

кривизны поверхности жидкости обусловлен рост крупных капель дождя за счет испарения более мелких; отсыревание пористых тел, смачиваемых водой, и другие явления.

§ 14.8. Кипение жидкостей

1. В § 13.3 мы кратко говорили о кипении жидкости, не вдаваясь в выяснение сущности этого явления. Кипением называют процесс интенсивного испарения жидкости не только с ее свободной поверхности, но и по всему объему жидкости внутри образующихся при этом пузырьков пара. Пузырьки пара в кипящей жидкости быстро увеличиваются в размерах и, всплывая на поверхность, лопаются. Вследствие этого возникает характерное бурление кипящей жидкости.

Давление p внутри газового пузыря, находящегося в жидкости, представляет собой сумму внешнего давления p_0 , гидростатического давления вышележащих слоев жидкости $p_{ж}$ и добавочного давления Δp , вызываемого поверхностным натяжением:

$$p = p_0 + p_{ж} + \Delta p, \quad (14.27)$$

причем

$$p_{ж} = \rho gh \quad \text{и} \quad \Delta p = \frac{2\alpha}{r},$$

где r — радиус пузырька пара, h — расстояние от его центра до поверхности жидкости, а ρ и α — плотность и коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Рост пузырьков пара, т. е. кипение жидкости, возможно только в том случае, когда температура жидкости такова, что давление p_n насыщенного пара внутри пузырька не меньше давления p , вычисляемого по формуле (14.27):

$$p_n \geq p_0 + \rho gh + \frac{2\alpha}{r}. \quad (14.28)$$

Если условие (14.28) не выполнено, происходит «захлопывание» пузырька и конденсация находящегося в нем пара.

Из (14.28) видно, что при малых размерах r пузырьков пара давление p_n должно быть велико. Поэтому, для того чтобы началось кипение, жидкость нужно нагреть до высокой температуры. Кипение возникает при значительно более низкой температуре, если в жидкости имеются пылинки, пузырьки растворенных газов, бугорки шероховатости на стенках сосуда и другие центры паробразования. Дело в том, что возникающие на этих центрах пузырьки пара уже с самого начала имеют такой радиус кривизны, что влияние третьего члена в правой части неравенства (14.28) невелико. Поэтому кипение может начинаться при меньших значениях температуры.

Обычно, когда начинается кипение жидкости, в ней имеются такие центры паробразования, что $\Delta p = 2\alpha/r$ мало, высота сосуда

также невелика, так что $\rho gh \ll p_0$. Поэтому вместо (14.28) можно написать следующее приближенное условие для начала кипения: $p_{\text{п}} = p_0$.

Температуру жидкости, при которой давление ее насыщенного пара равно внешнему давлению, называют **температурой кипения**.

2. Если кипение жидкости происходит при постоянном давлении p_0 , то ее температура также остается неизменной. Теплота, подводимая к кипящей жидкости, целиком расходуется на отрыв молекул от жидкости и переход их в паровую фазу. Теплоту $r_{\text{к}}$, необходимую для испарения единицы массы жидкости, нагретой до температуры кипения, называют **удельной теплотой парообразования**. Удельная теплота парообразования уменьшается с увеличением температуры кипения и обращается в нуль при критической температуре.

В табл. 14 приведены значения $r_{\text{к}}$ для воды в зависимости от температуры кипения.

Таблица 14

$t, ^\circ\text{C}$	100	150	200	250	300	350	374
$r_{\text{к}} \left\{ \begin{array}{l} \text{кал/г} \\ \text{Дж/кг} \end{array} \right.$	539,0 $2,26 \cdot 10^6$	505,0 $2,11 \cdot 10^6$	463,5 $1,94 \cdot 10^6$	409,7 $1,71 \cdot 10^6$	335,4 $1,40 \cdot 10^6$	213,3 $8,92 \cdot 10^5$	27,4 $1,15 \cdot 10^5$

3. Кипение жидкости и конденсация пара служат примерами **фазовых переходов первого рода**. Характерная особенность всех фазовых переходов первого рода состоит в том, что в этих процессах одновременно постоянны давление и температура, но зато изменяется соотношение между массами двух фаз. Второй особенностью этих процессов является то, что для их осуществления необходимо подводить к системе или отводить от нее некоторое количество теплоты, называемое **теплотой фазового перехода**.

В термодинамике доказано, что теплота r фазового перехода единицы массы вещества

$$r = (v_2 - v_1) T \frac{dp}{dT}, \quad (14.29)$$

где v_1 и v_2 — удельные объемы вещества в исходной и конечной фазах соответственно, а T и p — температура и давление фазового перехода. Соотношение (14.29) называют **уравнением Клапейрона — Клаузиуса**. Оно справедливо для любого фазового перехода первого рода. Им широко пользуются в теплотехнике для нахождения удельных теплот парообразования, плавления и испарения по известным из опыта зависимостям температуры фазового перехода от давления.

4. Запишем уравнение (14.29) для случая кипения жидкости:

$$r_{\text{к}} = (v_{\text{п}} - v_{\text{ж}}) T \frac{dp}{dT}.$$

откуда

$$\frac{dT}{dp} = \frac{(v_n - v_{ж}) T}{r_k}, \quad (14.30)$$

где $v_{ж}$ и v_n — удельные объемы жидкости и пара при температуре кипения T .

Поскольку $v_n > v_{ж}$ и $r > 0$, то из (14.30) следует, что $\frac{dT}{dp} > 0$, т. е. температура кипения возрастает при увеличении давления. Так, например, при давлениях $p > 1,25 \cdot 10^7$ Па воду можно нагреть до такой температуры, что в ней будет плавиться свинец ($t_{пл} = 327^\circ \text{C}$), а кипения воды все еще не будет. Если давление в таком сосуде с сильно нагретой жидкостью уменьшить, то происходит бурное кипение жидкости. При этом выделяется столь большое количество пара, что его давление почти мгновенно возрастает до огромных величин и может вызвать разрушение сосуда. Это обстоятельство нужно учитывать при эксплуатации котельных установок.

Интересен следующий опыт, демонстрирующий кипение воды при пониженном давлении. В эксикаторе, на дно которого налито немного серной кислоты, поглощающей водяные пары, устанавливается на проволочной подставке часовое стекло с небольшим количеством воды. При откачивании из эксикатора воздуха вода на часовом стекле закипает при комнатной температуре. Затем на ее поверхности образуется ледяная корка, так как вода отдает теплоту, необходимую для кипения. Кипение продолжается до тех пор, пока вся вода на часовом стекле не замерзнет.

Вопросы для повторения

1. В чем особенность теплового движения частиц жидкости?
2. В чем состоит дырочная теория строения жидкости?
3. Каковы причины особых свойств поверхностного слоя жидкостей?
4. Выведите формулу Лапласа.
5. Объясните капиллярные явления в жидкостях.

Примеры решения задач

Задача 14.1. Капля ртути массой $2,72 \cdot 10^{-8}$ кг введена между параллельными стеклянными пластинками. Какую силу следует приложить для того, чтобы расплющить каплю до толщины в 0,1 мм? Коэффициент поверхностного натяжения ртути 0,5 Н/м. Считать, что ртуть абсолютно не смачивает стекло.

Д а н о

$$M = 2,72 \cdot 10^{-8} \text{ кг,}$$

$$b = 10^{-4} \text{ м,}$$

$$\alpha = 0,5 \text{ Н/м;}$$

из таблиц:

$$\rho = 1,36 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$$

Р е ш е н и е

Сдавленная капля ртути имеет вид очень тонкого диска с выпуклой боковой поверхностью. Дополнительное давление Δp , возникающее вследствие кривизны поверхности, уравновешивает внешнее давление, производимое силой F :

$$\Delta p = \frac{F}{S}. \quad (a)$$