

Лекция 23. Кризисы кипения

Режимы кипения в большом объеме. Кривая кипения

Для анализа процесса кипения широко используют экспериментально полученную зависимость плотности теплового потока q , подводимого к обогреваемой поверхности от температурного перепада $\Delta T = T_w - T_{\text{нас}}$, график которой показан на рис. 3.10. Это график называют *кривой кипения*. На этой кривой выделяют несколько интервалов ΔT , соответствующих различным режимам теплоотдачи.

Пузырьковый режим кипения наблюдается при значениях ΔT соответствующих второй области на кривой кипения. Радиус межфазной поверхности пузырька – зародыша пропорционален размеру образующей его микрощероховатости на поверхности стенки. Поэтому в начале пузырькового режима кипения, при незначительном перегреве жидкости, "работают" лишь крупные центры парообразования, поскольку пузырьки – зародыши малых центров парообразования имеют радиус меньше критического. В этом случае происходит неустойчивое или слаборазвитое пузырьковое кипение. С увеличением перегрева жидкости активизируются более мелкие центры парообразования, поэтому количество образующихся пузырей и частота их отрыва возрастают. В результате интенсивность теплоотдачи чрезвычайно быстро увеличивается (см. рис. 3.10, **область 2**).

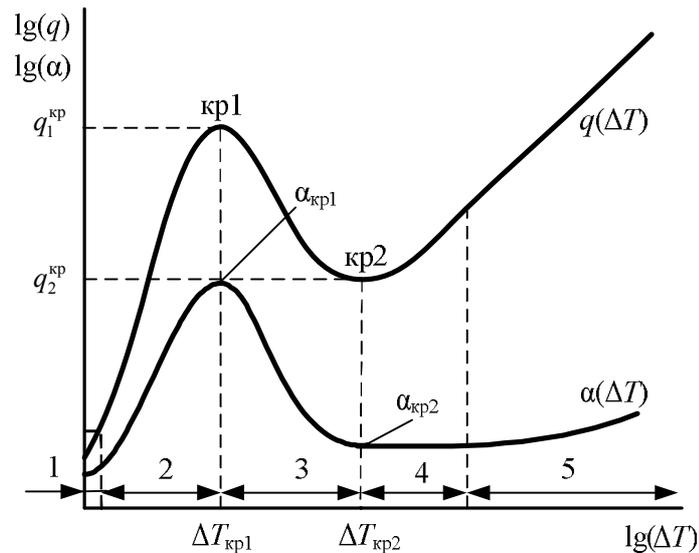


Рис. 3.10. Изменение плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи от перегрева жидкости в пограничном слое: 1 – конвективная область без кипения; 2 – область пузырькового кипения; 3 – переходная область; 4 – область пленочного кипения; 5 – участок пленочного кипения со значительной долей передачи теплоты излучением; кр1, кр2 – соответственно точки первого и второго кризисов кипения

Интенсивность теплоотдачи обусловлена термическим сопротивлением теплопроводности тонкой жидкой пленки, которая смачивает твердую поверхность и находится под областью паровых пузырей. С увеличением количества и частоты отрыва пузырей жидкая прослойка разрушается (турбулизируется) и ее термическое сопротивление уменьшается.

Коэффициент теплоотдачи (α) при развитом пузырьковом кипении достигает десятков и даже сотен тысяч $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ (при высоких давлениях). Это обусловлено большой удельной теплотой фазового перехода и интенсивным перемешиванием жидкости растущими и отрывающимися пузырьками пара.

Режим пузырькового кипения обеспечивает наиболее эффективную теплоотдачу. Этот режим кипения применяется в парогенераторах тепловых и атомных электростанций, при охлаждении двигателей, элементов конструкции энергетических, металлургических и химических агрегатов, работающих в условиях высоких температур.

При дальнейшем увеличении перегрева стенки равном перегреву жидкости в пограничном слое ($\Delta T = T_w - T_{\text{нас}}$) интенсивность теплоотдачи, достигнув максимума в критической точке "кр1", начинает снижаться из-за слияния все возрастающего количества пузырей в паровые пятна (**область 3**). Площадь паровых пятен возрастает по мере увеличения ΔT и охватывает в итоге всю стенку, превращаясь в сплошную паровую пленку, плохо проводящую теплоту. Таким образом, происходит постепенный переход от пузырькового режима кипения к пленочному, сопровождающийся снижением интенсивности теплоотдачи.

Начало такого перехода называют *первым кризисом кипения*. Под *кризисом* понимают коренное изменение механизма кипения и теплоотдачи.

При дальнейшем увеличении перегрева (ΔT) интенсивность теплоотдачи, достигнув минимума во второй критической точке "кр2", снова начинает возрастать в области пленочного режима кипения (**области 4 и 5**). Такую перемену характера влияния перегрева на теплоотдачу называют *вторым кризисом кипения*.

В пленочном режиме кипения сплошная пленка пара оттесняет жидкость от поверхности, и условия теплообмена стабилизируются, а коэффициент теплоотдачи перестает снижаться, оставаясь практически постоянным. Тепловой поток согласно закону Ньютона снова начинает увеличиваться из-за возрастания температурного напора ΔT . Заметим, что увеличение теплового потока в области развитого пленочного кипения (при больших ΔT) происходит и из-за возрастания переноса теплоты излучением в паровой прослойке. Интенсивность теплоотдачи при пленочном режиме кипения весьма низка, что приводит к сильному перегреву поверхности теплообмена.

Два вида перехода от пузырькового режима к пленочному

В зависимости от граничных условий теплообмена на поверхности теплообмена переход от пузырькового режима к пленочному может происходить, либо следуя кривой кипения (рис 3.11,а), либо скачкообразно (рис. 3.11,б). Постепенный переход от развитого пузырькового кипения к пленочному имеет место при регулируемой температуре стенки (граничные условия I рода), а скачкообразный – при постоянном тепловом потоке, поступающем от стенки к жидкости (граничные условия II рода).

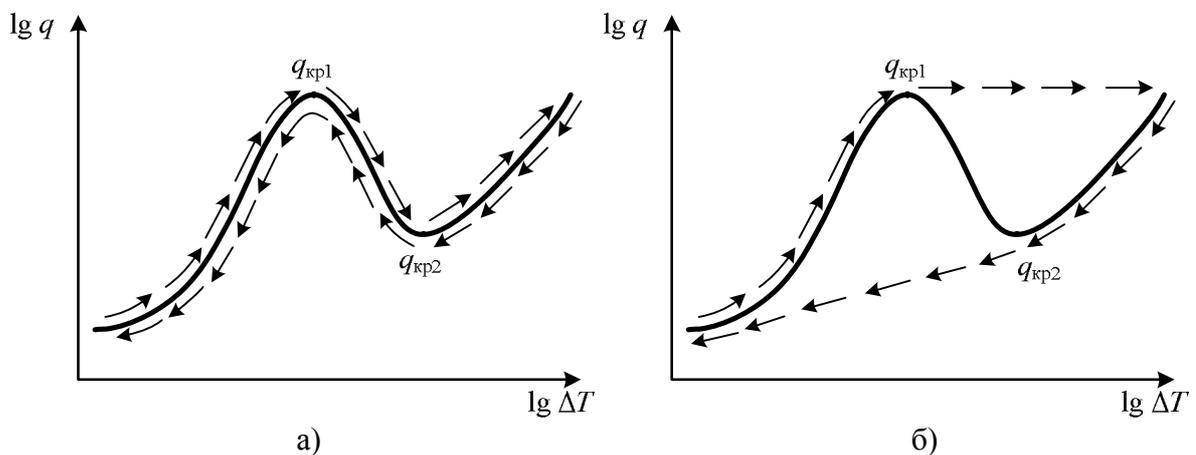


Рис. 3.11. Два вида перехода от пузырькового режима кипения к пленочному:
а) граничные условия I рода; б) граничные условия II рода

Для объяснения этого явления запишем формулу для расчета плотности теплового потока через тепловой пограничный слой (см. рис. 3.6):

$$q = \frac{\Delta T}{R_{\text{пс}}} = \frac{\Delta T}{\delta_{\text{пс}} / \lambda_{\text{пс}}},$$

где $\Delta T = T_w - T_{\text{нас}}$ – перепад температур в пограничном слое; $R_{\text{пс}}$ – термическое сопротивление пограничного слоя; $\delta_{\text{пс}}$ – толщина пограничного слоя; $\lambda_{\text{пс}}$ – коэффициент теплопроводности пограничного слоя.

При заданной постоянной температуре стенки (T_w) перепад температур ($\Delta T = T_w - T_{\text{нас}}$) не зависит от процесса теплообмена. Поэтому при увеличе-

нии термического сопротивления пограничного слоя в переходной области вследствие ухудшения теплопроводных свойств пристенного слоя ($\lambda_{\text{пс}} \downarrow \Rightarrow R_{\text{пс}} \uparrow$), тепловой поток начинает уменьшаться ($q \downarrow$) (см. рис. 3.11,а).

При заданном постоянном тепловом потоке ($q = \text{const}$) увеличение термического сопротивления ($\lambda_{\text{пс}} \downarrow \Rightarrow R_{\text{пс}} \uparrow$) приводит к скачкообразному росту перепада температур в пограничном слое ($\Delta T \uparrow$) и, следовательно, к перегреву стенки ($T_w \uparrow$) и возможному ее разрушению.

При снижении тепловой нагрузки переход к пузырьковому кипению произойдет скачком при минимальной тепловой нагрузке.