

СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ИСПАРЕНИЯ ОПАСНЫХ ЖИДКОСТЕЙ С ПОВЕРХНОСТИ БАССЕЙНА РАЗЛИВА НА ТВЕРДУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, Киев, Украина

Анотація. Проводиться порівняльний аналіз вітчизняних та зарубіжних методик визначення параметрів випаровування небезпечних рідин при їх розливі в результаті аварій. Наводяться формули та результати досліджень. Обговорюються переваги й недоліки кожної методики.

Ключові слова: випаровування небезпечних рідин, швидкість випаровування, час випаровування.

Аннотация. Проводится сравнительный анализ отечественных и зарубежных методик определения параметров испарения опасных жидкостей при их разливе в результате аварий. Приводятся формулы и результаты исследований. Обсуждаются достоинства и недостатки каждой методики.

Ключевые слова: испарение опасных жидкостей, скорость испарения, время испарения.

Abstract. The article presents a comparative analysis of the domestic and foreign methods for determining the parameters of the evaporation of hazardous liquids when spilled in accidents. Formulas and research results are presented. The advantages and disadvantages of each method are discussed.

Keywords: evaporation of hazardous liquids, the rate of evaporation, evaporation time.

1. Вступлення

При хранении и перевозке опасных химических веществ, находящихся в резервуарах в жидком состоянии, возникает угроза разрушения резервуара при авариях и разлива ядовитой жидкости с последующим испарением и формированием ядовитых облаков. В этой связи возникает задача прогноза возможных последствий аварии и оценки нанесенного ущерба.

В литературе можно найти ряд отечественных и зарубежных методик, определяющих параметры испарения ядовитых жидкостей и степень заражения местности при авариях с выбросами сильнодействующих ядовитых веществ (СДЯВ). Среди отечественных методик наиболее известными являются методика Министерства чрезвычайных ситуаций «Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті» [1] («Мін. НС») и методика прогнозирования масштабов заражения СДЯВ при авариях на химически опасных объектах и транспорте [2] («РД 52»). Особенностью этих методик является их ограниченность как рядом СДЯВ, так и количеством параметров испарения, которые представлены в таблицах и рассчитаны через параметры хлора. Интерес представляет также и методика Министерства обороны [3] («МО»), в которой, наряду с табличными значениями параметров выброса, присутствуют и аналитические формулы.

Наиболее известные зарубежные методики [4–9] не имеют таких ограничений и позволяют определять массу выброса, скорость и время испарения любых веществ, исходя из их физико-химических свойств и параметров окружающей среды. Это методики, представленные в работах Shaw P. and Briscoe F. (1980) (жидкости с температурой кипения ниже окружающей среды), Fleisher 1980, Maskau and Matsugu (1973) (жидкости с температурой кипения выше окружающей среды). Также для жидкостей, имеющих температуру кипения выше температуры окружающей среды, существует ряд алгоритмов других авторов.

Целью настоящей статьи является сравнение вышеупомянутых отечественных и зарубежных методик при разливе опасных жидкостей на твердую поверхность по параметрам

рам: масса разлившейся жидкости; радиус бассейна разлива; скорость испарения; время испарения.

2. Определение массы разлившейся жидкости

Скорость испарения любой жидкости с бассейна разлива зависит от объема (массы) жидкости и площади бассейна разлива. По этой причине масса разлившейся жидкости и площадь бассейна разлива являются исходными данными для определения параметров испарения.

Методика «Мін. НС» принимает степень заполнения резервуаров в размере 70% паспортного объема, не вычисляя массу первичного и вторичного облаков, ограничивая максимальное количество выброса величиной 300 т.

Методика «РД 52» позволяет определять эквивалентное количество выброса по первичному и вторичному облакам через коэффициенты, заданные в таблицах для ряда СДЯВ. Под эквивалентным количеством СДЯВ понимается такое количество хлора, масштаб заражения которым при инверсии эквивалентен масштабу заражения при данной степени вертикальной устойчивости воздуха количеством данного вещества, перешедшим в первичное (вторичное) облако [2].

Аналитический вариант методики «МО» и зарубежная методика [4] позволяют определять массу первичного и вторичного облаков для жидкостей, имеющих температуру кипения ниже окружающей среды и хранящихся под давлением, исходя из свойств вещества и температуры окружающей среды:

$$m_1 = m_0 \delta, \quad m_2 = m_0 - m_1 = m_0(1 - \delta), \quad \delta = \delta_1 + \delta_2,$$
$$\delta_1 = \frac{c_p(T_a - T_b)}{L}, \quad \delta_2 = \begin{cases} 0,01 & \text{при } T_a < 283,15; \\ 0,02 & \text{при } 283,15 \leq T_a \leq 293,15; \\ 0,03 & \text{при } T_a > 293,15, \end{cases} \quad (1)$$

где m_0 – начальная масса вещества в емкости, кг ;

m_1 – масса первичного облака, кг ;

m_2 – масса вторичного облака, кг ;

T_a – температура окружающей среды, °K ;

T_b – температура кипения вещества, °K ;

c_p – удельная теплоемкость вещества при температуре окружающей среды, Дж/кг°K ;

L – теплота испарения, Дж/кг ;

δ_1 – доля вещества, которая перешла в пар и аэрозоль за счет разницы плотности насыщенных паров вещества в емкости и парциального давления в воздухе;

δ_2 – доля вещества, которая перешла в пар за счет изменения теплосодержания жидкости и тепла поддона (используется в методике «МО»).

3. Определение площади бассейна разлива

Для определения площади бассейна разлива важно знать, имеет ли резервуар с опасной жидкостью поддон. Если поддон имеется, то радиус бассейна разлива в этом случае равен радиусу поддона. Площадь разлива определяется, как площадь поддона за вычетом площади, занимаемой резервуаром, если резервуар стоит непосредственно на полу поддона, а не на подставке [4].

При свободном разливе (хранение без поддона) растекание бассейна происходит до тех пор, пока он не достигнет минимальной высоты h_{\min} , при которой бассейн распадется на лужицы. Эта высота соответствует высоте неровностей поверхности (высоте лужиц) и определяется экспериментально для каждого типа поверхности. Обычно h_{\min} составляет примерно $10^{-2} \div 10^{-4}$ м [5].

Ограничением методик «Мін. НС» и «РД 52» является тот факт, что они устанавливают для свободного разлива только одну высоту $h_{\min} = 0,05$ м (рис. 1).

В методике «МО» для определения площади бассейна разлива используются эмпирические формулы, которые соответствуют $h_{\min} = 0,05$ м при отсутствии поддона [3]:

$$d = \begin{cases} 1,22\sqrt{m/\rho h}, & \text{при наличии поддона;} \\ 5,04\sqrt{m/\rho}, & \text{при отсутствии поддона} \end{cases}, S_p = \frac{1}{4}\pi \cdot d^2, \quad (2)$$

где m – масса разлившейся жидкости, кг, ($m = m_2$);

d – диаметр бассейна разлива, м;

S_p – площадь бассейна разлива, м²;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

h – высота поддона, м.

В [5] при использовании допущения о том, что бассейн представляет собой круглый цилиндр с одинаковой высотой, радиус r , м бассейна определяется, исходя из соотношения

$$r = \left(\frac{m}{h_{\min} \cdot \rho \cdot \pi} \right)^{1/2}, \text{ где } h_{\min} = \begin{cases} 0,005 \div 0,01 \text{ м} - \text{бетон} \\ 0,02 \text{ м} - \text{почва, песок} \end{cases} S_p = \pi \cdot r^2, \text{ м}^2. \quad (3)$$

В [6] определяется зависимость радиуса мгновенного свободного разлива на твердую поверхность от времени:

$$r(t) = \left[\left(8g \cdot \frac{V_0}{\pi} \right)^{1/2} \cdot t + r_0^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где $V_0 = \frac{m_0}{\rho}$ – первоначальный объем, м³;

r_0 – начальный радиус, м;

t – время разлива, с;

$g = 9,8$ м/с² – ускорение свободного падения.

Высота разлива в зависимости от времени

$$h(t) = \frac{V_0}{\pi \cdot r^2(t)}, \text{ м}. \quad (5)$$

4. Определение параметров испарения опасных жидкостей с поверхности бассейна разлива на твердую поверхность

Методики «Мін. НС», «РД 52» и «МО» не рассматривают отдельно процессы кипения и испарения, ограничиваясь только процессом испарения. Иностраные же методики, наоборот, изучают эти два процесса отдельно [5, 6].

Если температура кипения опасной жидкости ниже температуры окружающей среды, то при разливе на твердую поверхность она образует быстро испаряющийся кипящий бассейн, скорость испарения которого обусловлена скоростью поступления тепла в бассейн извне, которое и обеспечивает необходимую энергию для перехода из жидкой фазы в пар.

В случае, если температура кипения опасной жидкости выше температуры окружающей среды, то при ее разливе на твердую поверхность образуется медленно испаряющийся бассейн, и скорость испарения обуславливается переносом масс через застойный пограничный слой над поверхностью бассейна (рис. 1).

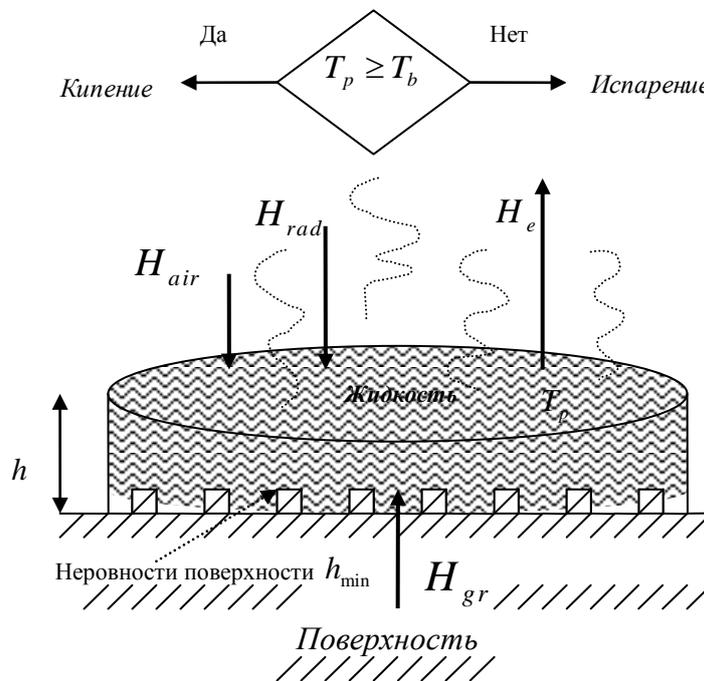


Рис. 1. Процессы теплопередачи в бассейне разлива

Скорость изменения температуры бассейна разлива, обусловленная действием различных источников поступления тепла, может быть получена из уравнения теплового баланса [5, 7, 8]:

$$mc_p \frac{dT_p}{dt} = H_{gr} + H_{air} + H_{rad} - H_e, \quad (6)$$

где T_p – температура жидкости в бассейне, °K ;

H_{gr} – мощность потока тепла, приходящего в бассейн от подстилающей поверхности, Вт ;

H_{air} – мощность потока тепла, приходящего в бассейн от конвекции воздуха, Вт ;

H_{rad} – мощность потока тепла, приходящего в бассейн от солнечного и теплового излучения атмосферы, Вт ;

H_e – мощность потока тепла, уходящего из бассейна в результате испарения, Bm .

$$H_{gr} = \frac{\chi \cdot k_s (T_s - T_p)}{(\pi \alpha t)^{0.5}} \cdot S_p, \text{ Bm [6]},$$

$$H_{air} = 7,2 \cdot (T_a - T_p) \cdot u^{0,823} \cdot r^{-0,177} \cdot S_p, \text{ Bm [6]}, \quad (7)$$

$$H_{rad} = [S + \varepsilon \sigma (T_a^4 - T_p^4)] \cdot S_p, \text{ Bm [5]},$$

где k_s – коэффициент теплопроводности поверхности, $Bm/m^{\circ}K$;

T_s – температура поверхности, $^{\circ}K$;

T_p – температура бассейна, $^{\circ}K$;

α – коэффициент температуропроводности поверхности, m^2/c ;

χ – поправочный коэффициент, учитывающий неопределенность термодинамических свойств шероховатой поверхности. Для гладкой поверхности $\chi = 1$, для шероховатой поверхности $\chi = 3$ [6];

T_a – температура окружающей среды, $^{\circ}K$, u – скорость ветра, m/c ;

ε – коэффициент излучения бассейна;

S – тепловой поток от солнца, Bm/m^2 ;

$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} Bm/m^2 \cdot K^4$ – константа Стефана-Больцмана.

В действительности процесс парообразования в кипящем бассейне сложный и включает в себя как процесс кипения, так и процесс испарения. Когда температура кипящего бассейна в результате парообразования и охлаждения подстилающей поверхности становится меньше температуры кипения разлившегося вещества, начинается процесс испарения, и составляющие уравнения (6) становятся функциями времени и температуры бассейна [7].

4.1. Кипящий бассейн

В настоящем исследовании принято, что если разлившаяся жидкость образует кипящий бассейн, то $T_p = T_b$ и процесс кипения продолжается до полного испарения жидкости [9]. В

этом случае $\frac{dT_p}{dt} = 0$ и $H_e = H_{gr} + H_{air} + H_{rad}$,

$$Q_e = \frac{1}{L_b} (H_{gr} + H_{air} + H_{rad}), \quad (8)$$

где Q_e – скорость испарения бассейна, $кг/c$, L_b – теплота испарения разлившейся жидкости при температуре кипения бассейна, $Дж/кг$.

На начальной стадии испарения охлажденных жидкостей механизм испарения определяется передачей тепла от подстилающей поверхности. В случае криогенных жидкостей, имеющих температуру кипения ниже $120^{\circ}K$ ($-153^{\circ}C$), определяющей является составляющая H_{gr} . Экспериментальный опыт показывает, что стадия передачи тепла от подстилающей поверхности к бассейну разлива длится короткое время ($\approx 10c$) [6], однако она определяет верхнюю границу скорости испарения бассейна. По мере уменьшения разности $T_s - T_p$ на процесс испарения будет оказывать значительное влияние также и тепло, посту-

пающее от конвекции воздуха, солнечной радиации и от длинноволнового теплового излучения атмосферы [6].

В случае свободного неограниченного разлива радиус разлива зависит от времени и определяется соотношением (4). По этой причине высота разлива, площадь разлива, теплота, поступающая в бассейн, и скорость испарения также зависят от времени и вычисляются путем подстановки соответствующих значений $r(t)$ в формулы (7).

Если разлив ограничен радиусом r , то в этом случае процесс испарения можно представить состоящим из двух фаз: 1-я фаза – испарение при мгновенном разливе до достижения радиуса r ; 2-я фаза – испарение с поверхности разлива радиусом r . Поскольку при мгновенном разливе продолжительность 1-й фазы невелика (несколько секунд), то величины параметров разлива будут в основном определяться процессом испарения 2-й фазы.

Испаряющаяся масса в обоих случаях является интегралом от скорости испарения:

$$m(t) = \int_0^t Q_e(t) dt . \quad (9)$$

Исследование параметров испарения проводилось для мгновенного разлива жидкого хлора массой $m_0 = 101,5$ т, хранившегося под давлением, при разрушении резервуара, установленного на гладкую почву.

Исходные данные. Свойства жидкого хлора [8]: температура кипения $-34,6^\circ\text{C}$, теплота испарения при температуре кипения 238488 Дж/кг , плотность 1557 кг/м^3 .

Параметры окружающей среды: температура воздуха и почвы 20°C , скорость ветра 1 м/с , тепловой поток от солнца 500 Вт/м^2 , коэффициент излучения бассейна $\varepsilon = 0,95$ [5], коэффициенты теплопроводности и температуропроводности поверхности $k_s = 0,96 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$ [6] и $\alpha = 4,59 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ [6] для ограниченного разлива принято $h_{\min} = 0,05 \text{ м}$. Поскольку хлор хранился под давлением, то разлившаяся масса (масса вторичного облака) в соответствии с (1) составляет $79,2$ т. Радиус бассейна для ограниченного разлива высотой $h_{\min} = 0,05 \text{ м}$ в соответствии с (3) равен 18 м .

Зависимости параметров испарения от времени для свободного неограниченного и ограниченного радиусом r разливов приведены на рис. 2 – 6.

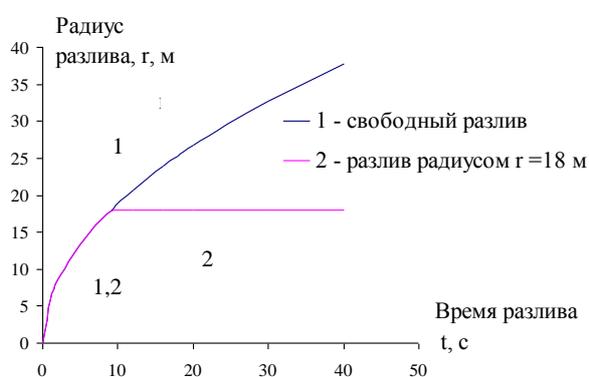


Рис. 2. Зависимость радиуса разлива от времени для свободного и ограниченного разливов (разлив хлора массой $79,2$ т)

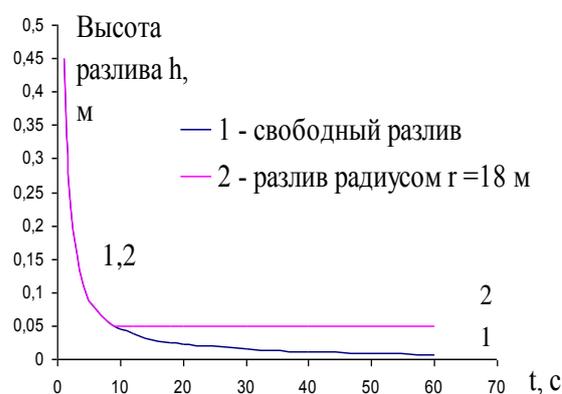


Рис. 3. Зависимость высоты разлива от времени для свободного и ограниченного разливов (разлив хлора массой $79,2$ т)

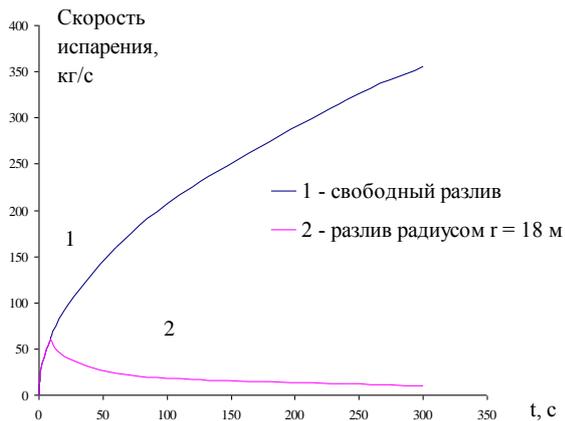


Рис. 4. Зависимость скорости испарения, вызванной теплотой, поступающей от почвы, от времени, для свободного и ограниченного разливов (разлив хлора массой 79,2 т)

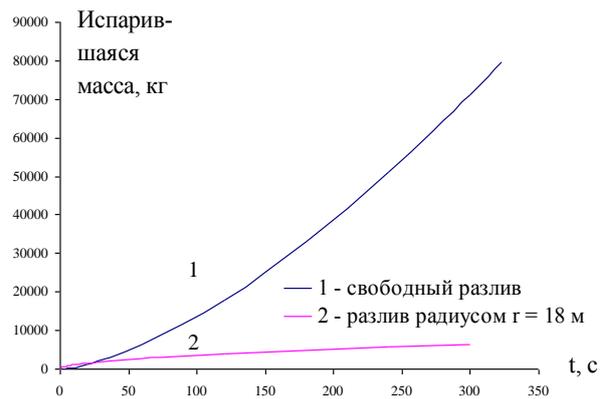


Рис. 5. Зависимость испаряющейся массы, обусловленной теплотой, поступающей от почвы, от времени, для свободного и ограниченного разливов (разлив хлора массой 79,2 т)

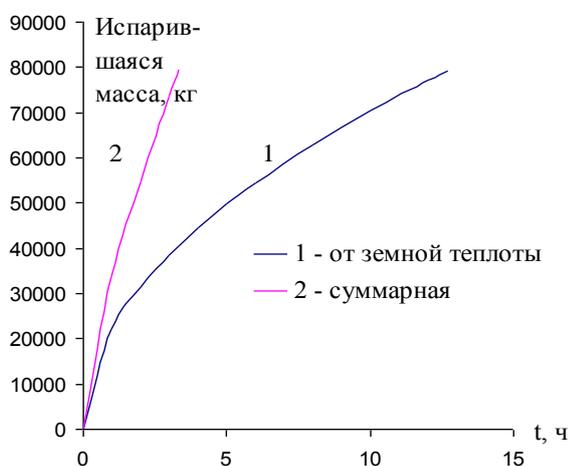


Рис. 6. Зависимость испарившейся массы, обусловленная теплотой от земли и суммарной теплотой от времени (разлив хлора массой 79,2 т, радиусом 18 м)

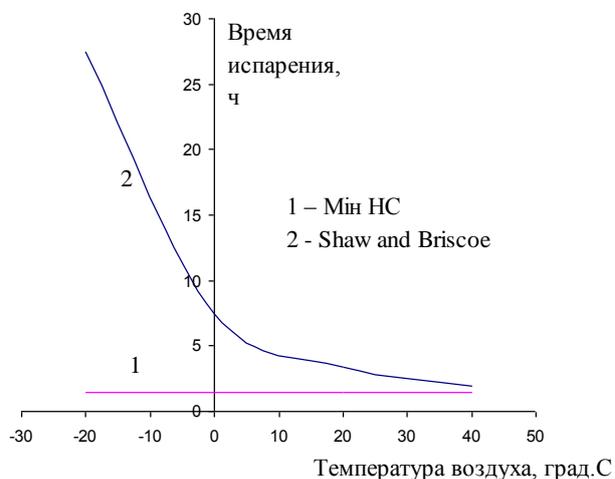


Рис. 7. Зависимость времени испарения от температуры воздуха (свободный разлив хлора массой 79,2 т)

4.2. Медленно испаряющийся бассейн

В этом случае процесс испарения происходит путем переноса масс вещества из жидкой фазы в газообразную через застойный пограничный слой, и скорость испарения зависит от давления паров, площади бассейна и атмосферных условий [11].

Далее приводятся методы вычисления скорости испарения для устойчивого равновесного состояния бассейна разлива.

1. Методика МО, аналитический вариант, 1989 [3]:

$$Q_e = 0,041 \frac{S_p u_1 M}{d^{0,14} T_e} e^{\frac{LM}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_e} \right)},$$

где u_1 – скорость ветра на высоте 1м, м/с;

M – молярная масса вещества, г/моль;

T_e – температура испарения, °K ;

$R = 8,31 \text{ Дж/моль}^\circ\text{K}$ – универсальная газовая постоянная.

2. Эмпирическая формула для медленно испаряющегося бассейна разлива однокомпонентной жидкости, используемая в модели SPILLS (Fleisher, 1980) [4, 14].

$$Q_e = 10^{-3} \cdot k_g \cdot S_p \cdot P_v \cdot M / (R \cdot T_p), \quad k_g = D_m \cdot N_{Sh} / d,$$

$$N_{Sh} = \begin{cases} 0,664 \cdot N_{Sc}^{1/3} \cdot N_{Re}^{1/2}, & N_{Re} < 320000, \\ 0,037 \cdot N_{Sc}^{1/3} \cdot [N_{Re}^{0,8} - 15200], & N_{Re} > 320000, \end{cases} \quad N_{Sc} = k_m / D_m, \quad N_{Re} = u \cdot d / k_m,$$

где k_g – коэффициент переноса масс, м/с ;

P_v – давление паров, Па ;

D_m – коэффициент молекулярной диффузии паров вещества в воздухе, м²/с ;

k_m – кинематическая вязкость воздуха, м²/с ;

N_{Sh} – число Шервуда ;

N_{Sc} – число Шмидта ;

N_{Re} – число Рейнольдса.

3. Stiver and Mackay's method (1993) [12].

$$Q_e = 10^{-3} \cdot k_g \cdot S_p \cdot P_v \cdot M / (R \cdot T_a),$$

где $k_g = 0,002u_{10}$, u_{10} – скорость ветра на высоте 10м, м/с .

4. Mackay and Matsugu (1973) [7]. Используется в модели GASP [14].

$$Q_e = 10^{-3} \cdot k_g \cdot S_p \cdot P_v \cdot M / (R \cdot T_p),$$

где $k_g = 0,00482 \cdot N_{Sc}^{-0,67} \cdot u^{0,78} \cdot d^{-0,11}$.

5. The U.S. EPA method [7].

$$Q_e = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot 0,1288 \cdot S_p \cdot P_v \cdot M^{0,667} \cdot u_{10}^{0,78} / T_p.$$

6. The U.S. Air Force method [7]. Используется в модели ARCHIE [15].

$$Q_e = S_p \cdot (4,161 \cdot 10^{-5}) \cdot u^{0,75} \cdot T_F \cdot M \cdot (P_v / P_H) / 60,$$

$$P_H = 760 \cdot e^{65,3319 \cdot (72452/T_a) - (8,22 \ln T_a) + (0,006155 T_a)} \cdot 133,322, \quad T_F = \begin{cases} 1, & T_p \leq 273,15, \\ 1 + 0,0043 \cdot T_p^2, & T_p > 273,15, \end{cases}$$

где T_F – коэффициент коррекции температуры бассейна ;

P_H – давление паров гидразина при температуре окружающей среды.

7. Методики «Мін. НС» и «РД 52».

В этих методиках для определения времени испарения $\tau, ч$ используется формула

$$\tau = \frac{h_L \cdot \rho \cdot 10^{-3}}{K_2 \cdot K_4 \cdot K_7},$$

где $h_L = h - 0,2$ – толщина слоя жидкости, разлившейся в поддон, м ;

K_2, K_4, K_7 – коэффициенты из таблиц методики «РД 52».

Для исследований использовались вещества: серы диоксид; сероуглерод; акрилонитрил с температурами кипения соответственно $-10,02^{\circ}\text{C}$, $46,23^{\circ}\text{C}$ и $77,35^{\circ}\text{C}$.

Исходные данные. Зависимые от температуры свойства веществ были получены с помощью уравнений концепции YAWS (1977) [14]. Для определения коэффициентов молекулярной диффузии паров вещества в воздухе использовался закон эффузии Грехема [9], в соответствии с которым $D_m = D_{mwater} \sqrt{\frac{M_{water}}{M}}$, где D_{mwater}, D_m – коэффициенты молекулярной диффузии паров воды и жидкости в воздухе, $\text{м}^2/\text{с}$, M_{water} – молярная масса воды, $\text{г}/\text{моль}$.

Параметры окружающей среды: температура воздуха $-20, 0, 20, 40^{\circ}\text{C}$; $u_1=1, 2, 5 \text{ м}/\text{с}$; высота поддона $h=0, 0,05, 1, 3 \text{ м}$. Время испарения $\tau = \frac{m}{Q_e \cdot 3600}, \text{ч}$.

Результаты исследований – параметры испарения изображены на графиках рис. 8–11.

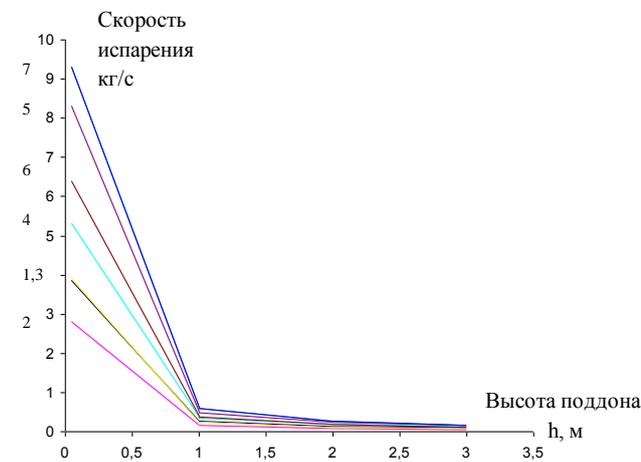


Рис. 8. Зависимость скорости испарения от высоты поддона (разлив сероуглерода массой 100 т, скорость ветра 1 м/с, температура воздуха 20 град С)

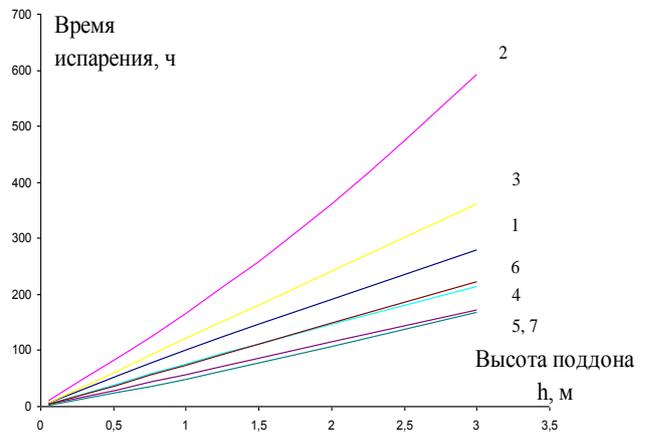


Рис. 9. Зависимость времени испарения от высоты поддона (разлив сероуглерода массой 100 т, скорость ветра 1 м/с, температура воздуха 20 град С)

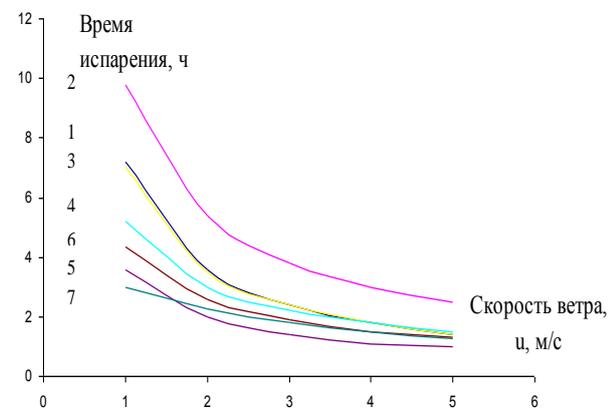


Рис. 10. Зависимость времени испарения от скорости ветра (разлив сероуглерода массой 100 т, высота поддона $h=0,05 \text{ м}$, температура воздуха 20 град С)

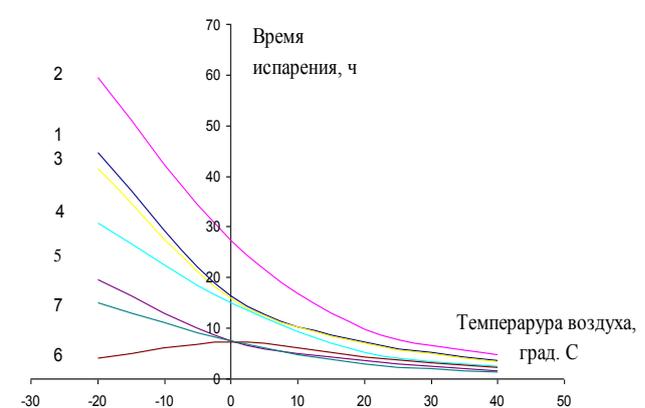


Рис. 11. Зависимость времени испарения от температуры воздуха (разлив сероуглерода массой 100 т, высота поддона $h=0,05 \text{ м}$, скорость ветра $u=1 \text{ м}/\text{с}$)

5. Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы о преимуществах и недостатках рассмотренных в статье методик.

1. Определение массы разлившейся жидкости.

Методика «Мін. НС» не позволяет вычислить массу первичного и вторичного облаков, ограничивая максимальное количество выброса величиной 300 т, что является недостатком.

Методика «РД 52» позволяет определять эквивалентное количество выброса по первичному и вторичному облакам через коэффициенты, заданные в таблицах только для определенного ряда СДЯВ через параметры хлора, что ограничивает применение методики.

Методика «МО» и иностранные методики дают возможность определять массу первичного и вторичного облаков через физико-химические свойства любых веществ и параметры окружающей среды, что дает этим методикам преимущества.

2. Определение площади бассейна разлива.

Методики «Мін. НС» и «РД 52» не позволяют определять площадь бассейна свободного разлива, ограничиваясь только толщиной слоя разлива.

В методике МО для определения площади бассейна свободного разлива используется эмпирическая формула, соответствующая только одной минимальной высоте разлива – 0,05 м. Эти ограничения, несомненно, являются недостатком отечественных методик.

Иностранные методики, наоборот, позволяют определять радиус свободного разлива для любой минимальной высоты разлива, причем также и в зависимости от времени, что говорит об их преимуществах.

3. Определение скорости и времени испарения разлившейся жидкости.

Отечественные методики не рассматривают отдельно процессы кипения и испарения, отдавая преимущество только процессу испарения. Однако для жидкостей с температурой кипения намного ниже температуры окружающей среды (например, LNG) скорость и продолжительность процесса кипения также важны. В этом случае целесообразно использовать иностранные методики, позволяющие определять влияние на процесс парообразования всех составляющих уравнения теплового баланса (6), о чем свидетельствуют графики рис. 2–6. На графике рис. 7 показана зависимость времени процесса испарения, обусловленного суммарной теплотой, поступающей в бассейн, от температуры воздуха, в то время как в методике «Мін. НС» эта величина считается постоянной.

При исследовании отдельно процесса испарения можно видеть, что методики 1–7 раздела 4.2 дают сходные результаты (рис. 8–11). Можно предположить, что методика 2, дающая наибольшее время испарения, является наиболее точной, поскольку для вычисления коэффициента переноса масс использует физико-химические свойства веществ. Методика 6, наоборот, менее точна при низких температурах, вероятно, в результате неточного определения свойств гидразина (рис. 11).

4. Общие выводы.

В целом, по результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что распространенные отечественные методики и методика «МО» применимы для быстрого оценочного прогноза. Для более точного и глубокого описания процессов парообразования при авариях, особенно в случае криогенных жидкостей, целесообразно использовать иностранные методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 10 квітня

- 2001 р., N 326/5517 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.uazakon.com/big/text1560/pg1.htm>.
2. Методика прогнозирования масштабов заражения СДЯВ при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. РД 52.04.253-90. – Москва, 1991 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gosthelp.ru/text/RD520425390Metodikaprojno.html>.
3. МО СССР. Управление химических войск. Методика выявления и оценки химической обстановки при разрушении (аварии) объектов, содержащих сильнодействующие ядовитые вещества. – М., 1989.
4. Workbook of Test Cases for Vapor Cloud Source Dispersion Models. – American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety. – 1989. – 122 p.
5. Fernandez M.I. Modeling Spreading, Vaporization and Dissolution of multicomponent pools: thesis. Department of Chemical Engineering University College. Torrington Place / Fernandez M.I. – London, 2013. – 222 p.
6. Shaw P. Spread and evaporation of liquid / P. Shaw, F. Briscoe // Prog. Energ. Combust. – 1980. – Vol. 6, N 2. – P. 127 – 140.
7. Mackay D. Evaporation Rates of Liquid Hydrocarbon Spills on Land and Water / D. Mackay, R. Matsugu // Canadian Journal of Chemical Engineering. – 1973. – Vol. 5. – P. 434 – 439.
8. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. Second Edition, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. – New York, 2000. – 79 p.
9. ALOHATM (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.0. THEORETICAL DESCRIPTION. NOAA Technical Memorandum NOS ORCA-65. – Seattle, Washington 98115. – 1992. – August. – 100 p.
10. Справочник химика 21. Хлор и теплота испарения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://chem21.info/info/839111/>.
11. Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models (2nd Edition). – American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, 1996. – 292 p.
12. ChemEngineering. Accidental release source terms, 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chemengineering.wikispaces.com/Accidental+release+source+term>.
13. Andreas L.E. Handbook of Physical Constants and Functions for Use in Atmospheric Boundary Layer Studies / E.L. Andreas // US Army Corps of Engineers. Engineers Research and Development Centre. – 2005. – October.
14. Methods for the Calculation of Physical Effects Due To Releases of Hazardous Substances (Liquids and Gases), ‘Yellow Book’, PGS2 CPR 14E, Chapter 2. – The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, The Hague, 2005. PGS2 CPR 14E. – 870 p.
15. Handbook of Chemical Hazard Analysis Procedures (Appendix B), Federal Emergency Management Agency, U.S. Dept. of Transportation, and U.S. Environmental Protection Agency, 1989 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/10003MK5.PDF>.

Стаття надійшла до редакції 06.03.2017