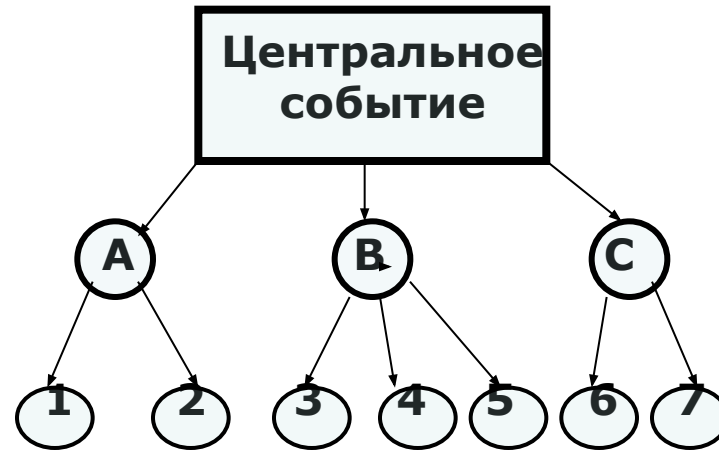


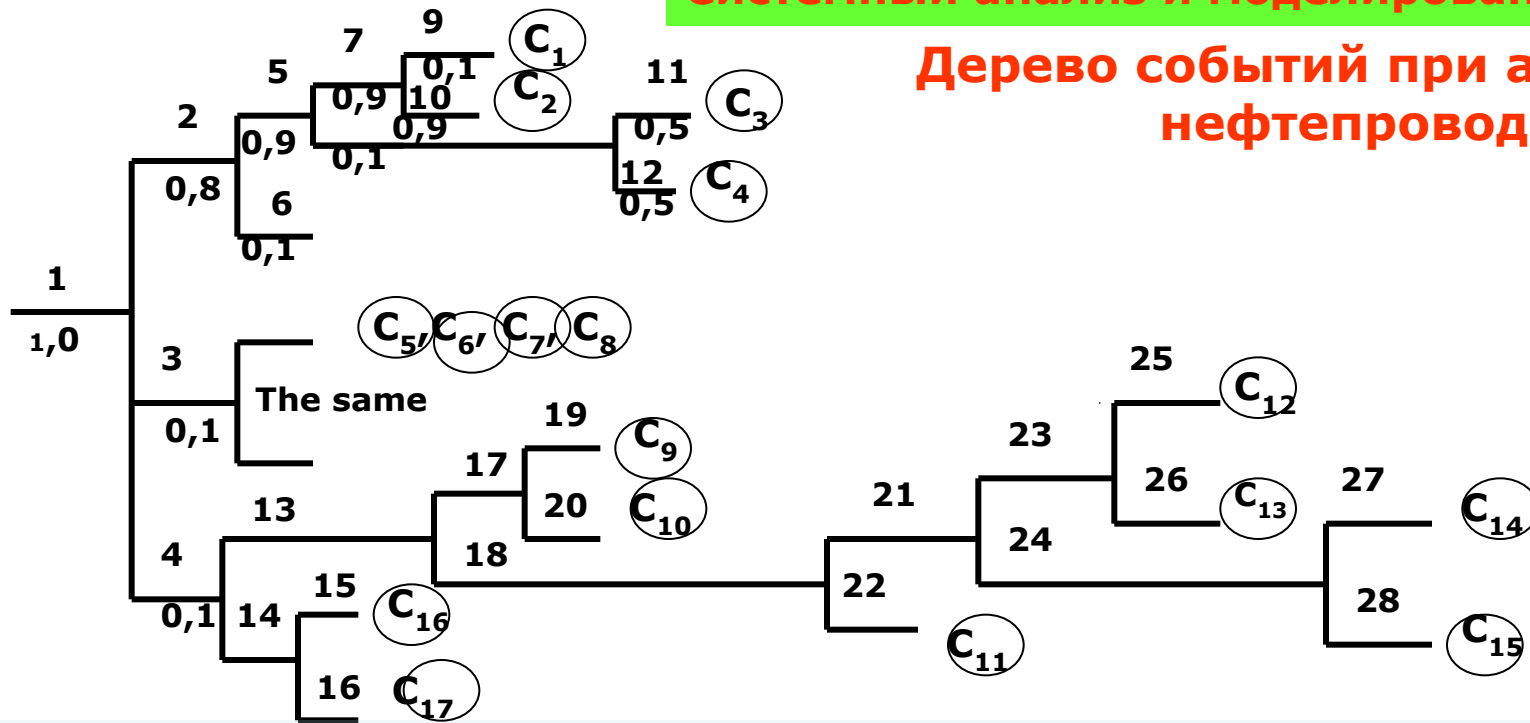
### 3.4 Моделирование процессов с использованием «дерева событий»



***Дерево событий (дерево исходов)*** – вероятностный граф (многоярусное «дерево решений»), построенное таким образом, что *сумма вероятностей каждого деления равна единице*, т.е. все события каждого уровня должны образовывать *полную группу независимых событий*.

**В качестве центрального события всегда рассматривается какое-либо происшествие, а ветви являются сценариями развития.**

## Дерево событий при аварии на нефтепроводе



1. Разгерметизация трубопровода; 2. образование «свища»; 3. образование трещины; 4. «гильотинное» сечение; 5. истечение без воспламенения; 6. истечение с воспламенением; 7. образование первичного облака; 8. образование факела; 9. взрыв (горение) первичного облака (C<sub>1</sub>); 10. рассеяние облака (C<sub>2</sub>); 11. ликвидация аварии (C<sub>3</sub>); 12. тепловое воздействие на соседние объекты (C<sub>4</sub>); 13. истечение с образование пролива; 14. воспламенение струи; 15. тепловое воздействие на соседние объекты (C<sub>16</sub>); 16. ликвидация аварии (C<sub>17</sub>); 17. Воспламенение пролива (пожар разлива); 18. испарение с образованием ПВО; 19. тепловое воздействие на соседние объекты (C<sub>9</sub>); 20. ликвидация пролива (C<sub>10</sub>); 21. воспламенение ПВО; 22. Рассеяние ПВО (C<sub>11</sub>); 23. горение ПВО; 24. Взрыв ПВО; 25. прекращение горения ПВО (C<sub>12</sub>); 26. тепловое воздействие на соседние объекты (C<sub>13</sub>); 27. воспламенение ПВО (C<sub>14</sub>); 28. рассеяние ПВО (C<sub>15</sub>).

## Рекомендуемые значения частот аварий на стационарных объектах

Тип объекта	W	Размер утечки
<b>Химические заводы</b>		
Резервуары (изотермическое хранение с двойной оболочкой)	$1 \cdot 10^{-6}$ (резервуар*год) <sup>-1</sup>	90% - выброс через отверстие 1" до тех пор, пока утечка не будут остановлена; 10% - мгновенный выброс
Резервуары с одинарной оболочкой или сосуды под давлением	$1 \cdot 10^{-4}$ (резервуар*год) <sup>-1</sup>	10% - выброс через отверстие 1" до тех пор, пока утечка не будут остановлена; 90% - мгновенный выброс
Трубопроводы	$5 \cdot 10^{-6}$ (м*год) <sup>-1</sup>	90% - выброс через отверстие 1" до тех пор, пока утечка не будут остановлена; 10% - полный разрыв
Шланги, рукава	$10^{-2}$ (шланг*год) <sup>-1</sup>	полный диаметр шланга до полной остановки потока
<b>ОЭ общего назначения, объекты водоочистки</b>		
Резервуары для хранения стабильных жидкостей	$1 \cdot 10^{-4}$ (резервуар*год) <sup>-1</sup>	90% - выброс через отверстие 1" до тех пор, пока утечка не будут остановлена; 10% - мгновенный выброс
Трубопроводы (L > 30 м)	$5 \cdot 10^{-6}$ (м*год) <sup>-1</sup>	90% - выброс через отверстие 1" до тех пор, пока утечка не будут остановлена; 10% - полный разрыв

## 4. Моделирование процессов истечения

Вероятность образования продольной трещины с характерным размером  $L_p$

$$W(L_p) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{L_p}{0,7}\right)^{1,6}\right]$$

№	Фактор	Доля
1	Внешнее антропогенное воздействие	0,20
2	Коррозия	0,10
3	Качество производства труб	0,05
4	Качество строительного-монтажных работ	0,10
5	Конструктивно-технологические факторы	0,10
6	Природное воздействие	0,10
7	Эксплуатационные факторы	0,05
8	Дефекты материалов и сварных швов	0,30

## 4. Моделирование процессов истечения

### 4.1 Истечение газа при разрыве трубопровода на полное сечение

3-н сохранения массы	$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho w) = 0$
3-н сохранения импульса	$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho w) + \frac{\partial}{\partial x} (P + \rho w^2) = -\lambda \frac{\rho w^2}{2d_0}$
3-н сохранения энергии	$\frac{\partial}{\partial \tau} \left[ \rho \left( e + \frac{w^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho w \left( i + \frac{w^2}{2} \right) \right] = \frac{4\alpha}{d_0} (T_{cp} - T)$
	$F(\rho, P, T) = 0$

где:  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения;  $\rho$  – плотность;  $\tau$  – время;  $w$  – осредненная по сечению трубы скорость потока;  $P$  – давление;  $e, i$  – удельные внутренняя энергия и энтальпия;  $d_0$  – внутренний диаметр трубы;  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи газа с окружающей средой;  $T, T_{cp}$  – температуры газа и окружающей среды.

## Истечение газа при разрыве трубопровода на полное сечение (продолжение)

Уравнения состояния для природного газа  
(термодинамическое соотношение Бертло)

$$P = z\rho\tilde{R}T; \quad z = 1 + 0,071 \cdot \frac{P}{T} \cdot \frac{T_*}{P_*} \cdot \left[ 1 - 6 \cdot \left( \frac{T_*}{T} \right)^2 \right]$$

где  $P_*$ ,  $T_*$  – «псевдокритические» значения температуры и давления (для смеси углеводородов);

**При «мгновенном» аварийном разрушении газопровода «на полное сечение» в сечении разрыва формируются критические условия истечения.**

$$w(0) = w_{кр} = a; \quad G_{кр} = \mu \frac{\pi d_0^2}{4} \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \rho \cdot P}$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода;  $a$  – скорость звука,  
 $G_{кр}$  – критический массовый расход.

## Истечение газа при разрыве трубопровода на полное сечение (продолжение)

### Уравнение Белла

$$G(\tau) = \frac{\Gamma G_n}{1 + \eta} \exp\left(-\frac{\tau}{\eta^2 \varepsilon}\right) + \eta \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon}\right)$$

где  $G, G_n$  – соответственно текущий и начальный расход газа, кг/с;

$\tau$  – время с момента разрыва, сек;

$\Gamma$  – фактор инерционной задержки ( $\sim 0,5$ );

$\eta$  – коэффициент сохранения массы;

$\varepsilon$  – постоянная времени, сек.

$$G_n = \frac{P_n A_p \sqrt{k}}{\sqrt{R Z_{кр} T_n}} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$$

Здесь  $P_n$  – давление газа в трубопроводе до разрыва, Па;

$A_p$  – площадь поперечного сечения разрыва, м<sup>2</sup>;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(кг.К);

$T_n$  – температура в газопроводе до разрыва, К;

$Z$  – коэффициент сжимаемости по условиям газа на срезе

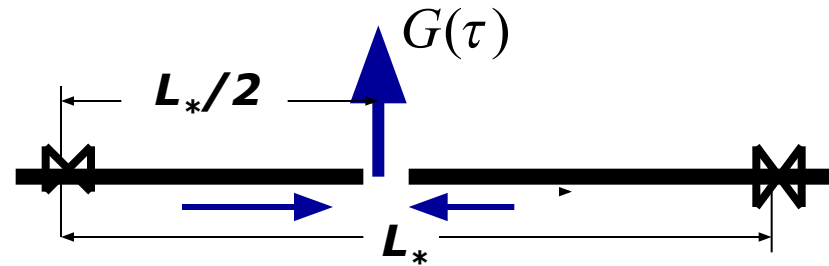
## Истечение газа при разрыве трубопровода на полное сечение (продолжение)

$$\eta = \frac{M_2}{\varepsilon \Gamma G_H}$$

$$\varepsilon = \frac{2 L_*}{3 a_0} \sqrt{\frac{k f_{mp} L_*}{d_0}}$$

$$a_0 = \sqrt{k R Z_H T_H}$$

$$M_2 = \frac{1,3 L_* A_0 d_0}{R Z_H T_H}$$

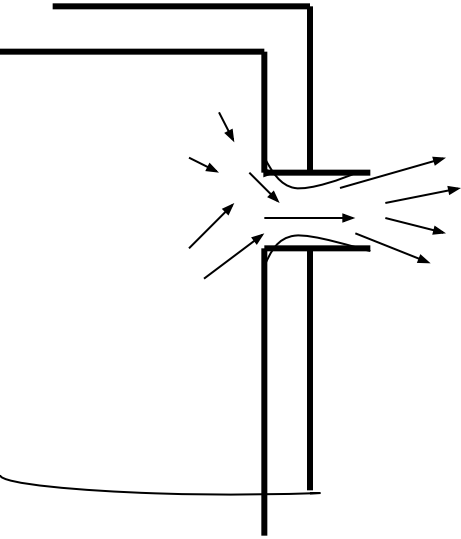


Изменение расхода природного газа при разрыве на полное сечение газопровода

1 – расчет; 2 – эксперимент



## 4.2 Истечение газа при разгерметизации сосуда высокого давления



Допущения:

1. Критическое истечение «идеального газа» из сосуда с «толстой стенкой».
2. Интенсивность внешнего ТО  $\gg$  интенсивности внутреннего ТО и  $T_w \sim T_{oc}$ ;

3. 
$$\frac{dT_g}{d\tau} \gg \frac{dT_w}{d\tau}$$

**Тепловой поток от стенки сосуда к газу**

$$\frac{dq}{d\tau} = \alpha_g F (T_{cm} - T_g)$$

$$Nu = \frac{\alpha_g l}{\lambda_g} = b(Gr \cdot Pr)^{1/3},$$

$$\frac{dp}{d\tau} = \frac{k-1}{k} \left( \frac{dq}{d\tau} - iG \right)$$

## Истечение газа при разгерметизации сосуда высокого давления (продолжение)

Изменение параметров состояния газа

$$\frac{dP}{d\rho} = \frac{k-1}{G} \left( \frac{dq}{d\tau} - iG \right)$$

где  $i = \frac{k}{k-1} RT_0$  энтальпия газа;  
 $P$  – давление,  
 $G$  – массовый расход газа

$$G = \mu f_0 \frac{p}{\sqrt{T_g}} \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{1}{R}}$$

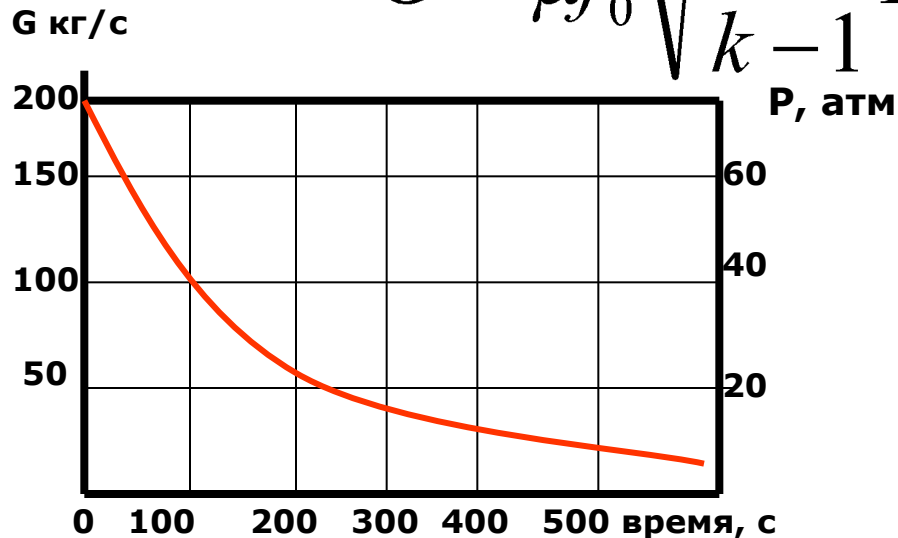
## Истечение газа при разгерметизации сосуда высокого давления (продолжение)

При снижении давления в сосуде до величины

$$P(\tau) \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k+1}} \leq P_{атм}$$

в сечении истечения устанавливается давление  $P_{атм}$  и  $G=f(P/P_{атм})$

$$G = \mu f_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1} P \rho \left[ \left( \frac{P_{атм}}{P} \right)^{2/k} - \left( \frac{P_{атм}}{P} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$



**Метан.**  
 $V = 600 \text{ м}^3$ ;  $P_H = 80 \text{ атм}$ ;  
 $T_H = 258 \text{ К}$ ;  $d_0 = 0,15 \text{ м}$ ;