

### Источник энергии: испарение - конденсация

Введение.

Раздел 1. Получение разности температур на основе процесса испарения – конденсации.

Выводы по разделу 1.

Раздел 2. Получение разности давлений на основе процесса испарения – конденсации.

Выводы по разделу 2.

#### Введение.

Неравномерное распределение кинетической энергии теплового движения молекул приводит к тому, что кинетическая энергия некоторых молекул жидкости может превышать потенциальную энергию их связи с остальными молекулами. Испарение – это процесс, при котором с поверхности жидкости вылетают молекулы, кинетическая энергия которых превышает потенциальную энергию взаимодействия молекул. Испарение сопровождается охлаждением жидкости. Конденсация есть процесс обратный испарению. Данная работа есть возможное решение проблемы Максвелла: разделение холодных и горячих молекул, получение разности температур и давлений на основе процесса «испарения – конденсации».

#### Раздел 1.

##### Получение разности температур на основе процесса испарения – конденсации.

Испарение какой – либо жидкости внутри герметичного резервуара в атмосфере более тяжёлого газа, чем пары жидкости, под действием поля тяжести приводит к тому, что пары испаряющейся жидкости будут вытесняться тяжёлым газом к верхней части резервуара (рис 1).

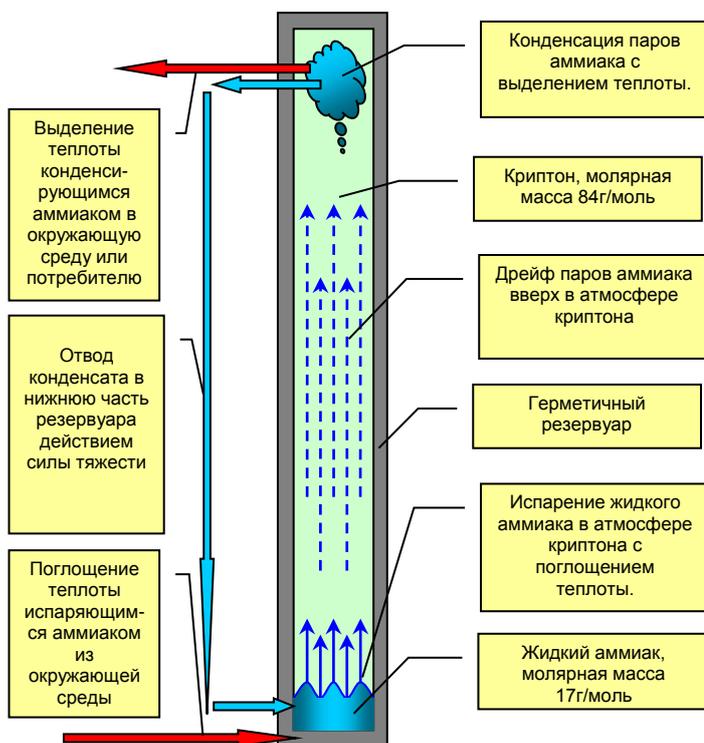


Рис 1.

Накопившись в верхней части резервуара и достигнув концентрации, при которой парциальное давление пара испаряющейся жидкости станет равным давлению насыщенного пара этой жидкости, пары начнут конденсироваться. Получившийся конденсат действием силы тяжести можно отводить обратно в нижнюю часть резервуара.

Получается замкнутый цикл «испарение – конденсация». Испарение при этом сопровождается поглощением тепла испаряющейся жидкостью из окружающей среды, конденсация – выделением тепла, которое отводится в окружающую среду.

Испаряющейся жидкостью, может служить аммиак –  $\text{NH}_3$ , молярная масса 17 г/моль. Тяжёлым газом, в атмосфере которого будет испаряться аммиак, может служить криптон –  $\text{Kr}$ , молярная масса 84 г/моль.

При отсутствии теплового контакта резервуара с окружающей средой тепловой баланс между испарением и конденсацией обеспечивается теплообменом между зоной испарения и зоной конденсации. Теплообмен возможен только при наличии разности температур между объектами теплообмена. Поскольку при испарении происходит поглощение тепла, а при конденсации – его выделение, температура  $T_{\text{исп}}$  в зоне испарения меньше температуры  $T_{\text{конд}}$  в зоне конденсации, т. е. справедливо соотношение:

$$T_{\text{исп}} < T_{\text{конд}} \quad (1.1)$$

Если резервуар, в котором происходит испарение и конденсация, имеет тепловой контакт с окружающей средой, имеющей температуру  $T_{\text{окр}}$ , то справедливо также соотношение:

$$T_{\text{исп}} < T_{\text{окр}} < T_{\text{конд}} \quad (1.2)$$

Теплота  $Q_{\text{потр}}$ , которую можно отвести потребителю или в окружающую среду при конденсации 1-го моля пара, и теплота  $Q_{\text{зискр}}$ , которая будет подводиться из окружающей среды при испарении 1-го моля жидкости, будут соответственно равны:

$$Q_{\text{потр}} = Q_{\text{конд}} - E_{\text{пот}} - Q_{\text{гр}} \quad (1.3)$$

$$Q_{\text{зискр}} = E_{\text{кин.конд}} - Q_{\text{пар}} + Q_{\text{гр}} \quad (1.4)$$

Здесь:  $Q_{\text{конд}}$  – теплота, выделившаяся при конденсации 1-го моля пара;  $E_{\text{пот}}$  – потенциальная энергия 1-го моля пара по отношению к поверхности жидкой фазы, равная работе, совершённой тяжёлым газом, вытеснившим пар от поверхности испарения к верхней части резервуара;  $Q_{\text{гр}}$  – теплота, отданная газовой смесью испаряющейся жидкости через поверхность их соприкосновения при испарении 1-го моля жидкости;  $E_{\text{кин.конд}}$  – кинетическая энергия 1-го моля конденсата, поступившего в нижнюю часть резервуара;  $Q_{\text{пар}}$  – теплота парообразования 1-го моля пара.

Общий тепловой баланс:

$$Q_{\text{потр}} + Q_{\text{зискр}} = 0 \quad (1.5)$$

### **Выводы по разделу 1.**

1. Испарение пара жидкости в герметичном резервуаре в атмосфере газа более тяжёлого, чем пар жидкости, под действием гравитации сопровождается вытеснением пара тяжёлым газом к верхней части резервуара, где пар может собираться до тех пор, пока его парциальное давление не станет равным давлению насыщенного пара. После этого вновь поступающий пар, вытесненный тяжёлым газом, начнёт конденсироваться. Конденсат действием гравитации может возвращаться к испаряющейся жидкости.
2. Испарение сопровождается поглощением теплоты испаряющейся жидкостью, а конденсация – выделением теплоты конденсирующимся паром. Тепловой баланс между испарением и конденсацией можно осуществить теплообменом между зоной испарения и зоной конденсации. Теплообмен возможен только при наличии разности температур между объектами теплообмена. Поэтому, температура испарения  $T_{\text{исп}}$  меньше температуры конденсации  $T_{\text{конд}}$ :  $T_{\text{исп}} < T_{\text{конд}}$ . Если резервуар, в котором происходит испарение и конденсация, имеет тепловой контакт с окружающей средой с температурой  $T_{\text{окр}}$ , то:  $T_{\text{исп}} < T_{\text{окр}} < T_{\text{конд}}$ .
3. Полученная разность температур может быть использована потребителем, как неограниченный источник энергии, которым служит теплота окружающей среды.

## Раздел 2.

### Получение разности давлений на основе процесса испарения – конденсации.

Предлагается рассмотреть систему.

В герметичный резервуар объёмом  $V_c$  закачаны два газа – водород ( $H_2$ ) и углекислый газ ( $CO_2$ ). Последний находится в равновесии с жидкой фазой, занимающей объём  $V_j$ . Пусть парциальное давление водорода, смешанного с углекислым газом, будет меньше  $P_{нас.пар}(CO_2)$  – давления насыщенного пара двуокиси углерода при температуре  $T$ . Температура  $T$  является постоянным параметром в данной системе. Объём, занимаемый газовой смесью, равен:

$$V_g = V_c - V_j. \quad (2.1)$$

Давление газовой смеси определяется суммой парциальных давлений газов – составляющих:

$$P_{г.см.}(1, 2...z) = P_{г.}(1) + P_{г.}(2) + \dots + P_{г.}(z), \quad (2.2)$$

где  $P_{г.см.}(1, 2...z)$  – давление газовой смеси, состоящей из  $z$  газов  $1, 2...z$ ;  
 $P_{г.}(1), P_{г.}(2), P_{г.}(z)$  – парциальные давления газов  $1, 2...z$ , из которых состоит газовая смесь.

Известно, что давление идеального газа есть произведение концентрации  $n$  молекул газа на температуру  $T$  и постоянную Больцмана  $k$ :

$$P = nkT, \quad (2.3)$$

где  $n = \frac{N}{V}$ , здесь  $N$  – число молекул,  $V$  – занимаемый ими объём.

Для реальных газов формула (2.3) даёт ответ с некоторым приближением.

Перепишем  $P_{г.см.}(1, 2...z) = P_{г.}(1) + P_{г.}(2) + \dots + P_{г.}(z)$  с учётом (2.3):

$$P_{г.см.}(1, 2...z) = n(1)kT + n(2)kT + \dots + n(z)kT. \quad (2.4)$$

Пусть высота резервуара будет достаточно большой, чтобы можно было представить два возможных случая:

1. Водород и углекислый газ под действием гравитации делятся на две фракции, верхней фракции газа с меньшей молярной массой – водорода (2г/моль) и нижней фракции газа с большей молярной массой – углекислого газа (44г/моль) и представляют собой разделённое состояние газовой смеси.
2. Водород и углекислый газ равномерно распределены по всему объёму  $V_g$  посредством перемешивания – это неразделённое состояние газовой смеси. Перемешивание можно осуществить испарением углекислого газа в жидкой фазе в верхней части резервуара (см. рис 2, 3), где тяжёлый пар жидкой углекислоты под действием гравитации будет проходить сквозь лёгкий водород, перемешиваясь с ним, стремясь занять нижнюю часть резервуара.

Рассмотрим первый случай (рис 2, левый резервуар).

Газовая смесь водорода и углекислого газа под действием гравитации делится на две фракции, одна из которых состоит из газа с меньшей молярной массой – водорода (2г/моль), другая – из газа с большей молярной массой – углекислого газа (44г/моль).

Уравнение давления  $P_{г.разд.}$  разделённой газовой смеси по (2.4):

$$P_{г.разд.} = n(H_2)kT + n(CO_2)kT \quad (2.5)$$

Для фракции водорода оно примет вид:

$$P_{г.разд.}(H_2) = n(H_2)kT + 0 \quad (2.6)$$

Для фракции углекислого газа:

$$P_{г.разд.}(CO_2) = 0 + n(CO_2)kT \quad (2.7)$$

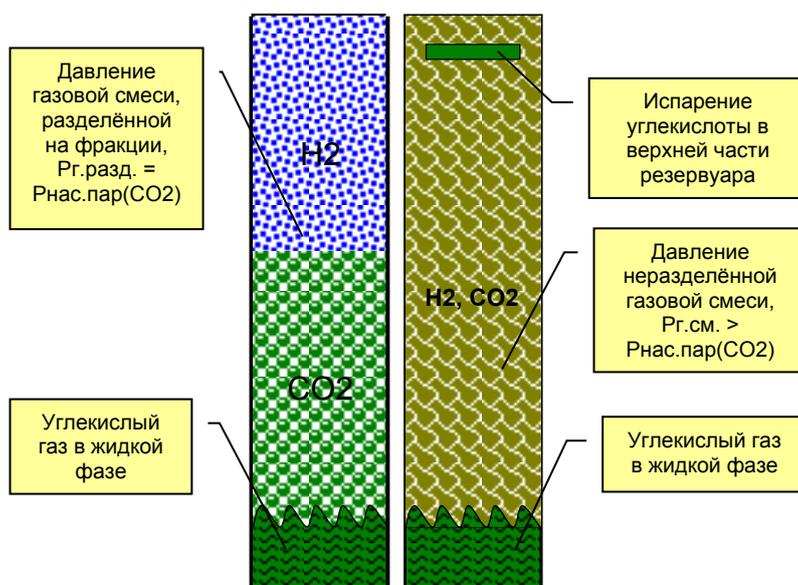


Рис 2.

По закону Паскаля давление одно и тоже в любой точке жидкости или газа. Изменением давления, связанным с высотой в поле тяжести, для газа пренебрегаем, тогда имеем равенство давлений обеих фракций:

$$P_{г.разд.}(H_2) = P_{г.разд.}(CO_2), \quad (2.8)$$

здесь  $P_{г.разд.}(CO_2) = P_{нас.пар.}(CO_2)$ , т. к. это необходимое условие динамического равновесия жидкой углекислоты с углекислым газом в герметичном резервуаре.

Равенства (2.5 - 2.8) для разделённой газовой смеси показывают, что если газовая смесь из двух газов, один из которых находится в равновесии «жидкость – пар», делится на две фракции, то давление  $P_{г.разд.}$  этой газовой смеси, будет равным давлению насыщенного пара одного из газов, находящегося в равновесии «жидкость – пар», при заданной температуре  $T$ , для нашего случая:

$$P_{г.разд.} = P_{нас.пар}(CO_2) \quad (2.9)$$

Рассмотрим второй случай (рис 2, правый резервуар).

Водород и углекислый газ, равномерно распределившись по всему объёму  $V_{г.}$ , представляют собой неразделённую газовую смесь, с давлением  $P_{г.см.}$  по формуле (2.2):

$$P_{г.см.} = P_{г.}(H_2) + P_{г.}(CO_2) \quad (2.10)$$

Здесь  $P_{г.}(CO_2) = P_{нас.пар}(CO_2)$ , т. к. это необходимое условие динамического равновесия жидкой углекислоты с углекислым газом в герметичном резервуаре.

$P_{г.}(H_2) > 0$ , т. к. водород равномерно распределён по объёму  $V_{г.}$ , следовательно:

$$P_{г.см.} > P_{нас.пар}(CO_2) \quad (2.11)$$

Сравним давления в резервуаре в обоих случаях.

**Для 1-го случая:  $P_{г.разд.} = P_{нас.пар}(CO_2)$ , см. (2.9).**

**Для 2-го случая:  $P_{г.см.} > P_{нас.пар}(CO_2)$ , см. (2.11).**

Имеем интересный вывод: в смешанном состоянии два газа, один из которых находится в равновесии «жидкость – пар», дают большее давление, чем в состоянии, в котором они разделены на фракции. Происходит это за счёт того, что при смешивании оба газа займут объём  $V_{г.}$ , и жидкость, находящаяся в равновесии с газовой фазой, будет испаряться до тех пор, пока парциальное давление пара, теперь занимающего объём  $V_{г.}$ , не станет равным давлению насыщенного пара. Общее число молекул  $N$  в объёме газовой смеси  $V_{г.}$  увеличится, следовательно, увеличится и давление газовой смеси в соответствии с формулой (2.3), т. к. температура  $T$  и объём  $V_{г.}$  – величины постоянные по условию.

Определим увеличение давления газовой смеси при её переходе из состояния отдельных фракций к неразделённому состоянию.

Отметим особенности состояния газовой смеси в виде отдельных фракций равенствами.

$$P_{\text{нас.пар}}(\text{CO}_2) = P_{\text{г.разд.}}(\text{H}_2) = P_{\text{г.разд.}}(\text{CO}_2) \quad (2.12)$$

по выводам (2.8, 2.9).

Перепишем  $P_{\text{г.разд.}}(\text{H}_2) = P_{\text{г.разд.}}(\text{CO}_2)$  с учётом 2.3:

$$\frac{N(\text{H}_2)}{V_{\text{г.разд.}}(\text{H}_2)} kT = \frac{N_{\text{г.разд.}}(\text{CO}_2)}{V_{\text{г.разд.}}(\text{CO}_2)} kT, \quad (2.13)$$

здесь и далее:  $N(\text{H}_2)$  – число молекул водорода в газовой смеси;  $V_{\text{г.разд.}}(\text{H}_2)$  – объём, занимаемый водородом в разделённом состоянии газовой смеси;  $N_{\text{г.разд.}}(\text{CO}_2)$  – число молекул углекислого газа в разделённом состоянии газовой смеси;  $V_{\text{г.разд.}}(\text{CO}_2)$  – объём, занимаемый углекислым газом в разделённом состоянии газовой смеси.

Рассмотрим неразделённое состояние газовой смеси.

При перемешивании газовых фракций водорода и углекислого газа число молекул водорода  $N(\text{H}_2)$  неизменно, т. к. водород не конденсируется и его количество в газовой смеси остаётся постоянным, число молекул углекислого газа примет значение  $N_{\text{г.см.}}(\text{CO}_2)$ . Объёмы, занимаемые молекулами углекислого газа  $V_{\text{г.см.}}(\text{CO}_2)$  и водорода  $V_{\text{г.см.}}(\text{H}_2)$ , станут равными:

$$V_{\text{г.см.}}(\text{CO}_2) = V_{\text{г.}}, \quad V_{\text{г.см.}}(\text{H}_2) = V_{\text{г.}}$$

Парциальное давление углекислого газа в газовой смеси будет равным:

$$\frac{N_{\text{г.см.}}(\text{CO}_2)}{V_{\text{г.}}} kT = P_{\text{нас.пар}}(\text{CO}_2), \quad (2.14)$$

т. к. это необходимое условие динамического равновесия жидкой углекислоты с углекислым газом в герметичном резервуаре.

Сравним (2.14) и (2.13), учитывая, что  $P_{\text{нас.пар}}(\text{CO}_2) = P_{\text{г.разд.}}(\text{CO}_2)$  см.(2.12):

$$\frac{N_{\text{г.см.}}(\text{CO}_2)}{V_{\text{г.}}} kT = \frac{N_{\text{г.разд.}}(\text{CO}_2)}{V_{\text{г.разд.}}(\text{CO}_2)} kT \quad (2.15)$$

Вывод (2.15) показывает, что для того, чтобы углекислый газ сохранил равновесие с жидкой фазой при его перемешивании с водородом, количество молекул углекислого газа в газовой смеси должно увеличиться пропорционально увеличению занимаемого им объёма от  $V_{\text{г.разд.}}(\text{CO}_2)$  до  $V_{\text{г.}}$ , т. к. парциальное давление углекислого газа при этом остаётся равным давлению насыщенного пара двуокиси углерода при данной температуре.

Давление неразделённой газовой смеси  $P_{\text{г.см.}}$  есть сумма парциальных давлений её составляющих (2.2):

$$P_{\text{г.см.}} = P_{\text{г.}}(\text{CO}_2) + P_{\text{г.}}(\text{H}_2) \quad (2.16)$$

$$P_{\text{г.см.}} = \frac{N_{\text{г.см.}}(\text{CO}_2)}{V_{\text{г.}}} kT + \frac{N(\text{H}_2)}{V_{\text{г.}}} kT \quad (2.17)$$

$$P_{\text{г.см.}} = P_{\text{нас.пар}}(\text{CO}_2) + \frac{N(\text{H}_2)}{V_{\text{г.}}} kT \quad (2.18)$$

Перепишем вывод (2.18) с учётом подстановки

$$\frac{N(H_2)}{V_{г.}} kT = kT \frac{N(H_2)}{V_{г. \text{ разд.}(H_2)}} \frac{V_{г. \text{ разд.}(H_2)}}{V_{г.}} = P_{\text{нас. пар}}(CO_2) \frac{V_{г. \text{ разд.}(H_2)}}{V_{г.}} ;$$

$$P_{г. \text{ см.}} = P_{\text{нас. пар}}(CO_2) + P_{\text{нас. пар}}(CO_2) \frac{V_{г. \text{ разд.}(H_2)}}{V_{г.}} \quad (2.19)$$

Основное уравнение давления для неразделённой газовой смеси:

$$P_{г. \text{ см.}} = P_{\text{нас. пар}}(CO_2) \cdot \left(1 + \frac{V_{г. \text{ разд.}(H_2)}}{V_{г.}}\right) \quad (2.20)$$

Давление газовой смеси водорода с углекислым газом при её переходе из состояния отдельных фракций к неразделённому состоянию увеличивается в

$$\frac{P_{г. \text{ см.}}}{P_{\text{нас. пар}}(CO_2)} = 1 + \frac{V_{г. \text{ разд.}(H_2)}}{V_{г.}} \quad (2.21)$$

число раз, которое лежит в пределах от 1 (при  $V_{г. \text{ разд.}(H_2)} \rightarrow 0$ ) до 2 (при  $V_{г. \text{ разд.}(H_2)} \rightarrow V_{г.}$ ).

Рассмотрим ситуацию, когда высота резервуара недостаточна велика для того, чтобы пренебречь градиентами газов, образованными действием гравитации.

Обозначим высоту резервуара  $H$ , а значения в пределах  $[0; H]$   $h$ .

Пусть  $n_{CO_2}(h)_{г. \text{ см.}}$ ,  $n_{H_2}(h)_{г. \text{ см.}}$  и  $n_{CO_2}(h)_{г. \text{ разд.}}$ ,  $n_{H_2}(h)_{г. \text{ разд.}}$  – функции концентраций углекислого газа и водорода по высоте резервуара соответственно для неразделённой и разделённой газовой смеси.

Рассмотрим две возможные ситуации:

$$1. \frac{dn_{CO_2}(h)_{г. \text{ см.}}}{dh} = 0, \frac{dn_{H_2}(h)_{г. \text{ см.}}}{dh} = 0; \text{ то есть градиенты концентраций по}$$

высоте для обоих газов равны нулю – газы распределены равномерно вследствие перемешивания, это неразделённая газовая смесь.

$$2. \frac{dn_{CO_2}(h)_{г. \text{ разд.}}}{dh} < 0, \frac{dn_{H_2}(h)_{г. \text{ разд.}}}{dh} > 0; \text{ то есть градиент концентрации по}$$

высоте для углекислого газа меньше нуля – углекислый газ убывает с высотой, для водорода – больше нуля, так как водород с высотой увеличивает свою концентрацию в составе газовой смеси, это – разделённая газовая смесь.

Поскольку функция  $n_{CO_2}(h)_{г. \text{ см.}}$  является постоянной функцией от  $h$ , то общее число  $N(CO_2)_{г. \text{ см.}}$  молекул равномерно распределённого углекислого газа в резервуаре объёмом  $V_{г.}$  можно рассчитать:

$$N(CO_2)_{г. \text{ см.}} = n_{CO_2}(h)_{г. \text{ см.}} \cdot V_{г.} \quad (2.22)$$

В этом случае при любой высоте  $h$  в герметичном резервуаре :

$n_{CO_2}(h)_{г. \text{ см.}} \cdot kT = P_{\text{нас. пар}}(CO_2)$  при заданной температуре  $T$ , так как это необходимое условие термодинамического равновесия жидкости и пара в герметичном резервуаре.

В случае убывания углекислого газа с высотой  $h$  общее число  $N(CO_2)_{г. \text{ разд.}}$  его молекул в резервуаре объёмом  $V_{г.}$  и высотой  $H$  можно рассчитать:

$$N(CO_2)_{г. \text{ разд.}} = \int_0^H n_{CO_2}(h)_{г. \text{ разд.}} dh \cdot P; \quad (2.23)$$

где  $n_{CO_2}(h)_{г. \text{ разд.}}$  – убывающая функция концентрации углекислого газа от высоты  $h$ ;  $P$  – площадь основания резервуара с вертикальными стенками.

При  $h = 0$ , то есть у поверхности жидкой фазы:

$n_{CO_2(0)}$  г.разд.  $kT = P_{нас.пар}(CO_2)$  при заданной температуре  $T$ , так как это необходимое условие термодинамического равновесия жидкости и пара в герметичном резервуаре.

При  $h > 0$ :  $n_{CO_2(h)}$  г.разд.  $kT < P_{нас.пар}(CO_2)$  в силу убывания концентрации углекислого газа с высотой под действием гравитации.

Сопоставляя (2.22) для равномерной и (2.23) для убывающей функций распределений углекислого газа от  $h$  в герметичном резервуаре имеем вывод:

$$N(CO_2)_{г.см.} > N(CO_2)_{г.разд.}$$

Количество молекул водорода в герметичном резервуаре остаётся неизменным для обеих ситуаций:  $N(H_2) = const.$

Общее число молекул в газовой смеси в неразделённом состоянии в герметичном резервуаре:

$$N_{г.см.} = N(CO_2)_{г.см.} + N(H_2) \quad (2.24)$$

Общее число молекул в разделённом состоянии газовой смеси в герметичном резервуаре:

$$N_{г.разд.} = N(CO_2)_{г.разд.} + N(H_2) \quad (2.25)$$

Очевидно, что если  $N(CO_2)_{г.см.} > N(CO_2)_{г.разд.}$ , то  $N_{г.см.} > N_{г.разд.}$ , следовательно давления в герметичном резервуаре при неразделённом состоянии газовой смеси ( $P_{г.см.}$ ) и разделённом состоянии ( $P_{г.разд.}$ ) соотносятся:

$$P_{г.см.} > P_{г.разд.}, \quad (2.26)$$

так как: 
$$P_{г.см.} = \frac{N_{г.см.}}{V_{г.}} \cdot kT \quad (2.27)$$

$$P_{г.разд.} = \frac{N_{г.разд.}}{V_{г.}} \cdot kT \quad (2.28)$$

#### Возможное использование разности давлений.

Допустим, что имеются два резервуара, в каждом из которых закачаны водород ( $H_2$ ) и углекислый газ ( $CO_2$ ), находящийся в равновесии «жидкость – пар». В первом резервуаре водород перемешивается с углекислым газом за счёт того, что конденсат его испаряется в верхней части резервуара, во втором – нет. Тогда во втором резервуаре под действием гравитации углекислый газ и водород будут делиться на две фракции – верхней фракции водорода, как более лёгкого газа (2 г/моль), и нижней фракции углекислого газа, как более тяжёлого (44 г/моль). Соединим эти два резервуара соединительными трубами так, чтобы стало возможным существование трёх токов, как это изображено на рисунке 3, ниже. Ток газовой смеси водорода с углекислым газом возникнет вследствие перепада давлений между резервуаром, где водород с углекислым газом перемешан (на рис 3 изображён слева), и резервуаром, где водород и углекислый газ под действием гравитации разделены на фракции (на рис 3 этот резервуар изображён справа).

В резервуаре, где водород с углекислым газом перемешан, давление газовой смеси будет равно по выводу (2.20):

$$P_{г.см.} = P_{нас.пар}(CO_2) \cdot \left(1 + \frac{V_{г.разд}(H_2)}{V_{г.}}\right)$$

В резервуаре, где газовая смесь действием тяжести разделена на фракции водорода и углекислого газа, давление будет равным по выводу (2.9) :

$$P_{г.разд.} = P_{нас.пар}(CO_2)$$

Остальные два тока – ток углекислого газа в жидкой фазе и ток газообразного водорода – есть обратные токи, осуществляемые за счёт тока газовой смеси водорода с углекислым газом, и необходимые для обеспечения непрерывности и цикличности процесса в целом.

Если перепад давления двух резервуаров считать постоянным и равным  $P$  ( $P = P_{г.см.} - P_{г.разд.}^1$ ), то работу 1 моля газовой смеси водорода с углекислым газом  $A_{г.см.}$  можно рассчитать по формуле:

$$A_{г.см.} = P \cdot V_{мольг.см.} + \frac{V_{кон.мольг.см.}}{V_{нач.мольг.см.}} \int P dV_{мольг.см.}, \quad (2.29)$$

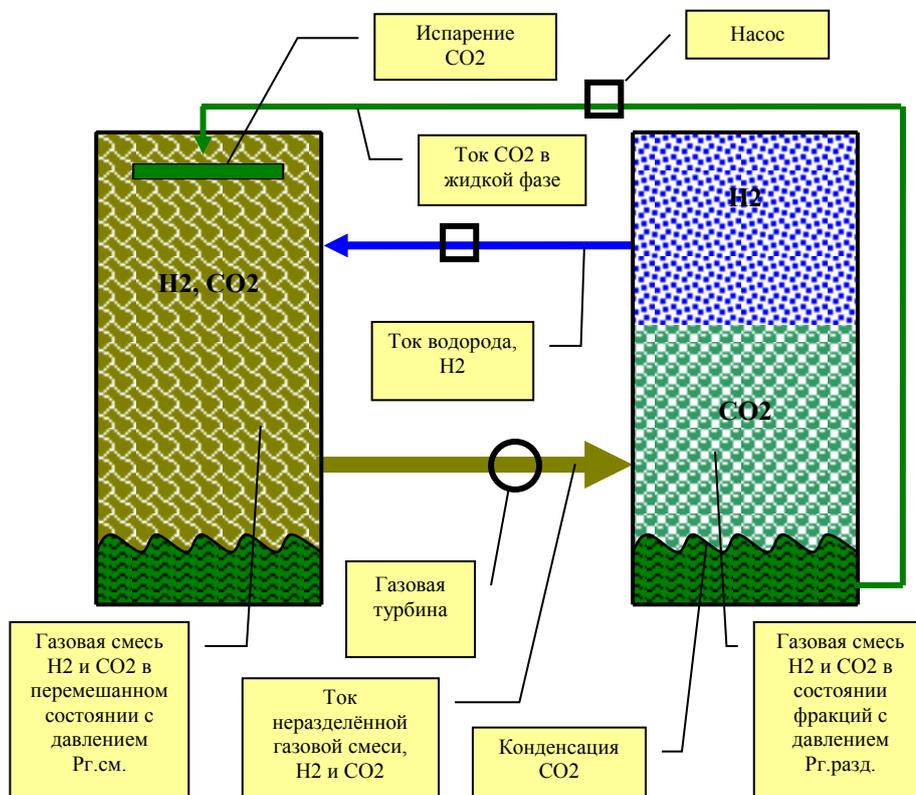


Рис 3.

т. е. работа 1 моля газовой смеси углекислого газа и водорода при переходе из резервуара с давлением  $P_{г.см.}$  в резервуар с давлением  $P_{г.разд.}$  равна работе перехода 1 моля газовой смеси – произведению перепада давления  $P$  в двух резервуарах на ход поршня, равный произведению длины хода на площадь поршня или объёму  $V_{мольг.см.}$  1 моля газовой смеси, плюс работа расширения 1 моля газовой смеси с давлением  $P_{г.см.}$  в резервуаре с давлением  $P_{г.разд.}$  с начальным и конечным объёмами  $V_{нач.мольг.см.}$  и  $V_{кон.мольг.см.}$ ,  $V_{нач.мольг.см.} = V_{мольг.см.}$

Работа углекислого газа, доля которого в 1 моле газовой смеси составляет  $n$ , будет равна:

$$A(CO_2) = A_{г.см.} \cdot n, \quad (2.30)$$

т. е. работа углекислого газа, содержащегося в 1 моле газовой смеси, при его переходе из резервуара с давлением  $P_{г.см.}$  в резервуар с давлением  $P_{г.разд.}$  кратна работе  $A_{г.см.}$  с коэффициентом кратности  $n$ , где  $n$ :

$$n = \frac{P_{нас.пар}(CO_2)}{P_{г.см.}} = \frac{V_{г.}}{V_{г.} + V_{г.разд.}(H_2)}, \quad (2.31)$$

здесь  $V_{г.разд.}(H_2)$  и  $V_{г.}$  – объёмы фракции водорода и газовой смеси в целом;  $P_{нас.пар}(CO_2)$  – давление насыщенного пара двуокиси углерода;  $P_{г.см.}$  – давление неразделённой газовой смеси.

<sup>1</sup>С учётом  $T_{исп.} < T_{конд.}$ :  $0 < P < P_{г.см.} - P_{г.разд.}$ .

Отстоявшийся действием силы тяжести водород необходимо вернуть из резервуара с давлением  $P_{г.разд.}$  в резервуар с давлением  $P_{г.см.}$ , доля которого в 1-м моле газовой смеси составляет  $(1 - n)$ , затратив при этом работу:

$$A(H_2) = A_{г.см.} \cdot (1 - n) \quad (2.32)$$

Конденсированную углекислоту также нужно вернуть из резервуара с давлением  $P_{г.разд.}$  в резервуар с давлением  $P_{г.см.}$  в его верхнюю часть, затратив при этом работу:

$$A_{конд.}(CO_2) = P \cdot V_{моль.п.конд.}(CO_2) + \rho \cdot V_{моль.п.конд.}(CO_2) \cdot h \cdot g, \quad (2.33)$$

здесь:  $P$  – перепад давления в обоих резервуарах;  $V_{моль.п.конд.}(CO_2)$  – объём количества жидкой углекислоты, входящей в состав 1-го моля газовой смеси в виде углекислого газа;  $\rho$  – плотность жидкой углекислоты;  $h$  – высота, на которой испаряется жидкая углекислота в резервуаре неразделённой газовой смеси;  $g$  – ускорение свободного падения.

Все три тока – ток газовой смеси углекислого газа с водородом (2.29), обратный ток отстоявшегося водорода (2.32) и обратный ток конденсированного углекислого газа (2.33) – протекают одновременно. Просуммируем их с учётом знаков и получим основное выражение циклического непрерывного процесса в расчёте на 1 моль газовой смеси, поступающий в резервуар с разделённой газовой смесью с давлением  $P_{г.разд.}$  из резервуара с неразделённой газовой смесью с давлением  $P_{г.см.}$ :

$$A_{потр.} = A_{г.см.} - A(H_2) - A_{конд.}(CO_2), \quad (2.34)$$

где  $A_{потр.}$  есть работа, которую можно отвести потребителю.

Запишем полученное выражение с учётом (2.32):

$$A_{потр.} = A_{г.см.} - A_{г.см.} \cdot (1-n) - A_{конд.}(CO_2) \quad (2.35)$$

$$A_{потр.} = A_{г.см.} \cdot n - A_{конд.}(CO_2) \quad (2.36)$$

С учётом (2.30):

$$A_{потр.} = A(CO_2) - A_{конд.}(CO_2) \quad (2.37)$$

Обозначим отношение занимаемого объёма  $n$  моля жидкой углекислоты к объёму  $n$  моля того же вещества в газовой фазе величиной  $d$ , тогда отношение работ  $n$  моля углекислого газа для двух фаз при одной и той же разности давлений  $P$  можно приблизительно приравнять к  $d$ :

$$d = \frac{V_{моль.п.конд.}(CO_2)}{V_{моль.п.г.разд.}(CO_2)} \approx \frac{A_{конд.}(CO_2)}{A(CO_2)}, \quad (2.38)$$

т. к. объёмы  $V_{моль.п.конд.}(CO_2)$  и  $V_{моль.п.г.разд.}(CO_2)$ , помноженные на перепад давления  $P$ , дают соответственно работы  $\approx A_{конд.}(CO_2)$  без учёта подъёма на высоту  $h$  и  $\approx A(CO_2)$  без учёта работы расширения газа, см. (2.29), (2.30) и (2.33).

Основное выражение непрерывного циклического процесса (2.34) можно записать с учётом  $d$  и (2.37) с некоторым приближением в виде:

$$A_{потр.} \approx A(CO_2) \cdot (1-d) \quad (2.39)$$

Или с учётом (2.30):

$$A_{потр.} \approx A_{г.см.} \cdot n(1-d) \quad (2.40)$$

Выражение (2.40) показывает, что  **$A_{потр.} > 0$** , т. к.  $n$  может принимать значения от 0.5 до 1 (следует из 2.21 и 2.31),  $d$  может принимать значения от 0 до 0.1, приблизительно при температуре  $T$ , меньшей критической температуры для газа, находящегося в равновесии «жидкость – пар»,  $A_{г.см.} > 0$  по условию.

Основное выражение циклического непрерывного процесса (2.34) с учётом коэффициентов полезного действия  $\eta_1$  газовой турбины (на рис. 3 обозначена кружком), с помощью которой энергия тока газовой смеси преобразуется в удобный вид энергии для потребителя, и насосов  $\eta_2$  и  $\eta_3$  (на рис. 3 обозначены квадратиками), которые возвращают газообразный водород и жидкую углекислоту в резервуар неразделённой газовой смеси, примет вид:

$$A_{\text{потр.}} = A_{\text{г.см.}} \cdot \eta_1 - \frac{A(\text{H}_2)}{\eta_2} - \frac{A_{\text{конд.}}(\text{CO}_2)}{\eta_3} \quad (2.41)$$

Обозначим резервуары разделённой и неразделённой газовых смесей вместе с соединительными трубами и встроенными в них газовой турбиной и насосами понятием «система». Пусть система будет теплоизолирована от окружающей среды.

При отводе из теплоизолированной системы энергии  $A_{\text{потр.}}$  система охладится на  $\Delta T$  градусов:

$$\Delta T = \frac{A_{\text{потр.}}}{C}, \quad (2.42)$$

где  $C$  – теплоёмкость системы в целом.

Если первоначально температура системы была равна температуре окружающей среды  $T_{\text{окр.}}$ , то при отводе из системы энергии  $A_{\text{потр.}}$  в системе установится температура  $T_{\text{с}}$ :

$$T_{\text{с}} = T_{\text{окр.}} - \Delta T \quad (2.43)$$

Энергию, отведённую потребителю, можно восполнить теплообменом системы с окружающей средой, т. к.:

$$T_{\text{с}} < T_{\text{окр.}} \quad (2.44)$$

Если температура системы ниже температуры окружающей среды, то значение температуры системы может оставаться постоянным при отводе из системы полезной работы потребителю в результате теплообмена системы с окружающей средой.

## **Выводы по разделу 2.**

1. Испарение тяжёлого пара жидкости в атмосфере лёгкого газа внутри герметичного резервуара, где лёгкий газ с паром равномерно перемешан, создаёт повышенное давление по отношению к резервуару, в котором тяжёлые пары жидкости и лёгкий газ разделены отстаиванием.
2. Благодаря существованию разности давлений в двух резервуарах, в одном из которых газовая смесь не разделена, а в другом – разделена отстаиванием, между ними может создаваться ток газовой смеси, который за вычетом работ на возврат компонентов – лёгкого и конденсированного тяжёлого газов – способен совершать полезную работу для потребителя.
3. Если система, на основе процесса испарения - конденсации, совершает работу над окружающей средой, т. е. отводится энергия потребителю, то она охлаждается. Постоянство температуры охлаждающейся системы можно обеспечить теплообменом её с окружающей средой при условии, что температура системы при теплообмене ниже температуры окружающей среды.

Эмиль Кутин, Санкт-Петербург, 12. 01. 2005

Последнее редактирование 18. 12. 2005

Об авторе.

Кутин Эмиль Владимирович, род. 18 ноября 1972 года в Санкт-Петербурге, окончил Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий в 2000 году. Проживает по адресу: Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Науки, д. 49, кв. 59.

Сайт автора, где помещена данная статья:

**[www.energy2000.narod.ru](http://www.energy2000.narod.ru)**

Отзывы, пожелания и замечания по поводу статьи присылайте на email:

**[energy2000@narod.ru](mailto:energy2000@narod.ru)**