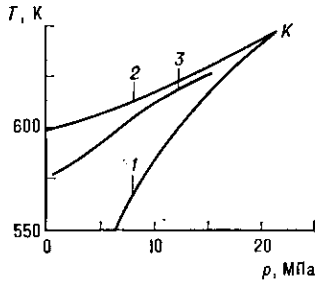


натяжением σ . В соответствии с *Лапласа законом* критич. радиус пузырька (равновесного пузырька) равен

$$R_{кр} = \frac{2\sigma}{p'' - p'} \quad (1)$$

Давление пара в пузырьке p'' связано с давлением насыщ. пара над горизонтальной поверхностью жидкости (давлением на бинадали) при той же темп-ре *Кельвина*



Фазовая диаграмма воды: p — давление; T — темп-ра; K — критическая точка воды; 1 — бинадаль; 2 — спинодаль (область между 1 и 2 — область метастабильного, перегретого состояния); 3 — линия достижимого в опытах перегрева кипящей жидкости.

уравнением. При $R < R_{кр}$ пузырьки схлопываются, при $R > R_{кр}$ — растут.

Рождение пузырька пара в объёме гомогенной жидкости происходит при преодолении энергетич. барьера, равного работе образования критич. пузырька:

$$W = \frac{4}{3} \pi R_{кр}^2 \sigma \quad (2)$$

(*ф-ла Гиббса*). Энергетич. барьер может быть преодолен в тех областях жидкости, где возникают термодинамич. флуктуации её плотности. Частоту J рождения флуктуац. пузырьков описывает теория *Фольмера — Зельдовича* — *Кагана*. С хорошей точностью

$$J = 10^{37} \exp(-W/kT). \quad (3)$$

Интенсивное флуктуац. зародышеобразование в гомогенной жидкости развивается при высоких перегревах (напр., в воде при атм. давлении $J = 10^{10} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$, если $T = 578 \text{ К}$).

В объёме неочищенной, не лишённой примесей и растворенных газов жидкости и на границах с твёрдой фазой обычно имеются (или временно появляются) зоны предпочтительного рождения пузырьков. К таким центрам K относятся как спонтанные флуктуационные, так и готовые, уже имевшиеся в жидкости (напр., пузырьки нерастворённого газа, газовые и паровые пузырьки в микротрещинах на неполностью смоченной поверхности стенок). При развитии K готовые центры возобновляются за счёт захвата пара микроуглублениями (порами) на нагреваемой поверхности.

Центрами спонтанного K могут быть плохо смачиваемые участки (т. в. островки *Френкеля*) и поры на твёрдой поверхности, зоны выпящ. концентрации легкокипящей компоненты (напр., образовавшейся при электролизе), области локального тепловыделения (напр., зоны протекания экзотермич. хим. реакций) или локального растяжения (центры кавитации). В центрах спонтанного K работа образования критич. пузырька меньше, чем в др. точках объёма жидкости, поэтому активация центров K наблюдается при более низких темп-рах перегрева — при состояниях жидкости, попадающих в область между линиями 1 и 3 на рис.

В квазистационарных режимах K обычно обеспечиваются готовыми центрами и перегрев выше линии бинадали невелик ($\sim 10 \text{ К}$). В нестационарных процессах существен вклад спонтанных центров K . При достаточно быстром переводе жидкости в метастабильное, перегретое состояние траектория процесса вскипания на фазовой диаграмме может приблизиться к спинодали 2 и осн. процессом становится гомогенное флуктуац. зародышеобразование; такой режим K наз. ударным, парообразование при этом носит взрывной характер.

Пузырёк с радиусом $R \gg R_{кр}$ растёт со скоростью, определяемой подводом теплоты к жидкости через меж-

фазную поверхность, а также диффузией легко кипящей компоненты (в растворах), вязкостью и инерц. силами. На ранней стадии роста пузырьков скорость ограничивается в первую очередь инерц. силами. Скорость \dot{R} изменения радиуса определяется *ф-лой Рэлея*:

$$\dot{R} = \sqrt{\frac{2(p'' - p')}{3\rho}}, \quad (4)$$

где ρ — плотность жидкости. По мере роста пузырька основными становятся условия тепло- и массопотода к межфазной поверхности, причём ограничение процессами переноса приводит к падению скорости с увеличением времени t развития пузырька: $\dot{R} \sim 1/\sqrt{t}$ (асимптотич. стадия роста пузырька). В нек-рых случаях теплоты перегрева жидкости достаточно для полного покрытия расхода энергии на парообразование. В таких режимах *рэлеевская* стадия роста пузырьков, описываемая (4), в однокомпонентных жидкостях продолжается до слияния пузырьков.

Различают объёмное и поверхностное K . При поверхностном K осн. источником жизнеспособных паровых пузырьков является слой жидкости, примыкающий к нагреваемой поверхности. Если осн. объём жидкости имеет темп-ру ниже равновесной темп-ры на бинадали (т. н. K . с недогревом), то пузырьки пара, образовавшиеся вблизи нагреваемой поверхности, попадая при миграции в холодные слои, схлопываются. В сильно недогретой жидкости пузырьки, формирующиеся на нагреваемой поверхности, не достигают отрывного размера вследствие конденсации пара в противоположной от нагревателя части пузырька. Объёмное K происходит при перегреве во всём объёме жидкости или при понижении давления. В этом случае пузырьки рождаются во всём объёме жидкости или во фронте волны спада давления.

Рост пузырьков при K оказывает механич. (гидродинамич.) воздействие на систему в целом. В частности, в замкнутом объёме перегретой жидкости по мере увеличения паросодержания растёт давление. В стеснённых дозвуковых стационарных потоках вскипающей жидкости (напр., в трубах) рост паросодержания вниз по течению сопровождается снижением давления, поэтому при истечении кипящей перегретой жидкости из щелей и сопел наблюдается эффект «запирания» — снижение расхода жидкости. Пузырьки пара при росте и схлопывании излучают акустич. энергию (шум K). Быстрый рост давления при взрывном K может привести к разрушению конструкций (паровой взрыв). Пузырьки, всплывающие в гравитац. поле, вызывают дополнит. конвективные потоки, что способствует перемешиванию жидкости, а поверхностное K эффективно возбуждает турбулентное движение пристеночного слоя жидкости.

Поверхностное K широко используется для интенсивного охлаждения поверхности (теплослёма). Коэффициент характеристикой эффективности теплослёма служит коэф. теплоотдачи α , определяемый как отношение плотности теплового потока q к перепаду темп-ры ΔT между нагретой поверхностью и жидкостью. При развитии стационарном K темп-рой жидкости считают темп-ру на бинадали. С ростом перепада темп-р ΔT по мере развития K коэф. теплоотдачи растёт $\propto (\Delta T)^m$ (показатель степени m меняется в пределах от 2 до 3). При достаточно высоком локальном паросодержании в пограничном слое жидкости пузырьки начинают взаимодействовать между собой, образуя паровые полости сложной формы.

При скорости стационарного отвода теплоты от поверхности нагревателя выше нек-рого макс. значения начинает проявляться неустойчивость встречных потоков жидкости и пара (неустойчивость *Гельмгольца*). В результате на нагревателе образуется плёнка пара, резко снижающая коэф. α и поток q (кризис K). Если паровой слой покрывает всю нагреваемую поверхность,