

Лекция 5 «Процессы нагревания. Нагревание острым и глухим паром. Нагревание дымовыми газами, промежуточными теплоносителями и электрическим током. Теплообменные аппараты»

Цель: Охарактеризуйте процессы нагревания. Опишите нагревание острым и глухим паром. Сравните нагревание дымовыми газами и нагревание электрическим током. Опишите нагревание промежуточными теплоносителями. Охарактеризуйте теплообменные процессы.

Краткий конспект лекции: Процессы нагревания. Нагревание применяется для ускорения тепло- и массообменных процессов и химических превращений. В химической технике наиболее распространены следующие методы нагревания: водяным паром, топочными газами, промежуточными теплоносителями, электрическим током.

Вещества, участвующие в процессе передачи тепла, называются *теплоносителями*. Теплоносители, имеющие более высокую температуру, чем нагреваемая среда, и отдающие тепло, называют *нагревающими агентами*.

В качестве прямых источников тепла в химической технологии используют топочные газы, представляющие собой газообразные продукты сгорания топлива, и электрическую энергию. Вещества, получающие тепло от этих источников и отдающие его через стенку теплообменника нагреваемой среде, носят название *промежуточных теплоносителей*. К числу распространённых промежуточных теплоносителей относятся водяной пар и горячая вода, а также высокотемпературные теплоносители – перегретая вода, минеральные масла, органические жидкости (и их пары), расплавленные соли, жидкие металлы и их сплавы.

Выбор теплоносителя зависит в первую очередь от требуемой температуры нагрева. Промышленный теплоноситель должен обеспечивать достаточно высокую интенсивность теплообмена при небольших массовых и объёмных его расходах. Соответственно он должен обладать малой вязкостью, но высокими плотностью, теплоёмкостью и теплотой парообразования.

В химической технике наиболее распространены следующие методы нагревания: водяным паром, топочными газами, промежуточными теплоносителями, электрическим током.

Нагревание “острым” паром

Одним из наиболее широко применяемых греющих агентов является насыщенный водяной пар. Водяной пар применяют для нагревания до температуры 150-170 °С. При этом давление насыщенного пара не превышает 10 ат.

Водяной пар как нагревающий агент обладает рядом ценных свойств:

1) Конденсируясь в процессе нагревания, пар выделяет большое количество теплоты. Теплота конденсации пара составляет $\approx 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг (540 ккал/кг) при $P = 9,8 \cdot 10^4$ Н/м² (1 ат).

2) Высокий коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к греющей стенке.

3) Постоянство температуры его конденсации, что даёт возможность точно поддерживать температуру нагрева.

Основной недостаток водяного пара – значительное возрастание давления с повышением температуры.

Острый пар вводят непосредственно в нагреваемую жидкость, в которой он конденсируется, отдавая теплоту конденсации нагреваемой жидкости, причём конденсат смешивается с жидкостью.

Обогрев «острым» паром непригоден, если недопустимо смешивание конденсата с нагреваемой жидкостью или её разбавление.

Расход острого пара определяют:

$$DI_n + Gct_1 = Dc_8t_2 + Gct_2 + Q_n \quad (1)$$

откуда расход пара

$$D = \frac{Gc(t_2 - t_1) + Q_n}{I_n - c_8t_2}, \quad (2)$$

где D – расход острого пара, кг/с; G – расход нагреваемой среды, кг/с; c – средняя удельная теплоемкость нагреваемой среды, Дж/(кг·К); t_1 и t_2 – начальная и конечная температуры нагреваемой среды, К; Q_n – потери тепла в окружающую среду, Дж/с; I_n – энтальпия греющего пара, Дж/кг; c_8 – теплоёмкость конденсата, Дж/(кг·К).

Нагревание “глухим” паром

При нагревании глухим паром тепло передаётся жидкости через разделяющую их стенку. Пар, соприкасаясь с более холодной стенкой, конденсируется на ней, и плёнка конденсата стекает по поверхности стенки. Для того, чтобы облегчить удаление конденсата, пар вводят в верхнюю часть аппарата, а конденсат отводят из его нижней части.

Расход D глухого пара при непрерывном нагревании определяют из уравнения теплового баланса:

$$D = \frac{Gc(t_2 - t_1) + Q_n}{I_n - I_k}, \quad (3)$$

где I_k – энтальпия конденсата, Дж/кг.

Нагревание дымовыми газами

При нагревании дымовыми газами можно достичь температуры 1000°C и выше. Однако, для обогрева дымовыми газами характерны следующие существенные недостатки:

1. Низкий коэффициент теплоотдачи от газов к стенкам обогреваемых аппаратов ($\alpha = 15-30$ ккал/м²·час·град).

2. Малая объёмная удельная теплоёмкость газов ($C_v = 3,6$ ккал/м³·град), что вызывает необходимость пропускания значительных объёмов газа.

3. Неравномерность обогрева вследствие охлаждения газов при отдаче ими теплоты.

4. Вследствие высоких температур топочных газов и трудности их регулирования возможны перегревы нагреваемых продуктов.

5. Загрязнение продукта при передаче теплоты при непосредственном соприкосновении.

6. Нагревание дымовыми газами легколетучих и легковоспламеняющихся материалов опасно.

Дымовые газы образуются при сжигании твёрдого, жидкого или газообразного топлива в топках или печах различной конструкции [2,3].

Нагревание промежуточными теплоносителями

Для большинства химических процессов, протекающих при высокой температуре, требуется проводить равномерный обогрев аппаратуры. В этом случае применяют промежуточные теплоносители (различные жидкости или пары, циркулирующие в системе, воспринимающие теплоту от дымовых газов или электрического тока) и передающие её к стенке аппарата.

Циркуляция промежуточных теплоносителей в системе может быть естественной или принудительной. Естественная циркуляция происходит за счёт разности плотностей. Скорость циркуляции при этом составляет 0,2 м/с. Для обеспечения циркуляции теплообменник должен быть расположен выше печи на 4-5 м.

В силу малой скорости циркуляции коэффициент теплопередачи очень низкий. Принудительная циркуляция осуществляется с помощью насоса. В качестве промежуточных теплоносителей применяются минеральные масла, перегретая вода, органические теплоносители, расплавленные соли, ртуть и др. Перегретая вода под давлением, близким к критическому (225 ат), применяется для нагревания до 300-350°C по циркуляционному способу.

Обогрев маслом производят только в том случае, когда нельзя применить другие, более рациональные способы нагревания 250°C. К группе высокотемпературных органических теплоносителей относятся: глицерин, этиленгликоль, нафталин и его замещённые, а также некоторые производные ароматических углеводородов (дифенил, дифениловый эфир, дифенилметан).

Наибольшее промышленное применение получила дифенильная смесь, состоящая из 26,5% дифенила и 73,5% дифенилового эфира. Нагревание ее парами применяется при температуре 260-380 °С. При этом абсолютное давление паров доходит до 8-10 ат.

Нагревание электрическим током

Нагревание электрическим током производят в электрических печах. В зависимости от способа превращения электрической энергии в тепловую различают электрические печи сопротивления, дуговые и индукционные.

В электропечах сопротивления можно получить температуру 1000-1100°C при равномерном нагреве объёма. Нагревательные элементы выполняют, главным образом, из проволоки или ленты нихрома – сплава никеля, хрома и железа. Пропуская ток через металлическую проволоку, электроэнергия трансформируется в тепловую. При этом выделяется теплота:

$$Q = 860W\tau, \text{ [ккал]} \quad (4)$$

где 860 – количество теплоты в *ккал*, эквивалентное электрической мощности в 1 *кВт·ч*; *W* – мощность нагревателя (*кВт*), равная произведению силы тока *I* (*А*) на напряжение *U* (*В*); τ – время, ч.

Дуговые печи дают возможность получить температуру до 2000 °С и выше [3].

Мощность находят

$$P = U \cdot I, [\text{Ватт}] \quad (5)$$

где U – напряжение, вольт; I – сила тока, ампер.

Дуговые печи дают возможность получить температуру до 2000°C и выше.

Теплообменные аппараты

Устройства, предназначенные для передачи теплоты от одних тел к другим, называют теплообменными аппаратами. Тела, отдающие или воспринимающие теплоту, принято называть теплоносителями. В зависимости от назначения теплообменные аппараты называются подогревателями, конденсаторами, испарителями, парообразователями и другие. По способам передачи тепла различают две основные группы теплообменников: поверхностные и смесительные. В поверхностных теплообменниках перенос тепла между обменивающимися телом средами происходит через разделяющую их поверхность теплообмена – глухую стенку.

В свою очередь поверхностные теплообменные аппараты делятся на *рекуперативные* и *регенеративные*.

Если теплообмен между различными теплоносителями происходит через разделительные стенки, то теплообменник называют рекуперативным.

В регенеративных теплообменниках нагрев жидких сред происходит за счёт их соприкосновения с ранее нагретыми телами – насадкой, заполняющей аппарат, периодически нагреваемой другим теплоносителем.

В смесительных аппаратах передача тепла происходит при его непосредственном соприкосновении и смешении теплоносителей.

Поверхностные теплообменники

Аппарат с рубашечной поверхностью теплообмена. В аппаратах с рубашками между корпусом и окружающим его кожухом – рубашкой образуется замкнутое пространство. При нагреве сверху вводится греющий теплоноситель, при охлаждении холодный теплоноситель подаётся снизу (рис. 1). Применение таких аппаратов ограничено небольшой поверхностью теплообмена (до 10 м^2) и избыточным давлением в рубашке (до 10 атм).

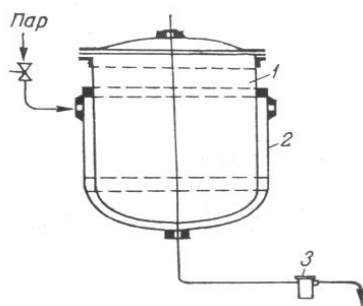


Рис. 1. Аппарат с рубашкой: 1 – корпус аппарата; 2 – рубашка; 3 – конденсационный горшок

Змеевиковые теплообменные аппараты. Теплообменный элемент – змеевик, представляет собой трубу, согнутую каким-либо образом. Змеевики устанавливаются в холодильниках, конденсаторах, выпарных аппаратах, перегонных устройствах. Скорость теплоносителей в таких аппаратах несколько ниже, чем в прямых трубах (до 1 м/с), однако коэффициент теплоотдачи змеевиков несколько выше, чем прямых труб.

Кожухотрубные теплообменники. Эти аппараты наиболее распространённый в химической технике тип теплообменной аппаратуры. Кожухотрубные теплообменники представляют собой аппараты, выполненные из пучков труб, собранных при помощи трубных решёток и ограниченные кожухами и крышками со штуцерами (рис. 2, 3).

Трубное и межтрубное пространство в аппарате разобщены, и каждое из этих пространств может быть разделено при помощи перегородок на несколько ходов. Перегородки устанавливаются с целью увеличения скорости, и следовательно, и коэффициента теплообмена теплоносителей. Кожухотрубные теплообменники применяются тогда, когда требуется большая поверхность теплообмена. В большинстве случаев пар (греющий теплоноситель) вводится в межтрубное пространство, а нагреваемая жидкость протекает по трубам.

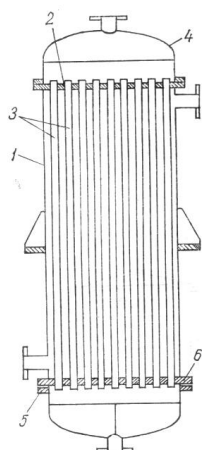


Рис. 2. Кожухотрубный одноходовой теплообменник: 1 – кожух; 2 – трубная решетка; 3 – трубки; 4 – камера (выходная, входная); 5 – фланец; 6 – штуцер

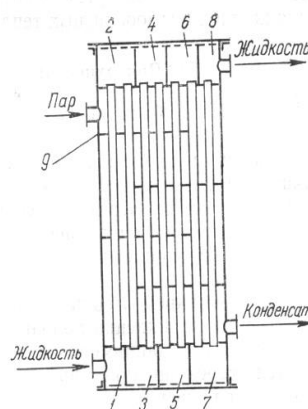


Рис. 3. Многоходовый кожухотрубный теплообменник: 1, 3, 5, 7 – отсеки нижней камеры; 2, 4, 6, 8 – отсеки верхней камеры; 9 – поперечные перегородки

Теплообменники “труба в трубе”. Теплообменники этого типа представляют собой батарею из нескольких теплообменных элементов, расположенных один под другим. Каждый из элементов состоит из внутренней трубы и охватывающей её наружной трубы (рис. 4).

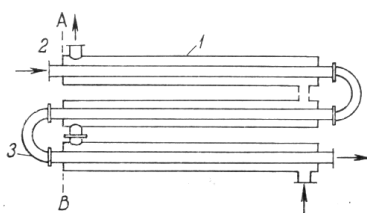


Рис. 4. Теплообменник труба в трубе: 1 – наружная труба; 2 – внутренняя труба; 3 – калач

Теплообмен между теплоносителями осуществляется через стенки внутренних труб. В двухтрубчатых теплообменниках обеспечиваются высокая скорость теплоносителей и высокая интенсивность теплообмена. Однако эти теплообменники громоздки и металлоёмки.

Оросительные теплообменники применяют, главным образом, для охлаждения жидкостей и газов или конденсации паров. Оросительный теплообменник состоит из ряда расположенных одна над другой труб (рис. 5).

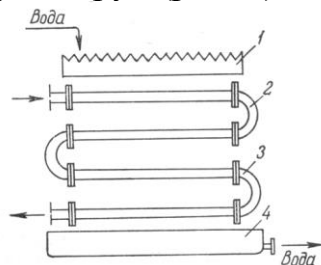


Рис. 5. Оросительный теплообменник:
1 – желоб; 2 – калач; 3 – труба; 4 – поддон

Снаружи трубы орошаются водой. По трубам протекает охлаждаемый теплоноситель. Орошающая вода подаётся на верхнюю трубу, с которой стекает на расположенные ниже трубы. Для равномерного орошения верхней трубы на ней установлен желоб с зубчатыми краями. В нижней части имеется корыто для сбора воды. Теплообменники этого типа применяются, когда температура охлаждаемой жидкости выше 100 °С [1-3].

Смесительные теплообменные аппараты

В смесительных теплообменных аппаратах передача тепла от одного теплоносителя к другому происходит при их непосредственном соприкосновении и смешении. Такие аппараты применяют преимущественно для конденсации паров и охлаждения газов водой, а также для охлаждения воды воздухом.

Смесительные теплообменные аппараты, в которых осуществляется конденсация каких-либо паров холодной жидкостью, называют конденсаторами смешения.

По способу вывода потоков из аппаратов различают мокрые и сухие конденсаторы смешения. В мокрых конденсаторах охлаждающая вода, образующийся конденсат и неконденсирующиеся газы откачиваются из аппарата мокровоздушным насосом совместно.

В сухих конденсаторах охлаждающая вода и конденсат выводятся из нижней части аппарата самотёком по одной трубе, а неконденсирующиеся газы откачиваются вакуум-насосом из верхней части аппарата по другой трубе.

Смесительные аппараты могут быть прямоточными и противоточными в зависимости от взаимного направления движения воды и паров.

При противотоке разность температур конденсирующего пара и уходящей воды равна 1-3 °С, а при прямотоке 5-6 °С, и следовательно, расход воды в прямоточных конденсаторах будет большим.

Основным фактором, определяющим работу смесительных аппаратов, является поверхность соприкосновения теплоносителей, которая должна быть по возможности

большой. Поэтому в смесительных аппаратах поверхность соприкосновения увеличивают: устраивают полки, распыливают жидкость, помещают насадки.

Расход охлаждающей воды определяется из уравнения теплового баланса:

$$GI_{\text{п}} + Wc_{\text{в}}t_{2\text{н}} = (G + Wc_{\text{в}})t_{2\text{к}}, \quad (6)$$

где G – количество конденсируемого пара, кг/с; $I_{\text{п}}$ – энтальпия поступающего пара, Дж/кг; $c_{\text{в}}$ – удельная теплоёмкость воды, Дж/(кг·К); $t_{2\text{н}}$ и $t_{2\text{к}}$ – начальная и конечная температуры охлаждающей воды.

Как следует из уравнения (6)

$$W = G \frac{I_{\text{п}} - c_{\text{в}}t_{2\text{к}}}{c_{\text{в}}(t_{2\text{к}} - t_{2\text{н}})} \quad (7)$$

Количество отсасываемого воздуха (в кг/с) определяется по эмпирической формуле

$$G_{\text{воз}} = 0,001(0,025W + 10G), \quad (8)$$

где W – расход охлаждаемой воды, кг/с; G – количество конденсируемого пара, кг/с.

Объём отсасываемого воздуха вычисляется

$$V_{\text{воз}} = \frac{288G_{\text{воз}}(273 + t_{\text{в}})}{p_{\text{воз}}}, \quad (9)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С; $p_{\text{воз}}$ – парциальное давление воздуха, Н/м²; 288 – газовая постоянная для воздуха, Дж/(кг·К) [2-3].

Вопросы для самоконтроля:

1. Охарактеризуйте процессы нагревания.
2. Опишите нагревание острым и глухим паром.
3. Сравните нагревание дымовыми газами и нагревание электрическим током.
4. Опишите нагревание промежуточными теплоносителями.
5. Охарактеризуйте теплообменные процессы.

Литература

1. Лекции по курсу «Основные процессы и аппараты химической технологии»: учебно-методическое пособие / составители: Ж.Т. Ешова, Д.Н. Акбаева. – Алматы: Қазак университеті, 2017. – 392 с. – 40 экз.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчёта процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с.