

# ЛЕД, ВОДА и ПАР

Студентам, изучающим теплотехнику, чтобы они лучше «прочувствовали» некоторые особенности обыкновенной воды, нередко предлагают такую задачу.

Имеется при нормальном давлении:

- 1 кг льда при температуре  $-100^{\circ}\text{C}$ ;
- 1 кг воды при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ ;
- 1 кг пара при температуре  $+100^{\circ}\text{C}$ .

Всё это смешали в одной ёмкости (в которой тоже поддерживается нормальное давление), пока не установилось тепловое равновесие. Какова окажется температура получившейся смеси?

При поиске ответа на вопрос полезно взглянуть в таблицу, где приведены некоторые справочные данные (их легко найти в интернете). Вот чему равно количество тепла (в килоджоулях), необходимое, чтобы при нормальном давлении:

– нагреть 1 кг льда от $-100^{\circ}\text{C}$ до $0^{\circ}\text{C}$	170
– растопить 1 кг льда	330
– нагреть 1 кг воды от $0^{\circ}\text{C}$ до $100^{\circ}\text{C}$	420
– испарить 1 кг воды	2300

Взглянув на эти числа, постарайтесь сначала угадать ответ с ошибкой хотя бы не более 5 градусов. А потом проверьте свою догадку, выполнив расчёт или читая дальше. Возможно, будет повод удивиться!

\*\*\*

Въедливый читатель может спросить: а возможно ли в такой «пёстрой» смеси поддерживать постоянное нормальное давление? В самом деле, при нагревании льда объём его хоть немного, но растёт, зато при таянии он существенно снижается (почти на 10%). С водой ничуть не проще: при нагревании от  $0$  до  $4^{\circ}\text{C}$  её объём опять-таки уменьшается, но после этого, наоборот, увеличивается (и чем дальше, тем сильнее). А с паром вообще катастрофа: при его конденсации объём резко падает – в сотни раз. Но изменение объёма мгновенно влечёт изменение давления (как правило, в обратную сторону). Вот и попробуй поддерживать постоянное давление после смешивания всех компонентов! К счастью, есть испытанные способы добиться практически постоянного давления – напри-



мер, поместить смесь в цилиндрический сосуд, верхняя часть которого ограничена подвижным поршнем. Вес поршня вкупе с наружным атмосферным давлением и создают нужное постоянное давление в сосуде (поршень «ходит» по необходимости вверх-вниз).

Впрочем, мы отвлеклись от сути задачи. Вернёмся к делу.

Возьмём 1 кг льда и будем постепенно нагревать его, пока он весь не превратится в пар. Этот процесс разобьётся на четыре этапа. Вот они:

1) нагревание льда от  $-100^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$ ;

2) плавление льда (превращение его в воду) – при этом температура будет постоянной и равной  $0^{\circ}\text{C}$ , пока весь лёд не растает;

3) нагревание воды от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$ ;

4) кипение воды – при этом температура будет постоянной и равной  $100^{\circ}\text{C}$ , пока вся вода не выкипит.

Если продолжать подводить тепло дальше, пар начнёт перегреваться и температура его станет подниматься выше  $100^{\circ}\text{C}$ , но это уже выходит за пределы нашей задачи, так что здесь притормозим.

Величины затрат тепла на все этапы были указаны как справочные в условии. Давайте теперь изобразим всё это схематично в виде диаграммы, причём *в масштабе*. Четыре разноцветных (и соответственно пронумерованных) столбика как раз соответствуют четырём этапам.

Что сразу бросается в глаза? Конечно, подавляющее превосходство высоты четвёртого столбика над первыми тремя. Она, очевидно, больше не только высоты каждого из трёх остальных столбиков, но и их суммы, притом в несколько раз! То есть, чтобы лишь испарить воду, требуется затратить во много раз больше тепла, нежели для нагревания льда, его плавления и последующего нагревания воды до ста градусов.

Но как это относится к нашей задаче? Самым непосредственным образом! Если такое огромное количество тепла надо затратить на испарение, то в точности



такое же количество будет выделено, если сконденсировать пар, превращая его обратно в воду. А ведь у нас как раз такое явление имеет место.

В самом деле, попавший в сосуд пар начнёт постепенно конденсироваться, выделяя тепло, которое пойдёт на нагревание льда, его плавление и последующее доведение образовавшейся воды до температуры  $100^{\circ}\text{C}$  – и этого с избытком хватит. Более того, его же хватит и на нагревание до  $100^{\circ}\text{C}$  второй компоненты нашей смеси – воды при изначально нулевой температуре.

А чтобы это утверждение не выглядело голословным, изобразим всё это опять же на диаграмме, поставив друг на друга первые три столбика (что соответствует количеству тепла, потребному для доведения до  $100$  градусов исходного льда) и дополнительно ещё раз третий столбик (что соответствует подогреву до той же температуры исходной воды) и приложив слева к четвёртому столбику.

Что мы видим? Суммарная высота синего, зелёного и двух жёлтых столбиков составляет где-то 60% от высоты красного (точную величину можете подсчитать сами – числа возьмите из таблицы). А это как раз означает, что примерно  $0,6$  кг попавшего в сосуд пара сконденсируется, причём выделившегося при этом тепла будет достаточно, чтобы преобразовать остальные два компонента смеси в воду при температуре  $100^{\circ}\text{C}$ . А оставшаяся часть пара (около  $0,4$  кг) так паром и останется.

Вот и ответ: температура получившейся смеси составит ровнёшенько  $100^{\circ}\text{C}$  – и ни градусом меньше! А получившаяся смесь будет содержать  $2,6$  кг воды и  $0,4$  кг пара.

Обычно эта задача предлагается, чтобы решающий хорошенько прочувствовал, насколько велика теплота парообразования воды. Это очень важный фактор для многих технологических процессов, в частности – при работе тепловых и атомных электростанций, вырабатывающих основную часть электроэнергии в мире (ведь вода в большинстве из них – главное «рабочее тело»).

