

Практическое задание № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ НАРУЖНОЙ И ВНУТРЕННЕЙ СРЕДЫ

Для расчетов количеств выделяющихся вредных веществ из технологического оборудования в атмосферный воздух необходимо знать основные свойства химических соединений и их смесей.

В приложении I приведены характеристические константы чистых веществ, которые используются для расчета свойств химических соединений и их смесей.

При температуре, отличающейся от 20 °С, плотность жидкости рассчитывается по формуле:

$$\rho_{i,ж} = \rho_{o,ж} \frac{1}{1 + \beta_i(T - T_0)}, \quad (1.1)$$

где β_i – коэффициент температурного расширения, выражающий относительное увеличение объема жидкости при увеличении температуры на 1 °С.

Коэффициент температурного расширения капельных жидкостей незначителен. Для практических расчетов количеств вредных веществ, выделяющихся из оборудования и трубопроводов, для жидкостей можно принять:

$$\rho_{тж} = \rho_{ож}$$

Плотность газа или пара при $t = 0$ °С и $P_o = 100$ кПа рассчитывают по следующей формуле.:

$$\rho_o = \frac{M}{22,4}, \text{ кг/м}^3 \quad (1.2)$$

где M – относительная молекулярная масса вещества, кг/(кмоль);

22,4 – объем 1 кмоль газа или пара при НУ, м³.

Для определения плотности газа или пара при температуре $t \neq 0$ °С и давлении $P \neq 100$ кПа используют уравнение Клапейрона:

$$\rho_{t_2} = \rho_{o_2} \frac{T_o \cdot P}{T \cdot P_o} = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{273 \cdot P}{P_o \cdot T} \quad (1.3)$$

Динамическую вязкость газов и паров при $t \neq 0$ °С рассчитывают по формуле:

$$\mu_{t_2} = \mu_{o_2} \frac{273 + Sat}{T + Sat} \left(\frac{T}{T_o} \right)^{1,5}, \quad (1.4)$$

где Sat – константа Сатерленда (Приложение).

В практических расчетах для расчета динамической вязкости жидкости $\mu_{тж}$ при $t \neq 0$ °С при определении количества вредных веществ, выделяющихся через неплотности соединений трубопроводов и оборудования, можно использовать формулу Пуазейля:

$$\mu_{тж} = \frac{\mu_{ож}}{1 + 0,0368t + 0,000212t^2} \quad (1.5)$$

Изменение динамической вязкости с изменением температуры является существенным. Так, с увеличением температуры от 0 до 100 °С вязкость воды уменьшается в 7 раз.

Кинематическая вязкость ν (м²/с) связана с динамической вязкостью μ соотношением:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (1.6)$$

где μ - динамическая вязкость, Па·с; ρ - плотность, кг/м³.

Коэффициент диффузии, который необходим для расчетов количества выделяющихся вредных веществ из оборудования, можно рассчитать по следующей зависимости:

$$D_o = \frac{0,8}{\sqrt{M}} \cdot 0,36, \quad \text{м}^2 / \text{ч} \quad (1.7)$$

где D_o – коэффициент диффузии при $t = 0$ °С и $P_o = 100$ кПа.

Коэффициент диффузии при $t \neq 0$ °С и $P \neq 100$ кПа определяют по формуле:

$$D_t = D_o \cdot \frac{P_o}{P} \left(\frac{T}{T_o} \right)^2, \quad (1.8)$$

где $P_o = 100$ кПа; $T_o = 273$ К;

P и T – давление и температура в оборудовании или трубопроводе.

Чтобы найти коэффициент диффузии при любой температуре, используют формулу:

$$D_t = D_{20} \left[+ 0,02(t - 200) \right] \quad (1.9)$$

Часто на практике встречаются не чистые вещества, а их смеси. Состав среды в оборудовании или трубопроводе задается в массовых, объемных или мольных долях.

Мольная доля компонента:

$$N_i = \frac{\text{число молей компонента}}{\text{число молей всех компонентов смеси}}. \quad (1.10)$$

Массовые доли компонентов пересчитывают в мольные - по формуле:

$$N_i = \frac{a_i / M_i}{\sum (a_i / M_i)}, \quad (1.11)$$

где N_i – мольная доля компонента;

a_i – массовая доля компонента;

M_i – молекулярная масса компонента.

Когда в трубопроводе или оборудовании находится смесь жидкостей, плотность этой смеси определяют по выражению:

$$\rho_{\text{см.ж}} = \frac{1}{\sum (a_i / \rho_{i,\text{ж}})}, \quad (1.12)$$

где $\rho_{i,\text{ж}}$ – плотность компонента.

Динамическая вязкость смеси нормальных жидкостей определяется из выражения (Па·с):

$$\lg \mu_{см ж} = \sum (N_i \cdot \lg \mu_{i ж}), \quad (1.13)$$

где N_i – мольная доля компонента в смеси;

$\mu_{i ж}$ – соответствующий коэффициент динамической вязкости.

Если в трубопроводе или оборудовании находится смесь газов или парогазовоздушная смесь, то вязкость газовых (паровых) смесей можно вычислить по приближенной формуле:

$$\mu_{см г} = \frac{M_{см г}}{\sum (v_{i г} \cdot M_i / \mu_{i г})}, \quad (1.14)$$

где $M_{см г}$, M_i – молекулярные массы смеси газов и отдельных компонентов;

v_i – объемные (молярные) доли компонентов в смеси ($v_{i г} = N_{i г}$),

$\mu_{см г}$, μ_i – коэффициенты динамической вязкости смеси газов и отдельных компонентов.

$$M_{см г} = \sum (N_{i г} \cdot M_i). \quad (1.15)$$

Кинематическая вязкость газовой смеси:

$$\nu_{см} = \frac{1}{\sum (N_i / \nu_i)}, \quad м^2 / с \quad (1.16)$$

или

$$\nu_{см} = \mu_{см г} / \rho_{см г}, \quad (1.17)$$

где ν_i – кинематическая вязкость компонента газовой смеси.

Плотность смеси газов определяется по формуле (кг/м³):

$$\rho_{см г} = \sum (N_{i г} \cdot \rho_{i г}), \quad (1.18)$$

где N_i – мольные доли компонентов газовой смеси;

$\rho_{i г}$ – плотность соответствующих компонентов.

При расчете количеств вредных веществ, выделяющихся со свободной поверхности жидкости, необходимо помнить, что они состоят из смеси веществ, состав которых зависит от температуры, давления, а так же от объемной (мольной) доли каждого вещества в растворе.

Давление газовой смеси над раствором равно:

$$P_{см} = \sum P_i, \quad кг / м^2 \quad (1.19)$$

где P_i – парциальное давление компонента смеси.

Согласно закону Рауля парциальное давление компонента, входящего в состав смеси, определяется по формуле:

$$P_i = N_i \cdot P_i^H, \quad (1.20)$$

где N_i – мольная доля компонента в растворе;

P_i^H – давление насыщенного пара вещества над чистым компонентом при заданной температуре.

Зависимость давления насыщенного пара чистого вещества от температуры описывается уравнением:

$$\lg P_i^H = A - \frac{B}{(C + t)}, \text{ мм рт ст} \quad (1.21)$$

или

$$\lg P_i^H = A - \frac{B}{T}, \quad (1.22)$$

значения эмпирических коэффициентов А, В, С (константы Антуана) для чистых веществ приведены в Приложении.

Парциальное давление насыщенных водяных паров в наружной среде (т.е. в газовой фазе) определяется по формуле:

$$\lg P_{H_2O}^H = 0,622 + \frac{7,5 \cdot t}{(238 + t)}, \quad (1.23)$$

где t – температура наружной среды, °С.

Парциальное давление водяных паров при заданной влажности наружной среды определяется по формуле:

$$P_{H_2O} = P_{H_2O}^H \cdot \varphi, \text{ мм рт ст} \quad (1.24)$$

где φ - влажность наружной среды, %.

Зная объемный или массовый состав смеси в оборудовании и данные о давлении насыщенных паров веществ, составляющих смесь, можно определить количественный состав газовой смеси над поверхностью жидкости. Концентрацию насыщенных паров компонента, выраженную в единицах давления, можно пересчитать в объемную концентрацию по следующей формуле:

$$C_i = \frac{16 \cdot P_i \cdot M_i \cdot 1000}{(273 + t) \cdot 133,3}, \text{ мг/м}^3 \quad (1.25)$$

где P_i – парциальное давление компонента газовой смеси при заданной температуре и давлении, Па;

M_i – молекулярная масса данного вещества; 1 мм рт ст = 133,322 Па.

Пример 1.1. Определить параметры среды в производственном помещении.

Исходные данные. Влажность в помещении $\varphi = 60\%$; концентрация дихлорэтана в воздухе $C_d = 5 \text{ мг/м}^3$; температура $t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$; давление среды $B = 101,3 \text{ кПа}$.

Решение.

Относительные молекулярные массы составляющих среды:

$$M_B = 28,96; \quad M_{H_2O} = 18,015; \quad M_d = 98,97.$$

Давление насыщения водяных паров в воздухе производственного помещения:

$$\lg P_{H_2O}^H = 0,622 + \frac{7,5 \cdot t}{238 + t};$$

$$\lg P_{H_2O}^H = 0,662 + \frac{7,5 \cdot 16}{238 + 16} = 1,0944$$

$$P^H_{H_2O} = 12,4 \text{ мм рт. ст. или } 1653 \text{ Па.}$$

Давление водяных паров при заданной влажности в помещении:

$$P^H_{H_2O} = P^H_{H_2O} \cdot \varphi$$

$$P_{H_2O} = 1653 \cdot \frac{60}{100} = 992 \text{ Па.}$$

Парциальное давление примеси (дихлорэтана):

$$P_t = \frac{C_t \cdot (73 + t) \cdot 133,3}{M_t \cdot 16 \cdot 1000}; \quad P_d = \frac{(73 + 16) \cdot 5 \cdot 133,3}{98,97 \cdot 16 \cdot 1000} = 0,12 \text{ Па.}$$

Парциальное давление основного компонента наружной среды – воздуха:

$$P_B = B - \sum P_i; \quad P_B = 101325 - (92 + 0,12) \approx 100333 \text{ Па.}$$

Мольные доли составляющих наружную среду:

$$N_i = P_i / B;$$

$$N_d = 100333 / 101325 = 0,9902; \quad N_{H_2O} = 993 / 101325 = 0,00979;$$

$$N_t = 0,12 / 101325 = 0,00001$$

$$\sum N_i = 1$$

Концентрация составляющих наружной среды, мг/м³:

$$C_i = \frac{16 P_i M_i \cdot 1000}{(73 + t) \cdot 133,3};$$

$$C_B = \frac{16 \cdot 100333 \cdot 28,96 \cdot 1000}{(73 + 16) \cdot 133,3} = 1206800;$$

$$C_{H_2O} = \frac{16 \cdot 992 \cdot 18,015 \cdot 1000}{(73 + 16) \cdot 133,3} = 7422;$$

$$C_d = \frac{16 \cdot 0,12 \cdot 98,97 \cdot 1000}{(73 + 16) \cdot 133,3} = 5,0.$$

Произведение $N_i \cdot P_i$ для газовых составляющих наружной среды, мг/м³ (кг/м³):

$$N_B \cdot P_B = 1206800 \quad (1,207);$$

$$N_{H_2O} \cdot P_{H_2O} = 7422 \quad (0,0074).$$

Плотность наружной среды:

$$\rho_{CM} = \sum (N_i \cdot \rho_i)$$

$$\rho_{CM} = 1,207 + 0,0074 + 0,000005 \approx 1,214 \text{ кг/м}^3.$$

Динамическая вязкость газовых составляющих при $t = 0$ °С, Па·с, (Приложение):

$$\mu_{oB} = 171 \cdot 10^{-2}; \quad \mu_{oH_2O} = 82 \cdot 10^{-2}; \quad \mu_{oD} = 61 \cdot 10^{-2}.$$

Константы Сатерленда (Приложение):

$$Sat_B = 107; \quad Sat_{H_2O} = 82 \cdot 10^{-2}; \quad Sat_D = 524.$$

Динамическая вязкость газовых составляющих при $t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$, Па·с:

$$\mu_t = \mu_o \cdot \frac{273 + Sat}{T + Sat} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5};$$

$$\mu_B = 171 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{273 + 107}{(273 + 16) + 107} \left(\frac{289}{273} \right)^{1,5} = 177,38 \cdot 10^{-2};$$

$$\mu_{H_2O} = 82 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{273 + 673}{289 + 673} \left(\frac{289}{273} \right)^{1,5} = 87,35 \cdot 10^{-2};$$

$$\mu_D = 61 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{273 + 524}{289 + 524} \left(\frac{289}{273} \right)^{1,5} = 64,6 \cdot 10^{-2}.$$

Относительная молекулярная масса смеси газов наружной среды:

$$M_{см} = \sum (N_i \cdot M_i);$$

$$M_{см} = 28,96 \cdot 0,9902 + 0,00979 \cdot 18,015 + 0,000001 \cdot 98,97 = 28,85$$

Динамическая вязкость смеси газов наружной среды:

$$\mu_{см} = \frac{M_{см}}{\sum \frac{(N_i \cdot M_i)}{\mu_i}};$$

$$\mu_{см} = \frac{28,85}{\frac{0,9902 \cdot 28,96}{177,38 \cdot 10^{-2}} + \frac{0,00979 \cdot 18,015}{87,35 \cdot 10^{-2}} + \frac{0,000001 \cdot 98,97}{64,6 \cdot 10^{-2}}} = 176,25 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Кинематическая вязкость смеси газов наружной среды:

$$v_{см} = \frac{\mu_{см}}{\rho_{см}}$$

$$v_{см} = \frac{176,25 \cdot 10^{-2}}{1,214} = 145,18 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Коэффициент диффузии компонентов наружной среды при $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ и $P = 101308 \text{ Па}$, $\text{м}^2/\text{ч}$:

$$D = \frac{0,8}{\sqrt{M}} \cdot 0,36;$$

$$D_{oB} = \frac{0,8}{\sqrt{28,96}} \cdot 0,36 = 0,0535;$$

$$D_{oH_2O} = \frac{0,8}{\sqrt{18,015}} \cdot 0,36 = 0,0679; \quad D_{oD} = \frac{0,8}{\sqrt{98,97}} \cdot 0,36 = 0,0289.$$

Коэффициент диффузии компонентов наружной среды при $t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ и $P = 101325 \text{ Па}$, $\text{м}^2/\text{ч}$:

$$D_t = D_o \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^2 \frac{101308}{P};$$

$$D_B = 0,0535 \cdot \left(\frac{273+16}{273} \right)^2 \frac{101308}{101325} = 0,0599;$$

$$D_{H_2O} = 0,0679 \cdot \left(\frac{273+16}{273} \right)^2 \cdot \frac{101308}{101325} = 0,0761;$$

$$D_{\ddot{A}} = 0,0289 \cdot \left(\frac{273+16}{273} \right)^2 \cdot \frac{101308}{101325} = 0,0324.$$

Пример 1.2. Определить параметры внутренней среды в трубопроводе, транспортирующем газовую смесь.

Исходные данные. Давление наружной среды $B = 101325$ Па; состав смеси, % масс.: водород 58,9, $\alpha_{H_2} = 0,589$; оксид углерода 7,1, $\alpha_{CO} = 0,071$; метан 34, $\alpha_{CH_4} = 0,34$. Температура газовой смеси $t = 50$ °С. Избыточное давление в трубопроводе $P_{изб} = 101325$ Па.

Решение.

Молекулярные массы составляющих газовой смеси:

$M_{H_2} = 2$; $M_{CO} = 28$; $M_{CH_4} = 16$.

Объемные доли составляющих газовой смеси:

$$N_i = \frac{\alpha_i / M_i}{\sum (\alpha_i / M_i)};$$

$$N_{H_2} = \frac{0,589/2}{0,589/2 + 0,071/28 + 0,34/16} = 0,925;$$

$$N_{CH_4} = \frac{0,34/16}{0,319} = 0,066;$$

$$N_{CO} = \frac{0,071/28}{0,319} = 0,009.$$

Абсолютное давление газовой смеси в трубопроводе:

$$P_{абс} = B + P_{изб}; \quad P_{абс} = 101325 + 101325 = 202650 \text{ Па}.$$

Парциальное давление составляющих газовой смеси, Па:

$$P_i = n_i \cdot P_{абс};$$

$$P_{H_2} = 202650 \cdot 0,925 = 187451;$$

$$P_{CO} = 202650 \cdot 0,009 = 1824; \quad P_{CH_4} = 202650 \cdot 0,066 = 13745.$$

Концентрации составляющих газовой смеси, мг/м³:

$$C_i = \frac{16 \cdot P_i \cdot M_i \cdot 1000}{(273 + t) \cdot 133,3};$$

$$C_{H_2} = \frac{16 \cdot 187451 \cdot 2 \cdot 1000}{(273 + 50) \cdot 133,3} = 139317;$$

$$C_{CO} = \frac{16 \cdot 1824 \cdot 28 \cdot 1000}{(273 + 50) \cdot 133,3} = 18979;$$

$$C_{CH_4} = \frac{16 \cdot 13745 \cdot 16 \cdot 1000}{(273 + 50) \cdot 133,3} = 81724.$$

Произведение $N_i \cdot \rho_i$ для составляющих газовой смеси, мг/м³ (кг/м³):

$$N_{H_2} \cdot \rho_{H_2} = 139317 \text{ (0,1393)}; \quad N_{CO} \cdot \rho_{CO} = 18979 \text{ (0,0189)};$$

$$N_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4} = 81724 \text{ (0,0817)}.$$

Плотность газовой смеси в трубопроводе:

$$\rho_{см} = \sum(N_i \cdot \rho_i);$$

$$\rho_{см} = 0,1393 + 0,0189 + 0,0817 = 0,24 \text{ кг/м}^3.$$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси при $t = 0$ °С и $P_o = 101308$ Па, Па·с:

$$\mu_{oH_2} = 4,9 \cdot 10^{-6}; \quad \mu_{oCO} = 17,15 \cdot 10^{-6}; \quad \mu_{oCH_4} = 10,29 \cdot 10^{-6}$$

Константы Сатерленда:

$$Sat_{H_2} = -528; \quad Sat_{CO} = 116; \quad Sat_{CH_4} = 118.$$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси при $t = 50$ °С, Па·с:

$$\mu_i = \mu_o \cdot \frac{273 + Sat}{T + Sat} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5};$$

$$\mu_{H_2} = 4,9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{273 + (-528)}{273 + 50 + (-528)} \cdot \left(\frac{273 + 50}{273} \right)^{1,5} = 7,84 \cdot 10^{-6};$$

$$\mu_{CO} = 17,15 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{273 + 116}{273 + 50 + 116} \cdot \left(\frac{273 + 50}{273} \right)^{1,5} = 20,10 \cdot 10^{-6};$$

$$\mu_{CH_4} = 10,29 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{273 + 118}{273 + 50 + 118} \cdot \left(\frac{273 + 50}{273} \right)^{1,5} = 12,00 \cdot 10^{-6}.$$

Молекулярная масса смеси газов в трубопроводе:

$$M_{см} = \sum(N_i \cdot M_i);$$

$$M_{см} = (0,925 \cdot 2) + (0,009 \cdot 28) + (0,066 \cdot 16) = 3,2.$$

Динамическая вязкость смеси газов в трубопроводе:

$$\mu_{см} = M_{см} / \sum \left(\frac{N_i \cdot M_i}{\mu_{ti}} \right);$$

$$\mu_{см} = \frac{3,2}{0,925 \cdot 2 / (7,84 \cdot 10^{-6}) + 0,009 \cdot 28 / (20 \cdot 10^{-6}) + 0,066 \cdot 16 / (12 \cdot 10^{-6})} =$$

$$= 9,51 \cdot 10^{-6}, \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Кинематическая вязкость смеси газов в трубопроводе:

$$\nu_{см} = \frac{\mu_{см}}{\rho_{см}}$$

$$\nu_{см} = \frac{9,51 \cdot 10^{-6}}{0,24} = 39,61 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Коэффициенты диффузии составляющих газовой смеси при $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ и $P_0 = 101308 \text{ Па}$, $\text{м}^2/\text{ч}$:

$$D_o = \frac{0,8}{\sqrt{M}} \cdot 0,36; \quad D_{oH_2} = \frac{0,8}{\sqrt{2}} \cdot 0,36 = 0,204$$

$$D_{oCO} = \frac{0,8}{\sqrt{28}} \cdot 0,36 = 0,054 \quad D_{oCH_4} = \frac{0,8}{\sqrt{16}} \cdot 0,36 = 0,072.$$

Коэффициенты диффузии составляющих газовой смеси при $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ и $P = 202650 \text{ Па}$, $\text{м}^2/\text{ч}$:

$$D_i = D_o \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^2 \cdot \frac{101308}{P};$$

$$D_{H_2} = 0,204 \cdot \left(\frac{273 + 50}{273} \right)^2 \cdot \frac{101308}{202650} = 0,143;$$

$$D_{CO} = 0,054 \cdot \left(\frac{273 + 50}{273} \right)^2 \cdot \frac{101308}{202650} = 0,038;$$

$$D_{CH_4} = 0,072 \cdot \left(\frac{273 + 50}{273} \right)^2 \cdot \frac{101308}{202650} = 0,050.$$

Пример 1.3. Определить параметры среды над открытой поверхностью жидкости в наружной среде.

Исходные данные. Давление наружной среды $P = 101325 \text{ Па}$. Состав жидкости, % масс.: вода 40, $\alpha_{H_2O} = 0,4$; бензол 30, $\alpha_B = 0,3$; дихлорэтан 30, $\alpha_D = 0,3$. Температура жидкости $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Наружная среда – воздух. Влажность воздуха $\varphi = 60 \text{ } \%$. Температура воздуха $t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$.

Молекулярные массы составляющих среды: $M_{H_2O} = 18,02$; $M_B = 78,1$; $M_D = 98,97$; $M_B = 28,96$.

Решение.

Мольные доли составляющих компонентов жидкости:

$$N_i = \frac{\alpha_i / M_i}{\sum (\alpha_i / M_i)};$$

$$N_{H_2O} = \frac{0,4 / 18,02}{0,4 / 18,02 + 0,3 / 78,1 + 0,3 / 98,97} = 0,7637;$$

$$N_B = \frac{0,3/78,1}{0,4/18,02 + 0,3/78,1 + 0,3/98,97} = 0,1321;$$

$$N_D = \frac{0,3/98,97}{0,4/18,02 + 0,3/78,1 + 0,3/98,97} = 0,1042.$$

Из Приложения находим эмпирические коэффициенты А, В, С для каждого компонента смеси:

Вода	A = 7,9608;	B = 1678,0;	C = 230,0;
Бензол	A = 6,9120;	B = 1214,6;	C = 221,2;
Дихлорэтан	A = 7,1840;	B = 1358,5;	C = 232,0.

Давление насыщенного пара чистого вещества при заданной температуре:

$$\lg P_i^H = A - \frac{B}{(C+t)}, \quad \text{мм рт ст}$$

$$\lg P_{H_2O}^H = 7,9608 - 1678/(230+40) = 1,746;$$

$$P_{H_2O}^H = 56,7 \text{ мм рт ст, или } 7541,1 \text{ Па};$$

$$\lg P_B^H = 6,912 - 1214,6/(221,2+40) = 2,262;$$

$$P_B^H = 182,5 \text{ мм рт ст, или } 24\,272,5 \text{ Па};$$

$$P_D^H = 7,184 - 1358,5/(232+40) = 2,190;$$

$$P_D^H = 155 \text{ мм рт ст, или } 20\,615 \text{ Па}.$$

Парциальное давление паров компонента над смесью жидкостей:

$$P_i = N_i \cdot P_i^H;$$

$$P_{H_2O} = 7541,1 \cdot 0,7637 = 5759,14 \text{ Па};$$

$$P_B = 24\,272,5 \cdot 0,1321 = 3206,4 \text{ Па};$$

$$P_D = 20\,615 \cdot 0,1042 = 2148,04 \text{ Па}.$$

Парциальное давление основного газового компонента – воздуха:

$$P_B = 101325 - (5759,14 + 3206,4 + 2148,0) = 90\,210 \text{ Па}.$$

Объемные (мольные) доли газовых составляющих над жидкостью:

$$v_i = \frac{P_i}{P_{abc}};$$

$$v_{H_2O} = 5759,14/101325 = 0,0568;$$

$$v_B = 3206,4/101325 = 0,0316;$$

$$v_D = 2148,04/101325 = 0,0212;$$

$$v_B = 90\,210/101325 = 0,8903.$$

Концентрации составляющих газовой смеси над жидкостью:

$$C_i = \frac{16 \cdot P_i \cdot M_i \cdot 1000}{(273+t) \cdot 133,3}, \quad \text{мг/м}^3$$

$$C_{H_2O} = \frac{16 \cdot 5759,14 \cdot 18,02 \cdot 1000}{(273+40) \cdot 133,3} = 39876;$$

$$C_B = \frac{16 \cdot 3206,4 \cdot 78,10 \cdot 1000}{(273+40) \cdot 133,3} = 96258;$$

$$C_D = \frac{16 \cdot 2148,04 \cdot 98,97 \cdot 1000}{(273+40) \cdot 133,3} = 81710.$$

Произведение $v_i \cdot \rho_i$ для составляющих газовой смеси над жидкостью, мг/м³ (кг/м³):

$$v_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} = 39876 \quad (0,0398); \quad v_B \cdot \rho_B = 96258 \quad (0,0963);$$

$$v_D \cdot \rho_D = 81710 \quad (0,0817); \quad v_B \cdot \rho_B = 997000 \quad (0,997).$$

Плотность газовой смеси над жидкостью (с учетом температуры жидкости):

$$\rho_{см} = \sum (v_i \cdot \rho_i);$$

$$\rho_{см} = (0,0398 + 0,0963 + 0,0817 + 0,997) \cdot 10^{-6} = 1,215 \quad \text{кг/м}^3.$$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси над жидкостью при $t = 0$ °C (Приложение), Па·с:

$$\mu_{o_{H_2O}} = 82 \cdot 10^{-7}; \quad \mu_{o_B} = 70 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_{o_D} = 61 \cdot 10^{-7}; \quad \mu_{o_B} = 171 \cdot 10^{-7}.$$

Константы Сатерленда (Приложение):

$$Sat_{H_2O} = 673; \quad Sat_B = 380; \quad Sat_D = 524; \quad Sat_B = 107.$$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси над жидкостью при $t = 40$ °C, Па·с:

$$\mu_i = \mu_o \cdot \frac{273 + Sat}{(273+t) + Sat} \cdot \left(\frac{273+t}{273} \right)^{1,5};$$

$$\mu_{H_2O} = 82 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{273+673}{313+673} \cdot \left(\frac{313}{273} \right)^{1,5} = 96,58 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_B = 70 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{273+380}{313+380} \cdot \left(\frac{313}{273} \right)^{1,5} = 80,97 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_D = 61 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{273+524}{313+524} \cdot \left(\frac{313}{273} \right)^{1,5} = 71,30 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_B = 171 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{273+107}{313+107} \cdot \left(\frac{313}{273} \right)^{1,5} = 189,93 \cdot 10^{-7}.$$

Молекулярная масса смеси газов над жидкостью:

$$M_{см} = \sum (v_i \cdot M_i);$$

$$M_{см} = 0,0568 \cdot 18,02 + 0,0316 \cdot 78,1 + 0,0212 \cdot 98,97 + 0,8903 \cdot 28,96 = 31,37.$$

Динамическая вязкость смеси газов над жидкостью, Па·с:

$$\mu_{см} = \frac{M_{см}}{\sum \left(\frac{v_i \cdot M_i}{\mu_i} \right)};$$

$$\mu_{см} = \frac{31,37}{0,0568 \cdot 18,02 / (96,58 \cdot 10^{-7}) + 0,0316 \cdot 78,1 / (80,97 \cdot 10^{-7}) + 0,0212 \cdot 98,97 / (71,30 \cdot 10^{-7}) + 0,8903 \cdot 28,96 / (189,93 \cdot 10^{-7})} = 160 \cdot 10^{-7}.$$

Кинематическая вязкость смеси газов над жидкостью, м²/с:

$$\nu_{см} = \frac{\mu_{см}}{\rho_{см}};$$

$$\nu_{см} = 160 \cdot 10^{-7} / 1,215 = 131,7 \cdot 10^{-7}.$$

Коэффициенты диффузии компонентов газовой смеси над жидкостью при t = 0 °С и P_o = 101 308 Па, м²/ч:

$$D_o = \frac{0,8}{\sqrt{M}} \cdot 0,36;$$

$$D_{o_{H_2O}} = \frac{0,8}{\sqrt{18,02}} \cdot 0,36 = 0,0679; \quad D_{o_B} = \frac{0,8}{\sqrt{78,10}} \cdot 0,36 = 0,0326;$$

$$D_{o_D} = \frac{0,8}{\sqrt{98,97}} \cdot 0,36 = 0,0289; \quad D_{o_B} = \frac{0,8}{\sqrt{28,96}} \cdot 0,36 = 0,0535.$$

Коэффициенты диффузии компонентов газовой смеси над жидкостью при t = 40 °С и P = 101 325 Па, м²/ч:

$$D_t = D_o \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^2 \cdot \frac{101308}{P};$$

$$D_{H_2O} = 0,0679 \cdot \left(\frac{273+40}{273} \right)^2 \cdot \frac{101308}{101325} = 0,0897;$$

$$D_B = 0,0326 \cdot \left(\frac{273+40}{273} \right)^2 \cdot \frac{101308}{101325} = 0,0430;$$

$$D_D = 0,0289 \cdot \left(\frac{273+40}{273} \right)^2 \cdot \frac{101308}{101325} = 0,0383;$$

$$D_B = 0,0535 \cdot \left(\frac{273+40}{273} \right)^2 \cdot \frac{101308}{101325} = 0,0705.$$