

### Лекция 3 «Теплоотдача при кипении и конденсации. Лучистый теплообмен»

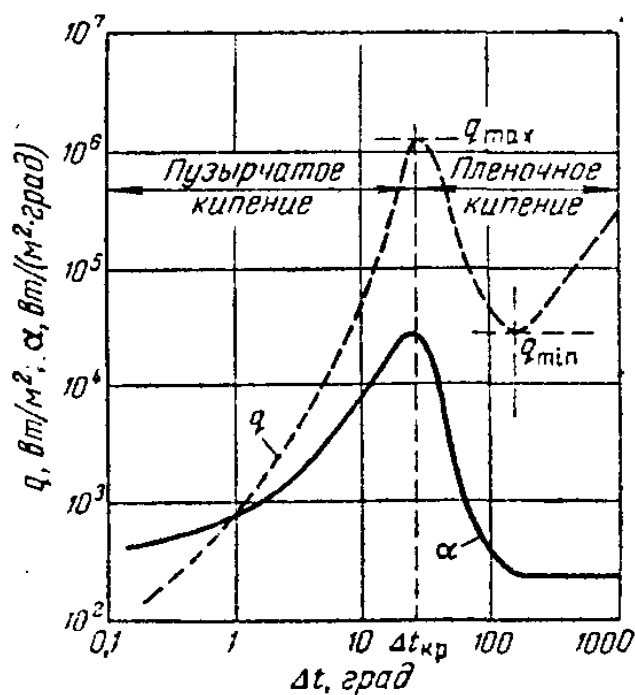
**Цель:** Опишите теплоотдачу при кипении и конденсации. Охарактеризуйте лучистый теплообмен.

**Краткий конспект лекции:** Кипение – это интенсивный процесс парообразования, происходящий по всему объёму жидкости, когда давление насыщенного пара кипящей жидкости равно внешнему давлению. Процесс кипения широко используется в технике (например, в энергетике) и в химической технологии при упаривании растворов в выпарных аппаратах, при разделении жидких смесей перегонкой и ректификацией, при испарении хладагентов.

Обязательным условием кипения жидкости является непрерывный подвод теплоты, необходимый для процесса парообразования. Обычно теплота подводится от греющей поверхности, контактирующей с кипящей жидкостью, при этом температура греющей поверхности должна превышать температуру кипящей жидкости ( $t_{ст} > t_{кип}$ ).

Очаги образования мелких пузырьков (мельчайшие бугорки на твёрдой поверхности, частицы загрязнений) носят название *центров парообразования*. Интенсивность образования пузырьков возрастает до некоторого предела с увеличением разности температур между стенкой и кипящей жидкостью ( $\Delta t = t_{ст} - t_{кип}$ ). С возрастанием  $\Delta t$  увеличивается *плотность теплового потока*  $q$ , т.е. количество тепла, передаваемого жидкости в единицу времени единицей поверхности стенки. Возникающее при этом перемешивание жидкости, обусловленное ростом, отрывом и всплыванием пузырьков, приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  (рис. 1).

Этой области на рис. 1 соответствует режим *пузырчатого* или *ядерного* кипения, характеризуемый относительно высокой интенсивностью теплоотдачи.



**Рис. 1.** Зависимость  $\alpha$  и  $q$  от  $\Delta t$  для кипящей воды при  $p = 1 \text{ атм}$

При дальнейшем возрастании  $\Delta t = \Delta t_{кр}$  число центров парообразования возрастает настолько, что происходит слияние пузырьков пара и поверхность нагрева покрывается плохо проводящей тепло плёнкой перегретого пара. Несмотря на то, что эта плёнка не стабильна, её образование приводит к значительному уменьшению величины  $\alpha$ . Соответствующий режим, при котором происходит переход от пузырькового режима кипения к плёночному называют кризисом кипения, и он изображён правой нисходящей ветвью  $\alpha = f(\Delta t)$  на рис. 2.6 носит название *плёночного* кипения.

Значение коэффициента теплоотдачи при переходе к плёночному режиму кипения уменьшается в 20-40 раз, что может приводить к нежелательному перегреву теплообменной поверхности.

Плёночный режим кипения всегда нежелателен, и в промышленности стараются организовать процесс кипения в области развитого пузырькового режима высокой интенсивности, но без опасности перехода к режиму плёночному.

Физические параметры жидкой и паровой фаз в расчётных формулах для теплообмена при кипении берутся при температуре кипения (насыщения), поэтому эти расчетные соотношения часто оказывается возможным представить в простом виде, но с коэффициентами, зависящими от природы кипящей жидкости:

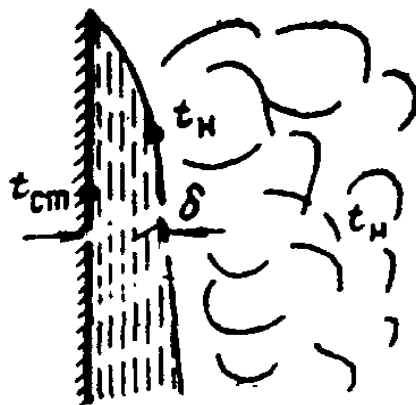
$$\alpha = AP^m q^n \quad (1)$$

Для воды и большинства иных жидкостей  $m \approx 0,4$  и  $n \approx 0,7$ ; значения коэффициента  $A$  для различных жидкостей приводятся в справочной литературе.

Чтобы кипение не перешло из интенсивного пузырькового режима в плёночный, необходимо оценивать критические значения теплового потока  $q_{кр}$  и разности  $\Delta t_{кр}$ . Эксперименты показывают, что для многих жидкостей  $q_{кр}$  лежит в пределах значений 100 – 350 кВт/м<sup>2</sup>, а  $\Delta t_{кр} \approx 20 - 25$  К. Для воды  $\Delta t_{кр} = 25$  К,  $\alpha_{кр} \approx 45 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и  $q_{кр} \approx 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

**Конденсация паров.** В химической аппаратуре теплоотдача от конденсирующегося пара осуществляется, как правило, в условиях плёночной конденсации. При плёночной конденсации термическое сопротивление практически полностью сосредоточено в плёнке конденсата, температура которой со стороны стенки принимается равной температуре стенки  $t_{ст}$ , а со стороны пара – температуре насыщения  $t_n$  пара (рис. 2). По сравнению с термическим сопротивлением плёнки соответствующее сопротивление паровой фазы пренебрежимо мало.

Режим течения плёнки является функцией критерия Рейнольдса: с увеличением толщины плёнки ламинарное течение плёнки, имеющей гладкую поверхность, переходит в волновое, а затем становится турбулентным. Кроме физических свойств конденсата (плотности, вязкости, теплопроводности) на теплоотдачу влияет шероховатость стенки, её положение в пространстве и размеры стенки; в частности, с увеличением шероховатости поверхности и высоты вертикальной стенки плёнка конденсата утолщается книзу (рис. 2).



**Рис. 2.** Распределение температур в плёнке конденсата

Обобщённое уравнение для определения коэффициента теплоотдачи от конденсирующихся паров имеет вид

$$Nu = f(Ga, Pr, K) \quad (2)$$

Эту функцию на основе обработки опытных данных можно представить уравнением

$$Nu = C(Ga \cdot Pr \cdot K)^{0,25} \quad (3)$$

где  $K = \frac{r}{c_{ж}\Delta t}$  – критерий, характеризующий изменение агрегатного состояния, или *критерий конденсации* ( $r$  – теплота конденсации;  $c_{ж}$  – теплоёмкость конденсата;  $\Delta t = t_{нас} - t_{ст}$ ).

Входящие в (2.75) критерии  $Ga$  и  $Pr$  отнесены к плёнке конденсата. Выражение для критерия конденсации  $K$  находят путём преобразования дифференциального уравнения, характеризующего граничные условия. Критерий  $K$  следует рассматривать как меру отношения теплового потока, затрачиваемого на фазовое превращение к теплоте перегрева или переохлаждения фазы при температуре её насыщения.

При плёночной конденсации переменной, ламинарирующей теплоотдачу, является толщина пленки конденсата. Скорость же пара обычно не достигает значения, достаточного для срыва пленки, и в условия однозначности не входит. Обобщённое уравнение для плёночной конденсации вместо критериев  $Re$  и  $Fr$  включает производный критерий  $Ga = Re^2 / Fr = gl / v^2$ , который отражает подобие сил тяжести, действующих на более тяжёлую фазу в двухфазном потоке пар – конденсат.

Коэффициенты теплоотдачи при плёночной конденсации водяного пара изменяются в пределах  $(7-12) \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). При капельной конденсации они значительно выше, но устойчивой капельной конденсации в промышленной теплообменной аппаратуре реализовать не удается.

**Конденсация паро-газовых смесей.** При наличии в паре даже небольших примесей воздуха или других неконденсирующихся газов величина  $\alpha$  для конденсирующегося пара резко снижается. Неконденсирующиеся газа постепенно накапливаются в паровом

пространстве; при этом их парциальное давление повышается и, соответственно, парциальное давление пара падает. Кроме того, ухудшается омывание стенки паром и снижается  $\Delta t = t_{\text{нас}} - t_{\text{ст}}$ .

Коэффициент теплоотдачи в этом случае зависит от интенсивности взаимосвязанных процессов массо- и теплообмена, которые определяются составом паро-газовой смеси, характером её течения, физическими свойствами компонентов смеси, давлением, температурой, формой и размерами конденсации [1-2].

### Тепловое излучение

Тепловое излучение – результат внутриатомных процессов. Интенсивность теплового излучения возрастает с повышением температуры тела. Лучистая энергия распространяется в виде потока частиц, называемых квантами или фотонами, и обладает свойствами электромагнитных волн. Лучистый теплообмен – это излучение электромагнитных волн одним телом и поглощение излучения другим телом.

Тепловое и световое излучения имеют одинаковую природу, только различаются по длине волны. Длина волны световых лучей 0,4-0,8 мкм, инфракрасных лучей 0,8-400 мкм. Все тела не только излучают, но и непрерывно также поглощают лучистую энергию. При одинаковой температуре вся система тел находится в подвижном тепловом равновесии.

Количество энергии, излучаемое телом в единицу времени во всем интервале длин волн (от  $\lambda = 0$  до  $\lambda = \infty$ ) единицей поверхности  $F$  тела, характеризует *лучеиспускательную способность  $E$  тела*:

$$E = \frac{Q}{F\tau} \quad (4)$$

где  $Q$  – энергия, излучаемая телом.

Из общего количества энергии  $Q_0$ , падающей на тело, часть её поглощается  $Q_A$ , часть отражается  $Q_R$  и часть проходит сквозь тела  $Q_D$ . Тогда баланс энергии составит:

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q_0 \quad (5)$$

При делении равенства на  $Q_0$  получим:

$$Q_A/Q_0 + Q_R/Q_0 + Q_D/Q_0 = 1, \quad (6)$$

где  $\frac{Q_A}{Q_0} = A$  – характеризует поглотительную способность тела;

$\frac{Q_R}{Q_0} = R$  – характеризует отражательную способность тела;

$\frac{Q_D}{Q_0} = D$  – характеризует пропускную способность тела.

Следовательно, равенство (6) можно представить как

$$A + R + D = 1 \quad (7)$$

Если тело поглощает всю падающую на него энергию,  $A = 1$ , а  $R = D = 0$ , такое тело называется абсолютно чёрным. В природе абсолютно чёрных тел не существует.

Наибольшей поглотительной способностью обладает нефтяная сажа, для которой  $A = 0,9-0,96$ .

Если  $R = 1$ , то  $A = D = 0$ . Это означает, что вся энергия, падающая на тело, отражается. Такое тело называется абсолютно белым или зеркальным. Для полированных металлов  $R$  достигает  $0,06-0,88$ .

Если тело пропускает всю падающую на него энергию, такое тело называется абсолютно прозрачным или диатермичным.  $D = 1$ , а  $A = R = 0$ . Примером такого тела может служить чистый воздух.

Величины  $A, R, D$  зависят от физических свойств тела, состояния их поверхности, температуры и длины волны падающего излучения.

*Кирхгоф установил*, что отношение лучеиспускательной способности любого тела к его лучепоглощательной способности при той же температуре является величиной постоянной, равной лучеиспускательной способности абсолютно чёрного тела:

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \frac{E_0}{A_0} = f(t) \quad (8)$$

где  $A_0$  – относится к абсолютно чёрному телу,  $A_0 = 1$ .

Отношение излучательной способности любого тела к излучательной способности абсолютно чёрного называется степенью черноты:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} \quad (9)$$

Степень черноты  $\varepsilon$  изменяется в пределах  $0-1$  и зависит от природы тела, состояния его поверхности и температуры.

*По закону Стефана-Больцмана* лучеиспускательная способность абсолютно чёрного тела  $E_0$  пропорциональна четвёртой степени абсолютной температуры его поверхности

$$E_0 = K_0 T^4, \quad (10)$$

где  $K_0 = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – константа лучеиспускания абсолютно чёрного тела.

Для упрощения расчётов уравнение Стефана-Больцмана применяется в виде:

$$E_0 = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (11)$$

где  $C_0 = K_0 \cdot 10^8 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коэффициент лучеиспускания абсолютно чёрного тела.

**Излучение газов** существенно отличается от излучения твёрдых тел. Газы излучают и поглощают энергию не во всём диапазоне волн, как это характерно для твёрдых тел, а лишь в определённых интервалах волн, в так называемых полосах, и вне этих полос они прозрачны. Газы излучают и поглощают всем объёмом, а твёрдые тела – только поверхностью.

### Вопросы для самоконтроля:

1. Опишите теплоотдачу при кипении и конденсации.

2. Охарактеризуйте лучистый теплообмен.

### **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.