

## Лекция 21. Описание процесса кипения жидкости

### Режимы кипения. Кривая кипения

*Кипением* называется процесс образования пара внутри объема жидкости, т. е. переход вещества из жидкого (или твердого) состояния в газообразное. Парообразование из твердого состояния называется сублимацией. Для возникновения кипения всегда необходим некоторый перегрев жидкости, т. е. превышение температуры жидкости  $t_f$  относительно температуры насыщения  $t_{\text{нас}}$  при заданном давлении  $P$ .

Теплообмен при кипении воды является важнейшим процессом, протекающим в парогенераторах (котлах), различных испарителях и атомных реакторах, и по своей физической сущности отличается большой сложностью.

На практике при исследовании процесса переноса теплоты от поверхности нагрева твердого тела к кипящей жидкости возможны два режима кипения жидкости – пузырьковое и пленочное.

**Пузырьковое кипение.** Если температура поверхности нагрева  $t_w$  больше температуры насыщения жидкости  $t_{\text{нас}}$ , то при некотором перепаде температур  $\Delta t = t_w - t_{\text{нас}}$  будут возникать паровые пузырьки на поверхности нагрева. Дополнительным условием возникновения процесса кипения с поверхности является *наличие* в жидкости *центров парообразования*, которыми являются взвешенные частички и неровности, микротрещины поверхности нагрева, а также адсорбированные на поверхности нагрева газы. Пузырьковым кипением называют такое, при котором пар образуется в виде периодически зарождающихся и растущих пузырей.

В общем случае паровые пузырьки могут возникать как на поверхности нагрева, так и в объеме жидкости.

Паровые пузырьки в объеме жидкости возникают в том случае, когда температура жидкости значительно превышает  $t_{\text{нас}}$  при данном давлении. Такие условия могут возникнуть, например, при очень быстром уменьшении давления, под которым находится жидкость.

**Пленочное кипение.** Пленочным называют такое кипение, при котором на поверхности нагрева образуется сплошная пленка пара, периодически прорывающегося в объем жидкости.

Отрывным диаметром пузырька пара  $D_0$  называют диаметр сферы, объем которой равен объему парового пузыря непосредственно после его отрыва от поверхности нагрева. Если в процессе кипения при свободном движении объем жидкости велик по сравнению с отрывным диаметром пузырька пара  $D_0$ , то такой процесс кипения называют *кипением в большом объеме*.

В процессе подогрева вначале нагревается слой жидкости у стенки. Когда  $t_w$  станет равной  $t_{\text{нас}}$ , на отдельных частях поверхности нагрева начнут зарождаться и расти пузыри пара (рис. 3.6,а). Достигнув  $D_0$ , они будут отрываться от поверхности и всплывать. Попадая в жидкость с более низкой температурой, пузыри пара конденсируются. Такое кипение называют *кипением с недогревом*. Небольшие части пузырей остаются на поверхности и служат зародышами следующих пузырей.

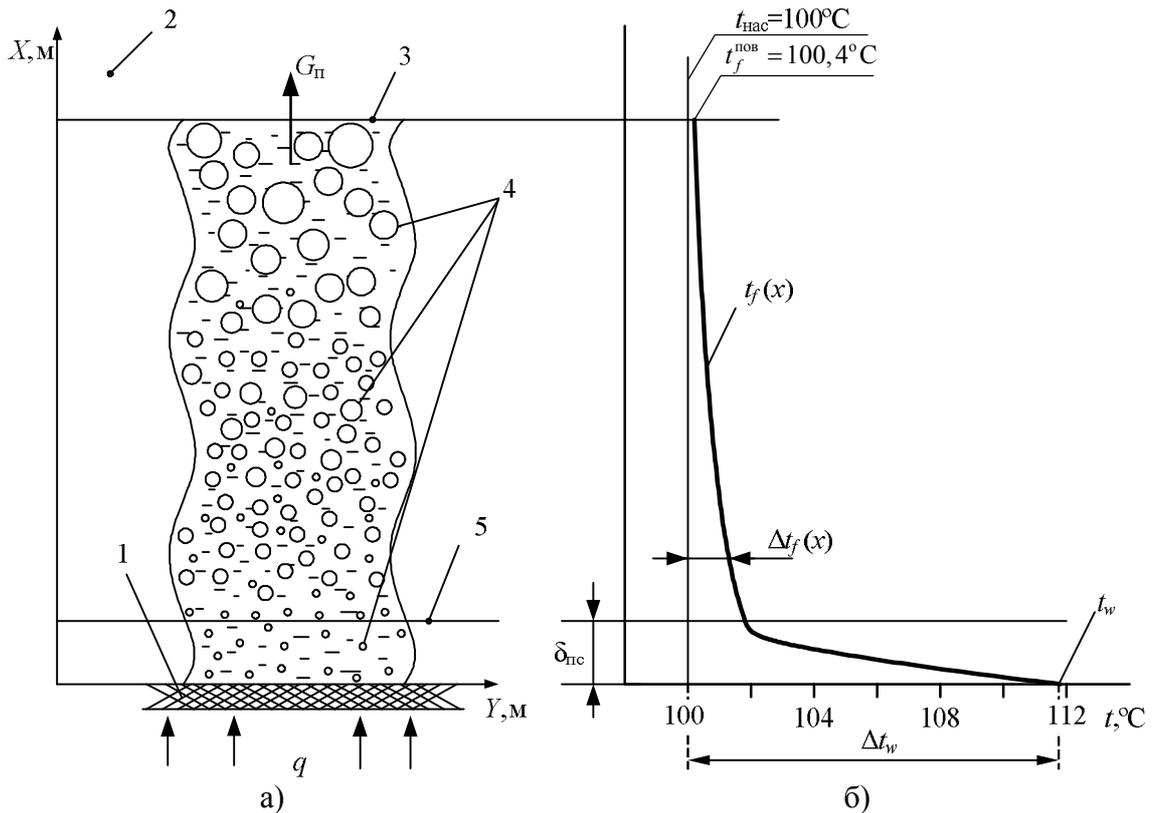


Рис. 3.6. Распределение температуры в объеме кипящей воды  
( $t_w=109,1^{\circ}\text{C}$ ,  $q=22,450 \text{ кВт/м}^2$ ):

- а) картина процесса кипения; б) распределение температуры;  
1 – поверхность теплообмена (стенка); 2 – насыщенный водяной пар;  
3 – поверхность воды; 4 – всплывающие паровые пузыри;  
5 – внешняя граница пограничного слоя

Когда вся масса жидкости нагрета до  $t_{\text{нас}}$ , пузыри пара будут всплывать и достигать поверхности раздела жидкость–газ или жидкость–пар. Такое кипение называют *кипением насыщенной жидкости*. Кипение с недогревом и кипение насыщенной жидкости может быть как пузырьковым, так и пленочным.

Сами пузыри забирают от обогреваемой поверхности немного теплоты, но они интенсивно перемешивают жидкость во всем объеме и, главное, в пограничном слое, приводя к резкой интенсификации теплоотдачи к кипящей жидкости по сравнению с обычной конвекцией. Число центров парообразования на греющей поверхности увеличивается по мере роста плотности теплового потока  $q$ , поскольку при этом увеличивается перегрев жидкости у стенки.

Распределение температуры по высоте сосуда с кипящей жидкостью показано на рис. 3.6,б [10].

Расход теплоты на испарение  $Q$ , Вт, равен  $Q = rG_{\text{п}}$ , где  $G_{\text{п}}$  – количество образовавшегося пара, кг/с;  $r$  – удельная теплота парообразования (конденсации), Дж/кг.

Механизм парообразования и интенсивность теплообмена определяются разностью температур стенки и жидкости (температурным напором)  $\Delta t = t_w - t_{\text{нас}}$ . На рис. 3.7 изображена типичная зависимость коэффициента теплоотдачи и тепловой нагрузки (плотности теплового потока) от температурного напора.

При значениях  $\Delta t < 5^\circ\text{C}$  количество отделяющихся от поверхности нагрева пузырьков невелико и пузырьки еще не способны вызвать существенное перемешивание жидкости. В этих условиях интенсивность теплообмена определяется свободным движением жидкости и коэффициент теплоотдачи слабо увеличивается с ростом  $\Delta t$ . Такой режим кипения называется конвективным (зона естественной конвекции на рис. 3.7).

Дальнейшее увеличение температурного напора  $\Delta t$  сопровождается ростом числа пузырьков пара, и их движение после отрыва вызывает интенсивное перемешивание жидкости. Наступает режим *развитого пузырькового кипения*, при котором коэффициент теплоотдачи и тепловая нагрузка резко возрастают (зона пузырькового кипения на рис. 3.7).

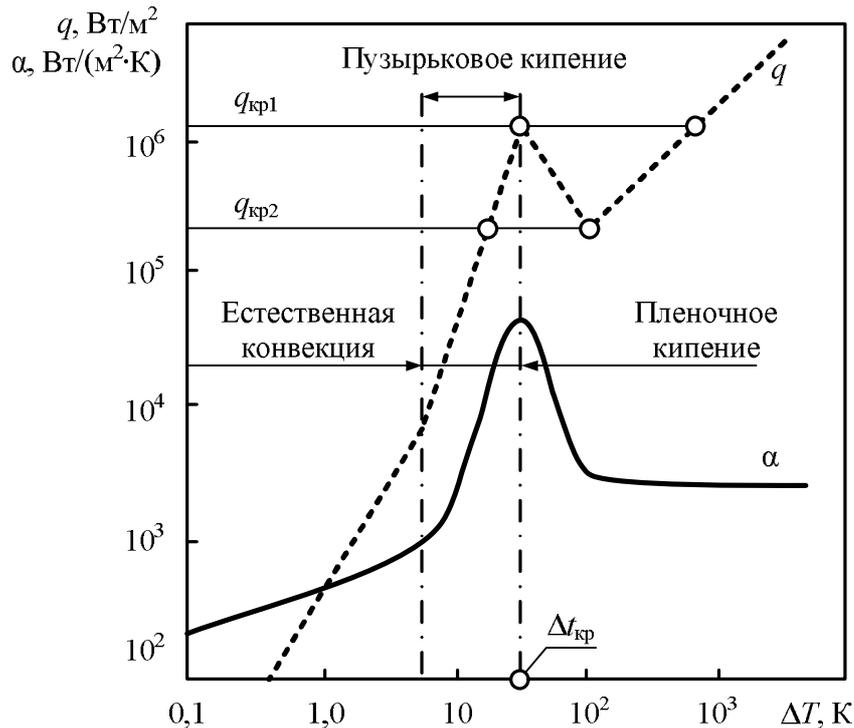


Рис. 3.7. Зависимость плотности теплового потока  $q$  и коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от перегрева стенки  $\Delta t = t_w - t_{\text{нас}}$  (в логарифмических координатах)

При некоторой величине  $\Delta t$  отдельные пузырьки пара начинают соединяться и образуют паровую пленку, которая покрывает сначала отдельные участки поверхности нагрева, а затем отделяет полностью жидкость от поверхности нагрева. Пленка периодически разрушается и уходит от поверхности в виде больших пузырей. Вместо разрушившейся пленки возникает новая. Такое *кипение* называется *пленочным*.

В этих условиях теплота передается от поверхности нагрева к жидкости путем теплопроводности, конвективного теплообмена и излучения, а испарение происходит с поверхности пленки. Так как теплопроводность пара значительно меньше теплопроводности жидкости, то появление паровой пленки приводит к резкому уменьшению коэффициента теплоотдачи (зона пленочного кипения на рис. 3.7).

Когда пленка устойчиво покрывает всю поверхность нагрева, условия теплообмена стабилизируются и при дальнейшем росте  $\Delta t$  коэффициент теп-

теплоотдачи остается практически неизменным, а тепловая нагрузка увеличивается пропорционально  $\Delta t$ .

В области перехода пузырькового кипения в пленочное зависимость  $q = f(\Delta t)$  имеет максимальное значение. Величины  $\Delta t$ ,  $q$ ,  $\alpha$ , соответствующие моменту перехода пузырькового режима кипения в пленочное, называются *критическими*.

Критические параметры, соответствующие переходу пузырькового кипения в пленочное, для воды составляют:  $\Delta t_{кр} = 25^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_{кр} = 46500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $q_{кр} = 1,16 \cdot 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2$  при  $P = 0,1 \text{ МПа}$ . С увеличением давления до  $P \approx 7 \text{ МПа}$  значение  $q_{кр}$  возрастает до  $4 \cdot 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , а затем начинает уменьшаться.

В технике стараются не приближаться к критической тепловой нагрузке  $q_{кр1}$  соответствующей переходу к пленочному режиму кипения. Дело в том, что в аппаратах, в которых тепловой поток задается независимо от интенсивности теплоотдачи (например, в электронагревателях), случайное, даже непродолжительное по времени, превышение тепловой нагрузки над  $q_{кр1}$  приведет к переходу в пленочный режим кипения и температура нагревателя резко возрастает – почти на  $1000^\circ\text{C}$  (см. рис. 3.7). Даже легированные стали не выдерживают столь высоких температур. Обратный переход к пузырьковому кипению происходит только при достаточно сильном снижении тепловой нагрузки (до  $q_{кр2}$ ).