Лекция №15

1. Случай $T_Н = T_К < T_О$. Особенности растекания и испарения.
2. План построения дерева событий для случая $T_Н = T_К < T_О$ и $T_Н > T_К$.

1. Случай $T_Н = T_к > T_о$
   Под рассматриваемый случай подходят проливы с жидким водородом $T_К$.=-252°С , сжиженным метаном $T_К$.=-161,7°С, вторые фазы после мгновенного вскипания при утечке: пропана, пропилена, этилена, этана, а при плюсовой температуре $T_О$ и для утечек бутана, бутилена и бутадиена. Особенности растекания при проливе таких жидкостей связаны с тем, что скорость испарения (кипения) достаточно велика, а передняя граница растекающейся жидкости все время попадает на «горячую» ($T_К < T_О$) поверхность и закипает. Скорость движения передней границы падает, уменьшается и толщина слоя, поэтому наступает момент, когда пролив (если он не ограничен обваловкой) достигает своих максимальных размеров и затем его площадь уменьшается, так как в центре пролива кипение (испарение) значительно замедлилось, вследствие более продолжительного охаждения грунта в центре пролива.

В существующих нормативных документах эти факты проигнорированы, и поэтому рекомендации этих документов по рассматриваемым случаям следует проверять.

При проливе на обвалованную площадь этот вопрос, как правило, не возникает, так как цель обваловки – уменьшить площадь пролива, достигается за счет глубины жидкого слоя в обваловке.

Здесь встает другой вопрос. При большой глубине жидкого слоя процесс выкипания затягивается на долго, и поэтому скорость испарения падает из-за сильного охаждения грунта, а на фоне все замедляющегося процесса теплоприхода снизу начинают проявлять себя механизмы теплоподвода из атмосферы, связанные с подмешиванием теплого воздуха и конденсации влаги в случае с углеводородами и конденсацией самого воздуха в случае с проливом жидкого водорода.

Формула для определения массы испарившегося вещества с учетом теплоподвода из воздуха выглядит следующим образом:

$$m_0 = \frac{T_o - T_K}{d}\left|2\sqrt{\frac{\lambda_T C_{\rho_T}\rho_T t}{\pi}} + \frac{5{,}1\sqrt{Re}\,\lambda_B t}{d}\right| \quad (1)$$

В формуле (1) $\lambda_{\text{П}} C_{\rho_{\text{П}}} \rho_{\text{П}}$ - теплопроводность, теплоемкость и плотность вещества подстилающей поверхности,

$Re = \frac{U_b d}{\nu_B}$ – число Рейнольдса, U_b- скорость ветра $^{\text{м}}/_{\text{сек}}$

$\lambda_B = 2{,}75 \cdot 10^{-2}\ ^{\text{вт}}/_{\text{м} \cdot \text{град}}$ - теплопроводность воздуха

$\nu_B = 1{,}64 \cdot 10^{-5}\ \frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$ кинематическая вязкость воздуха.

Пример: оценить время, с которого необходимо учитывать второй член для определения массы испарившегося метана с поверхности имеющей $\lambda_{\text{П}} = 0{,}9 \frac{\text{вт}}{\text{м град}}$; $x_{\text{т}} = 4{,}3 \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$; $U_b = 1\ ^{\text{м}}/_{\text{сек}}$

Диаметр пролива d ≈ 50м

Решение выбираем точность определения массы ~ 10 % , тогда второй член должен составлять 0,1 от первого, то есть

$$\frac{5{,}1\sqrt{Re}}{d}\lambda_B t \geq 0{,}1 \cdot 2\sqrt{\frac{t\lambda_{\text{П}}^2}{\pi x_{\text{П}}}}; \quad \lambda_{\text{П}} = x_{\text{П}} C_{\rho_{\text{П}}} \rho_{\text{П}} \text{ (определение)}$$

$$\lambda_B \frac{5{,}1}{d}\sqrt{\frac{U_b d}{V_B}}\, t^{\frac{1}{2}} \geq 0{,}2\sqrt{\frac{\lambda_{\text{П}}^2}{\pi x_{\text{П}}}} \rightarrow t^{\frac{1}{2}} \geq \frac{\lambda_{\text{П}}}{\lambda_B}\frac{0{,}2}{5{,}1}\sqrt{\frac{V_B d \lambda_{\text{П}}}{U_b \pi x_{\text{П}}}} = \frac{0{,}9 \cdot 0{,}2}{5{,}1}\sqrt{\frac{1{,}67 \cdot 10^{-5} \cdot 50 \cdot 0{,}9}{3{,}14 \cdot 1 \cdot 4{,}3 10^{-7}}}$$

$$\sqrt{\frac{1}{2{,}74 \cdot 10^{-2}}} = \frac{0{,}16}{5{,}1} \cdot \frac{10}{2{,}74 \cdot 10^{-2}}\sqrt{\frac{1{,}67 \cdot 50 \cdot 0{,}9}{3{,}14 \cdot 4{,}3}} = 29{,}2; \quad t \geq 853\text{сек} \approx 15\text{мин}$$

То есть через 15 минут испарения за счет теплопритока от воздуха будет давать примерно 10% испарившейся массы. При увеличении скорости ветра эта величина увеличится, а при увеличении размера пролива эта доля уменьшится.

Очевидно, что сравняются массы испарившегося за счет теплоприхода из грунта и теплоприхода из воздуха через время в 100 раз превышающее 15 минут, то есть через 25 часов.

2. Рассмотрим порядок построения дерева событий в случае пролива сжиженного метана из изотермического резервуара емкостью 10000 м^3 с коэффициентом заполнения $\eta = 0{,}85$. Происходит пролив всего содержимого в обвалованную площадь.

Площадь обвалования выбиралась из условия, что h_{max} = 1,5 метра, обваловка из грунта.

а) Перед построением дерева событий определяем и находим по справочникам необходимые сведения о сжиженном метане и грунте.

Метан CH_4	M	$T_К^0C$ P_0 = 1атм	$C_{РЖ}$ $\frac{дж}{кг \cdot град}$	L $\frac{дж}{кг}$	$\rho_ж$ $\frac{кг}{м^3}$	$\rho_г$ $\frac{кг}{м^3}$ $T=0^0C$ P_0 = 1атм	$C_{РГ}$ $\frac{дж}{кг \cdot град}$
	16	-161,7	3770	548471	415	0,717	2177

Грунт средней влажности $\lambda_П$ = 0,9$\frac{вт}{м\ град}$; $x = 4{,}3 \cdot 10^{-7}\frac{м^2}{сек}$;

λ_B= 2,74·10^{-2} $вт/м \cdot град$; $r_B = 1{,}67 \cdot 10^{-5}\frac{м^2}{сек}$

Площадь обваловывания при максимальной высоте слоя жидкого метана:

$$F_0 = \frac{10000 \cdot 0{,}85}{1{,}5} = 5670м^2$$

При квадратной площади обваловки площадь контакта жидкости с грунтом

$$F_K = F_0 + 4\sqrt{F_0}h = 5670 + 6\sqrt{5670} = 6120м^2$$

Эффективный диаметр пролива

$$d_э = \sqrt{\frac{4F_0}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5670}{\pi}} = 85м$$

Масса пролитого метана : $M_0 = \rho_ж \cdot 0{,}85 \cdot 10000 = 0{,}415 \cdot 0{,}85 \cdot 10000 = 3527{,}5тонн$

*б) Т*ак как температура кипения $T_К = -161,7^0C$, что ниже любой возможной температуры окружающей среды, то пары метана в начальный момент испарения у поверхности пролива всегда имеют концентрацию 100% метана, поэтому нет смысла рассматривать $T_{НПВ}$, он всегда ниже $T_{КИП}$, а следовательно и ниже T_0. То есть пары метана всегда можно зажечь, если источник находится где – то рядом и облако своим краем достигнет источника. Источник может быть слабым.

в) Массовая скорость испарения метана в зависимости от времени с единицы поверхности зеркала пролива.

$$\dot{m} = \frac{1}{F_0}\frac{dm}{dt} = \frac{T_0 - T_K}{L}\left[\frac{\lambda_П \frac{F_K}{F_0}}{\sqrt{\pi x_п t}} + \frac{5{,}1\sqrt{Re}\lambda_B}{d}\right] =$$

$$\frac{166{,}1}{548471}\left[\frac{0{,}9t^{-\frac{1}{2}}\cdot 1{,}08}{\sqrt{3{,}14\cdot 4{,}3\cdot 10^{-7}}} + \frac{5{,}1\cdot 2{,}74\cdot 10^{-2}(2)^{\frac{1}{2}}}{(1{,}67\cdot 10^{-5}\cdot 85)^{\frac{1}{2}}}\right] = 3\cdot 10^{-4}\left[\frac{836{,}5}{\sqrt{t}} + 5{,}245\right| \frac{кг}{м^2 сек}$$

$T_0 = T_{ср}^{год} = 4{,}4^0 C$

$U_b = 2\frac{м}{сек}$

Ниже приведены результаты расчета массовой скорости испарения метана и линейной скорости пара метана при выходе пара с поверхности жидкости, при $\rho_П = 0{,}717 \cdot \frac{273}{111{,}3} \approx 1{,}76 \frac{кг}{м^3}$

t сек	100 сек	625	1600	2500	3600
$\dot{m}\frac{кг}{м^2 с}$	$2{,}67\cdot 10^{-2}$	$1{,}16\cdot 10^{-2}$	$7{,}85\cdot 10^{-3}$	$6{,}6\cdot 10^{-3}$	$5{,}76\cdot 10^{-3}$
$U_\lambda = \frac{\dot{m}}{\rho_п}\frac{м}{сек}$	$1{,}52\cdot 10^{-2}\frac{м}{сек}$	$0{,}66\cdot 10^{-2}$	$4{,}46\cdot 10^{-3}$	$3{,}75\cdot 10^{-3}$	$3{,}27\cdot 10^{-3}$
$\%\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}}$	6 %	13,5%	20%	23,8%	27,3%

m_2- это массовая скорость испарения за счет теплоподвода из атмосферы

Масса метана, испарившегося к моменту времени t

t сек	100	625	1600	2500	3600
m_N тонн	29,33	76,675	128,0	164,5	202,7
$\%\frac{m_{2n}}{m_N}$	3%	7,3%	11,1%	13,5%	15,8%

$$m = 3\cdot 10^{-4}\left|2\cdot 836{,}5\cdot (t)^{\frac{1}{2}} + 5{,}245\cdot t\right| 5670 = 1{,}7\left|1673\cdot (t)^{\frac{1}{2}} + 5{,}245\, t\right|; \quad (2)$$

Таким образом, через час после пролива, испарится всего 202,7т, или $\lambda = \frac{202{,}7}{3527{,}5}\cdot 100\% = 5{,}75\,\%$

Чтобы оценить полное время испарения необходимо в формулу (1) или в последнюю (2) подставить $m_0 = 3527{,}5\cdot 10^3$кг и решить уравнение относительно t

$$3{,}53\cdot 10^6 = 2783 t^{\frac{1}{2}} + 8{,}92\, t \;\rightarrow\; t + 312\sqrt{t} - 39{,}6\cdot 10^4;$$

$$(\sqrt{t})_{1,2}=\frac{-312\pm\sqrt{312^2+4\cdot 39{,}6\cdot 10^4}}{2} = 492{,}33\ \text{сек}^{-1/2};$$

$$t = 242392\ \text{сек} = 67{,}33\ \text{часа}$$

Испарение пролитого метана, если его не перекачивать снова в хранилище (резервное) будет продолжаться почти трое суток. Закачку всего метана можно осуществить за несколько часов, если закачивать в час более $10^3 м^3$

Но и в этом случае аварийная ситуация будет сохраняться слишком долго, чтобы не произошло воспламенения.

г) Оценим возможность взрыва и огненного шара .

за первые 100 сек. испарится ~30 тонн метана. Это большая масса, которая может вызвать, как взрыв так и огненный шар. Чтобы мог произойти взрыв необходимо все эти 30т перемешать с воздухом. Воздуха потребуется

$V_B \approx \frac{30000}{0{,}08} \approx 3{,}75 \cdot 10^5 м^3$ (стехиометрический состав ~$0{,}08\frac{кг}{м^3}$)

Ясно что за 100 сек такое количество воздуха обеспечить трудно, поэтому эффективное перемешивание может произойти только на значительном расстоянии от источника испарения при условии, что плотность холодного метана больше плотности воздуха, облако получится вытянутым и сплюснутым.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что при достаточно больших проливах в первые минуты взрыв не может быть эффективным из-за недостатка воздуха, поэтому в качестве возможных сценариев основными следует считать пожар пролива при раннем поджиге и огненный шар с последующим пожаром при условии, что к моменту поджига испарится достаточное количество углеводорода.

При экспертных оценках можно пользоваться правилами:

В случае пролива на площадь меньше $1000 м^2$ при раннем пождиге реализуется пожар пролива, при большой площади пролива возможно образование огненного шара с последующим пожаром, при этом, чем больше площадь пролива, тем вероятнее образование огненного шара.

При более поздних поджигах необходимо рассматривать соотношение между массой испарившегося вещества и условиями рассеивания облака.

Если пренебречь изменением влияния размеров пролива на скорость испарения, то масса испарившегося вещества, в зависимости от времени для разных площадей пролива, будет иметь вид табл. №1 ($\frac{\text{числитель за } 100\text{сек}}{\text{знаменитель } 625 \text{ сек}}$)

Табл.№1

$F_{пр}$ $м^2$	5000	2000	1000	500	100	50	25
M t=100 / t=625	25,7т / 67.3т	10,3т / 25.7т	5,15т / 12,85т	2,57 / 6,7	0,5 / 1,25	0,26 / 0,67	0,13 / 0,33

Масса испарившегося вещества определена для грунта средней влажности.

Построение дерева событий для рассматриваемого случая можно вести по плану:

1. Определить площадь пролива
2. Определить массу испарившегося вещества (можно по приближенной зависимости)
3. Определить есть ли раннее зажигание. Ранним можно считать поджиг до времени

$t = \frac{M}{K\sqrt{F}}$; K=1,3,10 для конвекции, изотермии и инверсии соответственно.

4. В случае, если M<5000 кг, то пожар пролива

При M>5000 кг –возможен огненный шар с последующим пожаром. При прочих равных условиях вероятность появления совсем раннего поджига возрастает с увеличением массы и скорости пролива.

5. При позднем поджиге возможен взрыв

При утечке горючего с температурой кипения $T_K < T_H$, то есть перегретой жидкости на всех стадиях развития аварии возможен взрыв, если степень перегрева такова, что масса мгновенно испарившегося горючего составляет не меньше 10% от общей массы, а общая масса не меньше 1000кг. После взрыва следует пожар пролива. В случае, если степень перегрева мала, этот случай сводится к случаям : $T_H = T_K < T_O$ рассмотренному ранее, только с учетом мгновенно испарившейся массы;

или к случаю $T_H = T_K > T_O$ тоже рассмотренному раньше и так же с учетом мгновенно испарившейся массы.