

2.6. Расчет количества вредных веществ, испаряющихся со свободной поверхности жидкости

Количество вредных веществ, испаряющихся со свободной поверхности жидкости (при хранении в открытых резервуарах, пропитке, промывке, разливе и т.п.), зависит от химических свойств поверхности, ее температуры, площади зеркала испарения, продолжительности испарения и подвижности воздуха. Процесс переноса испаряющегося вещества от источника испарения в окружающую среду может быть диффузионным, а также обусловленным естественной или вынужденной конвекцией.

Процесс переноса испаряющегося вещества от источника испарения в окружающую среду определяется произведением критериев Грасгофа G_r и Прандтля Pr :

$$G_r \cdot Pr, \quad (2.26)$$

$$\text{где } G_r = gL^3\Delta\rho/\nu^2\rho; \quad (2.27)$$

g — ускорение свободного падения, м/с^2 ;

L — определяющий размер, м ; для круглой поверхности $L = d$, для квадрата $L = a$, для прямоугольника и поверхности неправильной формы $L = \sqrt{F}$;

$\Delta\rho$ — разность плотностей среды над поверхностью жидкости и в удалении от нее, г/м^3 ;

ν — коэффициент кинематической вязкости окружающей среды на некотором удалении от поверхности, $\text{м}^2/\text{с}$,

ρ — плотность окружающей среды, г/м^3 .

Критерий Pr для процесса испарения принимается $Pr = 0,66$.

Значения парциальных давлений и концентраций вредных газов и паров в атмосферном воздухе в формулах расчета количества испаряющихся веществ должны приниматься при температуре поверхности жидкости. При стационарном режиме эта температура устанавливается в соответствии с балансом тепла, которым учитывается также тепло, подводимое к жидкости извне; тепло, отдаваемое и получаемое жидкостью и воздухом в результате теплообмена между ними, и тепло, расходуемое на испарение.

В случае адиабатического процесса (подвод тепла к жидкости извне отсутствует) температуру поверхности испаряющейся жидкости можно найти исходя из равенства теплосодержаний воздуха над поверхностью жидкости и на некотором удалении от места испарения:

$$\begin{aligned} c_{pv}t_0 + (r + c_p t_0) \frac{34,5 p_0 M_n}{(B - p_0) 1000} = \\ = c_{pv}t_{*} + (r + c_p t_{*}) \frac{34,5 p_{*} M_n}{(B - p_{*}) 1000}, \end{aligned} \quad (2.28)$$

где c_{pv} и c_p — теплоемкость воздуха и пара данного вещества, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

t_{*} и t_0 — температура поверхности жидкости и воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

r — скрытая теплота испарения вещества, кДж/кг ;

M_n — молярная масса паров вещества;

B — барометрическое давление.

Если не учитывать при расчетах снижение температуры поверхности жидкостей, особенно кипящих при низких температурах, то ошибка в расчетах может составить значительную величину. Для реальных условий, когда процесс испарения

фактически является неадиабатическим, температуру поверхности испарения (например, поверхности горячей воды в спокойном состоянии) можно определить из приведенных в табл. 2.6 данных:

При снижении температуры поверхности жидкости в формулы определения выделяющихся вредных веществ вводят поправочный коэффициент k_1 :

Температура кипения жидкости, °C	≤ 80	100	150	> 150
Поправочный коэффициент k_1	1,5	1,3	1,1	1,0

Если поверхность испарения снабжена укрытиями, то количество газов и паров, выделяющихся в окружающую среду, нужно определять с учетом коэффициента k_2 , принимаемого в зависимости от отношения F_1/F_2 , где F_1 — открытая поверхность испарения, м²; F_2 — полная поверхность испарения, м²:

F_1/F_2	k_2
0,0001	0
0,001	0,01
0,01	0,1
0,1	0,2
0,5	0,3
0,8	0,6
> 0,8	1,0

Определение количества вредных веществ, испаряющихся со свободной поверхности жидкости при пленочном режиме. При таком режиме около поверхности жидкости создается пленка неподвижного воздуха сравнительно большой толщины. Перенос вещества с поверхности через эту пленку обеспечивается диффузией. Диффузионный процесс переноса вещества характеризуется произведением определяющих процесс критериев $Gr \cdot Pr' < 1$.

При испарении жидкости из глубокого сосуда количество вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух, вычисляют по формуле, г/ч:

$$G_1 = \frac{k_2}{k_1} 10^{-3} \frac{D_i F C_i}{h} \ln \frac{B - p_{0i}}{B - p_{ji}}, \quad (2.29)$$

где D_i — коэффициент диффузии паров жидкости, см²/ч;

F — площадь сосуда, м²;

C_i — концентрация компонента в газовой смеси, мг/м³;

h — глубина, считая от верхнего края сосуда до поверхности жидкости, м;

B — барометрическое давление, Па;

p_{0i} — парциальное давление паров на некотором удалении от источника, Па;

p_{ji} — парциальное давление паров над поверхностью жидкости при температуре испарения, Па;

Таблица 2.6

Температура жидкости при $t_n = 20$ °C и $\phi = 70$ %, °C	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Температура поверхности испарения, °C	18	23	28	33	37	41	45	48	51
Температура жидкости при $t_n = 20$ °C и $\phi = 70$ %, °C	65	70	75	80	85	90	95	100	
Температура поверхности испарения, °C	54	58	63	69	75	82	90	97	

k_1 — коэффициент, учитывающий понижение температуры поверхности испарения;

k_2 — коэффициент, учитывающий степень закрытия поверхности испарения.

При испарении жидкости с малых поверхностей (например, с шариков ртути) количество вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух, определяется по формуле, г/ч:

$$G_i = 7,2 D_i \sqrt{\frac{F}{0,785} \frac{p_{\text{ж}i} - p_{0i}}{B} \frac{k_2}{k_1} \rho_i}, \quad (2.30)$$

где F — поверхность испарения, м²;

$p_{\text{ж}i}$ — парциальное давление паров над поверхностью жидкости, Па;

ρ — плотность паров жидкости, кг/м³.

Пример 2.13. Определить количество испаряющихся через люк вредных веществ

Исходные данные. Атмосферное давление $B = 101\,325$ Па, диаметр люка 0,5 м. Диаметр аппарата 1,4 м, высота 2,5 м. Степень заполнения жидкостью $k_3 = 0,7$. Состав жидкости в аппарате, % (мас): вода — 40, бензол — 30 и дихлорэтан — 30. Газовая среда в аппарате и снаружи — воздух с примесью аммиака. Влажность воздуха $\varphi = 50$ %. Концентрация аммиака в воздухе $C = 10$ мг/м³. Температура жидкости и газовой среды в аппарате $t = 40$ °С.

Решение. Из решения примера 2.2 парциальные давления паров компонентов над смесью жидкости (в Па) составили: $p_{\text{H}_2\text{O}} = 5759$; $p_{\text{б}} = 3206,4$; $p_{\text{д}} = 2148,0$.

Коэффициент диффузии паров компонентов при $t = 0$ °С и $p_0 = 101\,308$ Па, м/с: $D_{\text{H}_2\text{O}} = 18,8 \cdot 10^{-6}$; $D_{\text{б}} = 9,05 \cdot 10^{-6}$; $D_{\text{д}} = 8,02 \cdot 10^{-8}$.

Коэффициент диффузии паров компонентов при $t = 40$ °С и $p = 101\,325$ Па, м²/с:

$$D_i = \frac{p_0}{p} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} D_0;$$

$$D_{\text{H}_2\text{O}} = 18,8 \cdot 10^{-6} \frac{101\,308}{101\,325} \left(\frac{273 + 40}{273} \right)^{3/2} = 24,69 \cdot 10^{-6};$$

$$D_{\text{б}} = 9,05 \cdot 10^{-6} \frac{101\,308}{101\,325} \left(\frac{273 + 40}{273} \right)^{3/2} = 11,89 \cdot 10^{-6};$$

$$D_{\text{д}} = 8,02 \cdot 10^{-6} \frac{101\,308}{101\,325} \left(\frac{273 + 40}{273} \right)^{3/2} = 10,54 \cdot 10^{-6}.$$

Площадь поверхности испарения в аппарате:

$$F_{\text{ап}} = 0,785 d_{\text{ап}}^2 = 0,785 \cdot 1,4^2 = 1,5386 \text{ м}^2.$$

Площадь люка:

$$F_{\text{л}} = 0,785 d_{\text{л}}^2 = 0,785 \cdot 0,5^2 = 0,1962 \text{ м}^2.$$

Отношение:

$$F_{\text{л}}/F_{\text{ап}} = 0,1962/1,5386 = 0,127.$$

Коэффициент, учитывающий степень закрытия поверхности испарения, при $F_{\text{л}}/F_{\text{ап}} = 0,127$ составил $k_2 = 0,2$.

Температура кипения компонентов жидкости, °С: вода — 100, бензол — 80,1 и дихлорэтан — 83,5.

Коэффициент, учитывающий понижение температуры поверхности испарения, для воды $k_1 = 1,0$, для бензола $k_1 = 1,3$ и для дихлорэтана $k_1 = 1,3$.

Глубина, считая от верхнего края люка до поверхности жидкости:

$$h = H_{\text{ап}}(1 - k_3) = 2,5(1 - 0,7) = 0,75 \text{ м}.$$

Концентрации компонентов газовой смеси над поверхностью жидкости (из расчета примера 2.2), мг/м³: $C_{H_2O} = 39\,876$; $C_6 = 96\,258$ и $C_a = 81\,710$.

Парциальное давление компонентов газовой смеси в наружной среде, Па:

$$p_{H_2O} = 3328; p_6 = 0; p_a = 0.$$

Количество компонентов газовой смеси, выделяющихся с поверхности испарения и поступающих в наружную среду через люк, г/ч:

$$G = \frac{k_2}{k_1} 10^{-3} \frac{D_i F C_i}{h} \ln \frac{B - p_{oi}}{B - p_{\text{ж}}};$$

$$G_{H_2O} = \frac{0,2}{1,0} 10^{-3} \times \frac{24,69 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 \cdot 1,5386 \cdot 39\,876}{0,75};$$

$$\ln \frac{101\,325 - 3328}{101\,325 - 5759} = 0,0364;$$

$$G_6 = \frac{0,2}{1,3} 10^{-3} \frac{11,89 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 \cdot 1,5386 \cdot 96\,258}{0,75};$$

$$\ln \frac{101\,325 - 0}{101\,325 - 3206,4} = 0,0419;$$

$$G_a = \frac{0,2}{1,3} 10^{-3} \times \frac{10,54 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 \cdot 1,5386 \cdot 81\,710}{0,75};$$

$$\ln \frac{101\,325 - 0}{101\,325 - 2148} = 0,0038.$$

Определение количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух при испарении с поверхности жидкости при ламинарном и переходном режимах. Ламинарный и переходный режимы движения воздуха наружной среды

вблизи поверхности испарения наблюдаются при

$$2 \cdot 10^2 < Gr \cdot Pr' < (Gr \cdot Pr')_{\text{кр}}. \quad (2.31)$$

При испарении со смоченных вертикальных стенок можно считать, что

$$(Gr \cdot Pr')_{\text{кр}} \approx 2,3 \cdot 10^8. \quad (2.32)$$

Если испарение происходит с горизонтальной поверхности жидкости, пары которой легче воздуха или наружной среды, то

$$(Gr \cdot Pr')_{\text{кр}} \approx 7,1 \cdot 10^5, \quad (2.33)$$

а если пары тяжелее воздуха или наружной среды, то

$$(Gr \cdot Pr')_{\text{кр}} \approx 1,1 \cdot 10^9. \quad (2.34)$$

Ниже приведены формулы для определения количества испаряющихся веществ с горизонтальной и вертикальной поверхностями в зависимости от разности концентраций и разности парциальных давлений.

1. Пары испаряющейся жидкости легче воздуха или наружной среды (поверхность испарения — горизонтальная):

$$G_i = 118 FL^{-1/4} D_i^{1/2} (C_{\text{ж}} - C_0)^{5/4} \times \left(\frac{M_{\text{н.сп}}}{M_i} - 1 \right)^{1/4} \rho_{\text{н.сп}}^{-1/4} \frac{k_2}{k_1}; \quad (2.35)$$

$$G_i = 11,4 \cdot 10^{-4} FL^{-1/4} D_i^{1/2} (p_{\text{ж}} - p_0)^{5/4} \times M_i^{5/4} \left(\frac{M_{\text{н.сп}}}{M_i} - 1 \right)^{1/4} \frac{k_2}{k_1}, \quad (2.36)$$

где G — количество испаряющихся веществ, г/ч;

F — площадь испарения, м²;

L — определяющий размер поверхности (диаметр, сторона квадрата, меньшая сторона прямоуголь-

ника или для поверхности неправильной формы $L = \sqrt{F}$;

$M_{н.сп}$ — молекулярная масса паров наружной среды;

M_i — молекулярная масса паров определяемого вещества;

$\rho_{н.сп}$ — плотность наружной среды над поверхностью жидкости;

$p_{ж}$ и p_0 — парциальное давление паров соответственно над поверхностью жидкости и в наружной среде, Па;

$C_{ж}$ и C_0 — концентрации паров над поверхностью жидкости и в наружной среде, г/м³;

k_1 — коэффициент, учитывающий понижение температуры поверхности испарения;

k_2 — коэффициент, учитывающий степень закрытия поверхности испарения;

D_i — коэффициент диффузии паров жидкости, см²/с.

2. Пары испаряющейся жидкости тяжелее воздуха или наружной среды, $M_i > M_{н.сп}$ (поверхность испарения — горизонтальная):

$$G_i = 65FL^{-1/4}D_i^{1/2}(C_{ж} - C_0)^{5/4} \times \left(1 - \frac{M_{н.сп}}{M_i}\right)^{1/4} \rho_{н.сп}^{-1/4} \frac{k_2}{k_1}; \quad (2.37)$$

$$G_i = 6,4 \cdot 10^{-4} FL^{-1/4} D_i^{1/2} (p_{ж} - p_0)^{5/4} \times M_i^{5/4} \left(1 - \frac{M_{н.сп}}{M_i}\right)^{1/4} \frac{k_2}{k_1}. \quad (2.38)$$

3. Пары испаряющейся жидкости легче (или тяжелее) воздуха или наружной среды (поверхность испарения — вертикальная):

$$+ G_i = 79FL^{-1/4}D_i^{1/2}(C_{ж} - C_0)^{5/4} \times \left(1 - \frac{M_{н.сп}}{M_i}\right)^{1/4} \rho_{н.сп}^{-1/4} \frac{k_2}{k_1}; \quad (2.39)$$

$$G_i = 7,5 \cdot 10^{-4} FL^{-1/4} D_i^{1/2} (p_{ж} - p_0)^{5/4} \times M_i^{5/4} \left(1 - \frac{M_{н.сп}}{M_i}\right)^{1/4} \frac{k_2}{k_1}. \quad (2.40)$$

Определение количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух при испарении их с поверхности жидкости при турбулентном режиме. Турбулентный режим движения воздуха (наружной среды) вблизи поверхности испарения наблюдается при

$$Gr \cdot Pr' > (Gr \cdot Pr')_{кр}. \quad (2.41)$$

1. Пары испаряющейся жидкости легче воздуха или наружной среды, $M_i < M_{н.сп}$ (поверхность испарения — горизонтальная):

$$G_i = 104FD_i^{1/3}(C_{ж} - C_0)^{4/3} \times \left(\frac{M_{н.сп}}{M_i} - 1\right)^{1/3} \rho_{н.сп}^{-1/3} \frac{k_2}{k_1}; \quad (2.42)$$

$$G_i = 3,0 \cdot 10^{-4} FD_i^{1/3} (p_{ж} - p_0)^{4/3} \times M_i^{4/3} \left(\frac{M_{н.сп}}{M_i} - 1\right)^{1/3} \frac{k_2}{k_1}. \quad (2.43)$$

2. Пары испаряющейся жидкости тяжелее воздуха или наружной среды, $M_i > M_{н.сп}$ (поверхность испарения — горизонтальная):

$$G_i = 52FD_i^{1/3}(C_{ж} - C_0)^{4/3} \times \left(1 - \frac{M_{н.сп}}{M_i}\right)^{1/3} \rho_{н.сп}^{-1/3} \frac{k_2}{k_1}; \quad (2.44)$$

$$G_i = 1,5 \cdot 10^{-4} FD_i^{1/3} (p_{ж} - p_0)^{4/3} \times M_i^{4/3} \left(1 - \frac{M_{н.сп}}{M_i}\right)^{1/3} \frac{k_2}{k_1}. \quad (2.45)$$

3. Пары испаряющейся жидкости легче (или тяжелее) воздуха или наружной среды (поверхность испарения — вертикальная):

$$G_i = 78FD_i^{1/3}(C_{\text{ж}} - C_0)^{4/3} \times \left(1 - \frac{M_{\text{н.сп}}}{M_i}\right)^{1/3} \rho_{\text{н.сп}}^{-1/3} \frac{k_2}{k_1}; \quad (2.46)$$

$$G_i = 2,25 \cdot 10^{-4} FD_i^{1/3}(p_{\text{ж}} - p_0)^{4/3} \times M_i^{4/3} \left(1 - \frac{M_{\text{н.сп}}}{M_i}\right)^{1/3} \frac{k_2}{k_1}. \quad (2.47)$$

Все приведенные формулы относятся к испарению при естественной конвекции, которая наблюдается, когда коэффициент обмена A близок или равен коэффициенту молекулярной диффузии вещества D . Методику определения коэффициента обмена A см. в главе 4.

Пример 2.14. Определить количество вредных веществ, испаряющихся через открытую поверхность аппарата, полностью заполненного жидкостью.

Исходные данные. Диаметр аппарата 1,4 м. Состав жидкости в аппарате, % (мас.): вода — 40, бензол — 30 и дихлорэтан — 30. Наружная среда — воздух с примесью аммиака. Влажность воздуха $\varphi = 50$ %. Концентрация аммиака в воздухе $C_{\text{NH}_3} = 10$ мг/м³. Температура жидкости $t = 40$ °С. Тепло к аппарату не подводится. Барометрическое давление наружной среды $B = 101\,325$ Па. Температура наружной среды $t = 16$ °С.

Решение. Относительные молекулярные массы компонентов, составляющих наружную среду: $M_{\text{в}} = 28,96$; $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18,015$; $M_{\text{NH}_3} = 17,31$. Парциаль-

ное давление насыщенных водяных паров в воздухе наружной среды:

$$\lg p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{н}} = 0,622 + 7,5t/(238 + t) = 0,622 + 7,5 \cdot 16/(238 + 16) = 1,0944;$$

$$p = 12,4 \text{ мм рт. ст., или } 1653 \text{ Па.}$$

Парциальное давление водяных паров в воздухе наружной среды при заданной влажности:

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{н}} \varphi = 1653 \cdot 0,5 = 826,5 \text{ Па.}$$

Парциальное давление примеси (аммиака) в наружной среде:

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

$$p_{\text{NH}_3} = 10(273 + 16)133,3/17,31 \cdot 16 \times 1000 = 1,503 \text{ Па.}$$

Парциальное давление основного компонента наружной среды — воздуха:

$$p_{\text{в}} = B - \Sigma p_i = 101\,325 - (826,5 + 1,503) = 100\,397 \text{ Па.}$$

Объемные доли составляющих наружную среду:

$$i_i = p_i/B;$$

$$i_{\text{в}} = 100\,397/101\,325 = 0,9908;$$

$$i_{\text{H}_2\text{O}} = 826,5/101\,325 = 0,0081;$$

$$i_{\text{NH}_3} = 1,503/101\,325 = 0,00001.$$

Относительная молекулярная масса смеси газов наружной среды:

$$M_{\text{см}} = \Sigma i_i M_i = 28,96 \cdot 0,9908 + 0,0081 \times 18,015 + 0,00001 \cdot 17,31 = 28,84.$$

Концентрации составляющих наружную среду:

$$C_i = 16 p_i M_i \cdot 1000 / [(273 + t)133,3];$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = 16 \cdot 826,5 \cdot 18,015 \cdot 1000 / [(273 + 16)133,3] = 6784 \text{ мг/м}^3;$$

$$C_{\text{в}} = 16 \cdot 100\,397 \cdot 28,96 \cdot 1000 / [(273 + 16)133,3] = 1\,207\,570 \text{ мг/м}^3;$$

$$C_{\text{NH}_3} = 10 \text{ мг/м}^3.$$

Произведение $i_i p_i$ для газовых составляющих наружной среды, мг/м³ (кг/м³);

$$i_{\text{в}} \rho_{\text{в}} = 1\,207\,570 \quad (1,2076);$$

$$i_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 6784 \quad (0,0068);$$

$$i_{\text{NH}_3} \rho_{\text{NH}_3} = 10 \quad (0,00001).$$

Плотность наружной среды:

$$\rho_{\text{н.ср}} = \sum i_i p_i = 1,2076 + 0,0068 + 0,00001 = 1,2144 \text{ кг/м}^3.$$

Относительные молекулярные массы составляющих газовой среды над жидкостью: $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18,015$; $M_6 = 78,10$; $M_{\text{д}} = 98,97$; $M_{\text{в}} = 28,96$; $M_{\text{NH}_3} = 17,31$.

Молярные доли составляющих жидкости:

$$n_i = \frac{a_i / M_i}{\sum (a_i / M_i)};$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{0,4/18,015}{0,4/18,015 + 0,3/78,10 + 0,3/98,97} = 0,7637;$$

$$n_6 = \frac{0,3/78,10}{0,4/18,015 + 0,3/78,10 + 0,3/98,97} = 0,1321;$$

$$n_{\text{д}} = \frac{0,3/98,97}{0,4/18,015 + 0,3/78,10 + 0,3/98,97} = 0,1042.$$

Из табл. 1.1 [часть IV, таблица 1] находим эмпирические коэффициенты A , B , C для каждого компонента смеси жидкости:

вода	бензол	дихлорэтан
$A = 7,9608$	$A = 6,984$	$A = 6,985$
$B = 1678$	$B = 1252,8$	$B = 1171,4$
$C = 230$	$C = 225$	$C = 228$

Парциальное давление насыщенных паров компонентов над чистыми жидкими веществами:

$$\lg p^* = A - B/(C + t);$$

$$\lg p_{\text{H}_2\text{O}}^* = 7,9608 - 1678/(230 + 40) = 1,7460;$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}}^* = 56,7 \text{ мм рт. ст., или } 7541,1 \text{ Па};$$

$$\lg p_6^* = 6,984 - 1252,8/(225 + 40);$$

$$p_6^* = 182,5 \text{ мм рт. ст., или } 24\,272,5 \text{ Па};$$

$$\lg p_{\text{д}}^* = 6,985 - 1171,4/(228 + 40);$$

$$p_{\text{д}}^* = 155 \text{ мм рт. ст., или } 20\,615 \text{ Па}.$$

Парциальное давление паров компонентов над смесью жидкости, Па:

$$p_i = n_i p_i^*;$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = 7541,1 \cdot 0,7637 = 5759,14;$$

$$p_6 = 24\,272,5 \cdot 0,1321 = 3206,4;$$

$$p_{\text{д}} = 20\,615 \cdot 0,1042 = 2148,0.$$

Парциальное давление основного газового компонента — воздуха:

$$p_{\text{в}} = 101\,325 - (5759,14 + 3206,4 + 2148 + 1,503) = 90\,210 \text{ Па}.$$

Концентрации составляющих газовой смеси над жидкостью, мг/м³:

$$C_i = 16 p_i M_i \cdot 1000 / [(273 + t) 133,3];$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = 16 \cdot 5759 \cdot 18,015 \cdot 1000 / [(273 + 40) 133,3] = 39\,876;$$

$$C_6 = 16 \cdot 3206,4 \cdot 78,10 \cdot 1000 / [(273 + 40) 133,3] = 96\,258;$$

$$C_{\text{д}} = 16 \cdot 2148 \cdot 98,97 \cdot 1000 / [(273 + 40) 133,3] = 81\,710;$$

$$C_{\text{NH}_3} = 10;$$

$$C_{\text{в}} = 16 \cdot 90\,210 \cdot 28,96 \cdot 1000 / [(274 + 40) 133,3] = 1\,001\,841.$$

Произведение $i_i p_i$ составляющих газовой смеси над жидкостью, мг/м³ (кг/м³):

$$i_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 39\,876 \quad (0,0398);$$

$$i_6 \rho_6 = 96\,258 \quad (0,0963);$$

$$i_{\text{д}} \rho_{\text{д}} = 81\,710 \quad (0,0817);$$

$$i_{\text{NH}_3} \rho_{\text{NH}_3} = 10 (0,00001);$$

$$i_{\text{в}} \rho_{\text{в}} = 1\,001\,841 (1,0018).$$

Плотность газовой смеси над жидкостью:

$$\rho_{\text{см}} = \sum i \rho_i = 0,0398 + 0,0963 + 0,0817 + 0,00001 + 1,0018 = 1,2196 \text{ кг/м}^3.$$

Коэффициент диффузии паров компонентов при $t_0 = 0$ и $p_0 = 101\,308$ Па (см. табл. 1.1), $\text{м}^2/\text{с}$: $D_{\text{H}_2\text{O}} = 18,8$; $D_{\text{O}_6} = 9,05 \cdot 10^{-6}$; $D_{\text{O}_a} = 8,02 \cdot 10^{-6}$.

Коэффициент диффузии паров компонентов при $t = 40$ °С и $p = 101\,325$ Па, $\text{м}^2/\text{с}$ ($\text{м}^2/\text{ч}$):

$$D_i = D_0 \frac{p_0}{p} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2};$$

$$D_{\text{H}_2\text{O}} = 18,8 \cdot 10^{-6} \frac{101\,308}{101\,325} \left(\frac{273+40}{273} \right)^{3/2} = 24,69 \cdot 10^{-6} (0,0888);$$

$$D_6 = 9,05 \cdot 10^{-6} \frac{101\,308}{101\,325} \left(\frac{273+40}{273} \right)^{3/2} = 11,89 \cdot 10^{-6} (0,0428);$$

$$D_a = 8,02 \cdot 10^{-6} \frac{101\,308}{101\,325} \left(\frac{273+40}{273} \right)^{3/2} = 10,54 \cdot 10^{-6} (0,0379).$$

Динамическая вязкость составляющих газовой смеси над жидкостью при $t = 0$ (см. табл. 1.1 [часть IV, таблица 1]), Па · с:

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 82 \cdot 10^{-7}; \mu_{\text{O}_6} = 70 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_{\text{O}_a} = 61 \cdot 10^{-7}; \mu_{\text{O}_{\text{NH}_3}} = 93 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_{\text{O}_b} = 171 \cdot 10^{-7}.$$

Константы Сатерленда (см. табл. 1.1):

$$\text{Sat}_{\text{H}_2\text{O}} = 673; \text{Sat}_6 = 380;$$

$$\text{Sat}_a = 524; \text{Sat}_{\text{NH}_3} = 503; \text{Sat}_b = 107.$$

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

$$\mu_i = \mu_0 \frac{273 + \text{Sat}}{T + \text{Sat}} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5};$$

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 82 \cdot 10^{-7} \frac{273+673}{273+40+673} \times \left(\frac{273+40}{273} \right)^{1,5} = 96,58 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_6 = 70 \cdot 10^{-7} \frac{273+380}{273+40+380} \times \left(\frac{273+40}{273} \right)^{1,5} = 80,97 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_a = 61 \cdot 10^{-7} \frac{273+524}{273+40+524} \times \left(\frac{273+40}{273} \right)^{1,5} = 71,3 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_{\text{NH}_3} = 93 \cdot 10^{-7} \frac{273+503}{273+40+503} \times \left(\frac{273+40}{273} \right)^{1,5} = 109 \cdot 10^{-7};$$

$$\mu_b = 171 \cdot 10^{-7} \frac{273+107}{273+40+107} \times \left(\frac{273+40}{273} \right)^{1,5} = 189,9 \cdot 10^{-7}.$$

Объемные доли газовых составляющих над жидкостью:

$$i = \rho_i / \rho_{\text{абс}};$$

$$i_{\text{H}_2\text{O}} = 5759,14 / 101\,325 = 0,0568;$$

$$i_6 = 3206,4 / 101\,325 = 0,0316;$$

$$i_a = 2148 / 101\,325 = 0,0212;$$

$$i_{\text{NH}_3} = 1,503 / 101\,325 = 0,00001;$$

$$i_b = 90210 / 101\,325 = 0,8903.$$

Относительная молекулярная масса смеси газов над жидкостью:

$$M_{см} = \sum i_i M_i = 0,0568 \cdot 18,015 + 0,0316 \times \\ \times 78,10 + 0,0212 \cdot 98,97 + 0,00001 \times \\ \times 17,31 + 0,8903 \cdot 28,96 = 31,37.$$

Динамическая вязкость смеси газов над жидкостью:

$$\mu_{см} = \frac{M_{см}}{\sum i_i M_i / \mu_i};$$

$$\mu_{см} = \frac{31,37}{\frac{0,0568 \cdot 18,015}{96,58 \cdot 10^{-7}} + \frac{0,0316 \cdot 78,10}{80,97 \cdot 10^{-7}} + \\ + \frac{0,0212 \cdot 98,97}{71,30 \cdot 10^{-7}} + \frac{0,00001 \cdot 17,31}{109 \cdot 10^{-7}} + \\ + \frac{0,8903 \cdot 28,96}{189,93 \cdot 10^{-7}}} = 160 \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Кинематическая вязкость смеси газов над жидкостью:

$$\nu_{см} = \mu_{см} / \rho_{см} = 160 \cdot 10^{-7} / 1,2196 = \\ = 131,19 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Определяющий размер поверхности испарения: $L = 1,4$ м. Критерий Грасгофа:

$$Gr = g L^3 \Delta \rho / \nu^2 \rho;$$

$$Gr = \frac{9,81 \cdot 1,4^3 (1219,6 - 1214,4)}{(131,19 \cdot 10^{-7})^2 1219,6} = \\ = 6,66 \cdot 10^8.$$

Критерий Прандтля:

$$Pr' = 0,66.$$

Произведение критериев

$$Gr \cdot Pr' = 6,66 \cdot 10^8 \cdot 0,66 = 4,39 \cdot 10^8.$$

По расчетам,

$$M_{н.ср} = 28,84, \text{ а } M_{H_2O} = 18,05;$$

$$M_6 = 78,10; M_d = 98,97, \text{ т.е.}$$

$$M_{H_2O} < M_{н.ср}; M_6 > M_{н.ср} \text{ и } M_d > M_{н.ср}.$$

Границы применения формул для расчета количества вредных веществ, испаряющихся с горизонтальной поверхности:

а) для водяных паров

$$Gr \cdot Pr'_{кр} = 7,1 \cdot 10^5,$$

наше значение

$$Gr \cdot Pr' = 4,39 \cdot 10^8,$$

следовательно, режим испарения турбулентный;

б) для бензола

$$Gr \cdot Pr'_{кр} = 1,1 \cdot 10^9,$$

наше значение

$$Gr \cdot Pr' = 4,39 \cdot 10^8,$$

следовательно, режим испарения ламинарный или локонообразный:

в) для дихлорэтана

$$Gr \cdot Pr'_{кр} = 1,1 \cdot 10^9,$$

наше значение

$$Gr \cdot Pr' = 4,39 \cdot 10^8,$$

следовательно, режим испарения ламинарный или локонообразный.

Температура кипения компонентов жидкости, °С: вода — 100, бензол — 80,1 и дихлорэтан — 83,5.

Коэффициент, учитывающий понижение температуры поверхности испарения: $k_1 = 1,0$ для воды, $k_1 = 1,3$ для бензола и дихлорэтана.

Коэффициент, учитывающий степень закрытия поверхности испарения при $F_n/F_{ан} = 1$ равен 1.

Площадь поверхности испарения: $F = 0,785$, $D_{ан}^2 = 0,785 \cdot 1,4^2 = 1,5386 \text{ м}^2$.

Количество испаряющихся вредных веществ:

для воды:

$$G_i = 3,0 \cdot 10^{-4} F D_i^{1/3} (p_{\text{ж}} - p_0)^{4/3} \times \\ \times M_i^{4/3} \left(\frac{M_{\text{н.ср}}}{M_i} - 1 \right)^{1/3} \frac{k_2}{k_1};$$

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = 3,0 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5386 \cdot 0,0888^{1/3} \times \\ \times (5759 - 826,5)^{4/3} 18,015^{4/3} \times \\ \times \left(\frac{28,84}{18,015} - 1 \right)^{1/3} \frac{1}{1,3} = 685,1 \text{ г/ч};$$

для бензола:

$$G_i = 6,4 \cdot 10^{-4} F D^{1/2} L^{-1/4} (p_{\text{ж}} - p_0)^{5/4} \times \\ \times M_i^{5/4} \left(1 - \frac{M_{\text{н.ср}}}{M_i} \right)^{1/4} \frac{k_2}{k_1};$$

$$G_6 = 6,4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5386 \cdot 1,4^{-1/4} \cdot 0,0428^{1/2} \times \\ \times (3206,4 - 0)^{5/4} 78,1^{5/4} \times \\ \times \left(1 - \frac{28,84}{78,1} \right)^{1/4} \frac{1}{1,3} = 718,4 \text{ г/ч};$$

для дихлорэтана:

$$G_i = 6,4 \cdot 10^{-4} F D^{1/2} L^{-1/4} \times \\ \times (p_{\text{ж}} - p_0)^{5/4} M_i^{5/4} \left(1 - \frac{M_{\text{н.ср}}}{M_i} \right)^{1/4} \frac{k_2}{k_1};$$

$$G_{\text{ж}} = 6,4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5386 \cdot 1,4 \cdot 0,0379^{1/2} \times \\ \times (2148 - 0)^{5/4} 98,97^{5/4} \times \\ \times \left(1 - \frac{28,84}{98,97} \right)^{1/4} \frac{1}{1,3} = 567,7 \text{ г/ч}.$$

Определение количества вредных веществ, поступающих в атмосферный воздух при испарении их с поверхности жидкости при вынужденной конвекции газового потока. В потоке воздуха (вынужденная конвекция) количество испаряющейся жидкости описывается уравнением, г/ч:

$$G_i = 7,5 \cdot 10^{-3} (5,38 + 4,1v) F p_i \sqrt{M_i} \frac{k_2}{k_1}, \quad (2.48)$$

где v — скорость движения воздуха над поверхностью испарения, м/с.

Пример 2.15. Определить количество вредных веществ, испаряющихся из аппарата, наполненного смесью жидкостей, % (мас.): вода — 40, бензол — 30, дихлорэтан — 30.

Исходные данные. Диаметр аппарата $D = 1,4$ м. Температура жидкости $t = 40$ °С. Тепло к аппарату не подводится. Барометрическое давление наружной среды $B \approx 101\,325$ Па. Скорость движения наружной среды над поверхностью жидкости $v = 2$ м/с.

Решение. Поверхность испарения жидкости: $F = 0,785$,

$$D_{\text{ан}}^2 = 0,785 \cdot 1,4^2 = 1,5386 \text{ м}^2.$$

Парциальное давление компонентов жидкости над ее поверхностью (см. решение примера 2.2.), Па:

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = 5759; p_6 = 3206,4; p_{\text{д}} = 2148,0.$$

Относительные молекулярные массы компонентов: $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18,015$; $M_6 = 78,10$; $M_{\text{д}} = 98,7$.

Температура кипения компонентов жидкости $t_{\text{к}}$, °С: вода — 100, бензол — 80,1, дихлорэтан — 83,5.

Коэффициент, учитывающий понижение температуры поверхности испарения: для воды — $k_1 = 1,0$; для бензола — $k_1 = 1,3$; для дихлорэтана — $k_1 = 1,3$.

Коэффициент, учитывающий степень закрытия поверхности испарения, $k_2 = 1$ (при открытой поверхности испарения).

Количество испаряющихся вредных веществ, г/ч:

$$G_i = 7,5 \cdot 10^{-3} (5,38 + 4,1v) F p_i \sqrt{M_i} \frac{k_2}{k_1};$$

$$G_{H_2O} = 7,5 \cdot 10^{-3} (5,38 + 4,1 \cdot 2) \times \\ \times 1,5386 \cdot 5759 \sqrt{18,015} \cdot \frac{1}{1} = 3830;$$

$$G_6 = 7,5 \cdot 10^{-3} (5,38 + 4,1 \cdot 2) \times \\ \times 1,5386 \cdot 3206,4 \sqrt{78,1} \cdot \frac{1}{1,3} = 3415,4;$$

$$G_d = 7,5 \cdot 10^{-3} (5,38 + 4,1 \cdot 2) \times \\ \times 1,5386 \cdot 2148 \sqrt{98,97} \cdot \frac{1}{1,3} = 2575,7.$$

2.7. Расчет количества вредных веществ, выделяющихся с поверхностей, на которых образуется пленка

Сушка многих веществ сопровождается образованием пленки на поверхности испарения. К таким веществам относятся различные лакокрасочные материалы, связующие стеклопластиков, клеи, смолы, кремнийорганические соединения и др. После нанесения их на поверхность оборудования происходит испарение растворителя и образование пленки — слоя вязкого геля. Толщина и твердость пленки со временем увеличиваются. Поэтому испарение растворителя с открытой поверхности происходит только в первые 1—3 мин. В этом промежутке времени процесс испарения подчиняется законам, изложенным в разделе 2.5. В дальнейшем планка начинает препятствовать испарению, и скорость его уменьшается. Интенсивность выделения летучих веществ в последнем случае зависит от физико-химических свойств материала, а также от метеорологических условий окружающей воздушной среды.

При окраске поверхности оборудования, а также при разливе материала различают три периода выделения летучих веществ:

а) начальный — нанесение материала на поверхность сопровождается выделением летучих веществ с возрастающей интенсивностью;

б) основной — при нанесении материала интенсивность выделения летучих веществ со всей окрашенной поверхности постоянна;

в) конечный — материал на поверхность не наносится, интенсивность выделения летучих веществ уменьшается.

Графическое изображение периодов интенсивности выделения летучих веществ с поверхностей, на которых образуется пленка при высыхании, представлено на рис. 2.1.

Интенсивность испарения в каждый момент времени начального периода определяют из выражения, г/мин:

$$v = B\omega(1 - e^{-kt}), \quad (2.49)$$

где B — количество вещества, выделяющегося с единицы площади при полном высыхании материала, кг/м²;

ω — скорость покрытия поверхности лакокрасочным материалом, м²/мин:

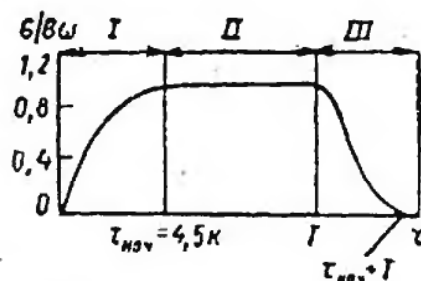


Рис. 2.1. Зависимость интенсивности выделения вредных веществ с поверхностей, на которых образуется пленка при высыхании: I — начальный период сушки; II — основной; III — конечный период сушки