные мешалки обычно имеют диаметр $d = (0,15-0,65) D$ при отношении высоты уровня жидкости к диаметру аппарата не более двух. При больших значениях этого отношения используют многорядные мешалки. Число оборотов мешалки колеблется в пределах 2-5 в секунду, а окружная скорость составляет 3-8 м/сек.

Мешалки шнекового, якорного, рамного и ленточного типов и их модификации используются, как правило, для перемешивания систем с вязкостью, превышающей 50-100 Па·с.

Все мешалки условно делят на тихоходные и быстроходные. Быстроходными принято считать те мешалки, у которых окружная скорость концов лопастей достигает порядка 10 м/с (лопастные, пропеллерные, турбинные); они работают при турбулентном режиме и в переходной области. У тихоходных мешалок окружная скорость порядка 1 м/с; они работают при ламинарном режиме. К тихоходным относятся якорные, рамные и др.

5.3 Пневматическое перемешивание

Пневматическое перемешивание сжатым или инертным газом или воздухом используют, когда перемешиваемая жидкость отличается большой химической активностью и быстро разрушает механические мешалки. Перемешивание сжатым газом является малоинтенсивным процессом. Расход энергии при пневматическом перемешивании больше, чем при

механическом. Пневматическое перемешивание не применяют для обработки летучих продуктов в связи со значительными потерями перемешиваемого продукта. Перемешивание воздухом может сопровождаться окислением или осмолением веществ.

Перемешивание сжатым газом проводят в аппаратах, снабженных специальными устройствами – барботером или центральной циркуляционной трубой. Барботер представляет собой расположенную по дну аппарата трубу с отверстиями, свернутую в кольцо или спираль, по которой пропускается сжатый воздух. Пузырьки сжатого воздуха, равномерно поднимаясь вверх через слой жидкости, перемешивают ее.

При циркуляционном (эрлифтным) перемешивании газ подают в циркуляционную трубу. Пузырьки газа увлекают за собой вверх по трубе жидкость, находящуюся в сосуде, которая затем опускается вниз в кольцевом пространстве между трубой и стенками аппарата, обеспечивая циркуляционное перемешивание жидкости.

Перемешивание в трубопроводах является простейшим способом перемешивания жидкостей, применяемым при транспортировании их по трубопроводам. Перемешивание в трубопроводе происходит под действием турбулентных пульсаций. Поэтому такой способ перемешивания можно использовать при условии, что течение турбулентно и трубопровод имеет длину, достаточную для обеспечения заданного среднего времени пребывания жидкости в трубопроводе. Часто для улучшения перемешивания в трубопровод помещают специальные вставки, винтовые насадки или инжекторы.

Гужель Юлия Александровна,

доцент кафедры «Химия и химическая технология» АмГУ, канд. техн. наук

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие. Часть первая. Гидромеханические процессы и аппараты

Изд-во АмГУ. Подписано к печати ____.____.2019.

Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 5.3

Тираж 50. Заказ