



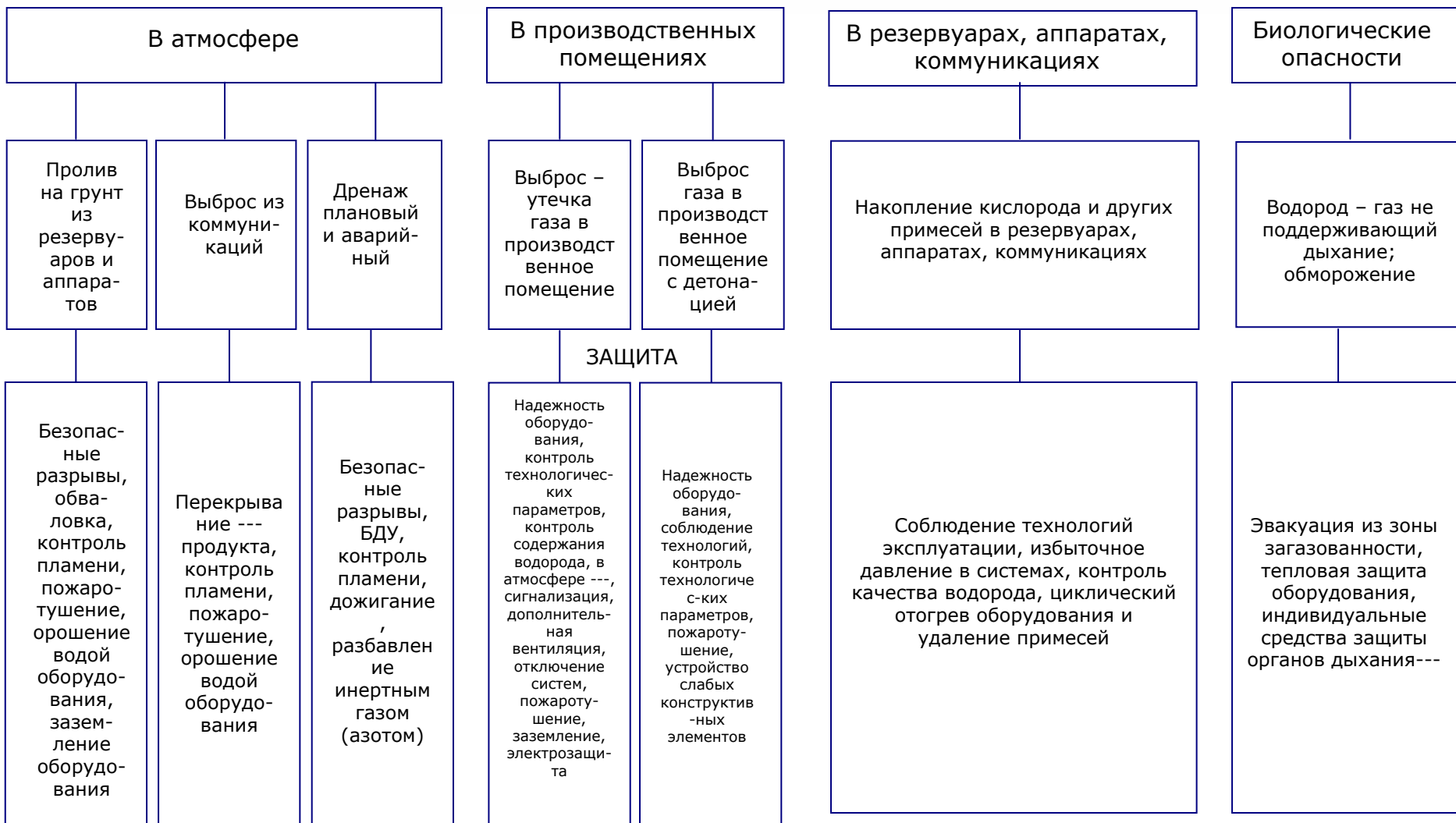
КРИОГЕНМАШ

Проблемы взрывобезопасности при создании и эксплуатации промышленных систем хранения и транспортирования жидкого водорода. Стандарты.

А.М. Домашенко, В.А. Петухов

2009 г.

Аварийные ситуации и опасности



Классификационная схема аварийных ситуаций и опасностей при обращении с водородом в процессах получения, хранения, транспортирования, потребления газообразного и жидкого водорода

Аварийные ситуации в резервуарах, аппаратах, коммуникациях

www.cryogenmash.ru

Возможные аварии связаны с накоплением в ж. H_2 твердого кислорода в процессе проведенных технологических операций.

Содержание микропримесей в ж. H_2 на входе к потребителю:

$$C = C_0 + \Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3 + \Delta C_4$$

C_0 - в исходном продукте

ΔC_1 - увеличение за счет несовершенства подготовки

ΔC_2 - увеличение вследствие испарения при охлаждении

ΔC_3 - увеличение за счет испарения при хранении и вытеснении

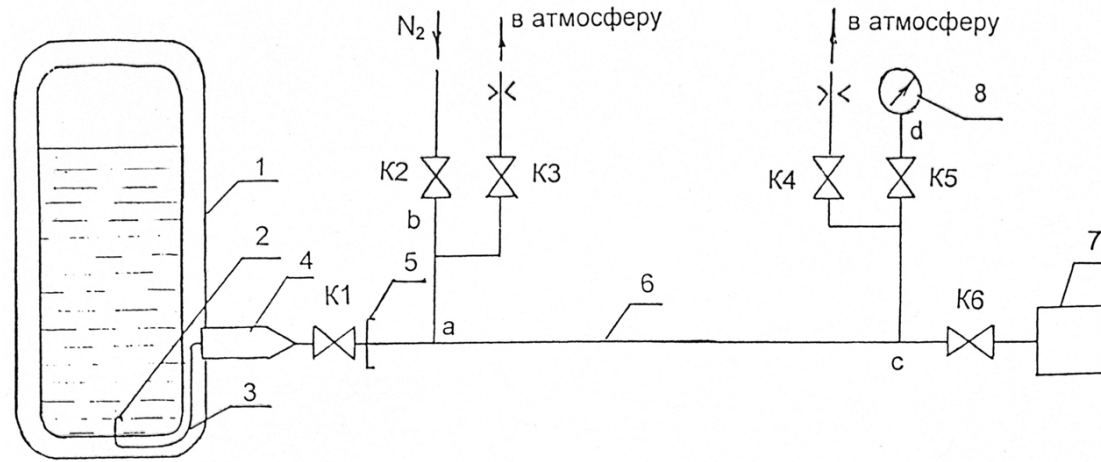
ΔC_4 - увеличение за счет конденсации газа наддува

$$\Delta C_1 = C_k \rho_g / \rho_{ж}; \quad \Delta C_2 = C_0 M_{0_{жл}} / M$$

$$\Delta C_3 = (C_0 + \Delta C_1 + \Delta C_2) M_H / (M - M_H); \quad \Delta C_4 = C_H M_H / (M - M_H); \quad - \text{при наддуве сторонним продуктом};$$

$$\Delta C_4 = (C_0 + \Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3) M_H / (M - M_4 - M_H); \quad - \text{при наддуве парами хранимого продукта}$$

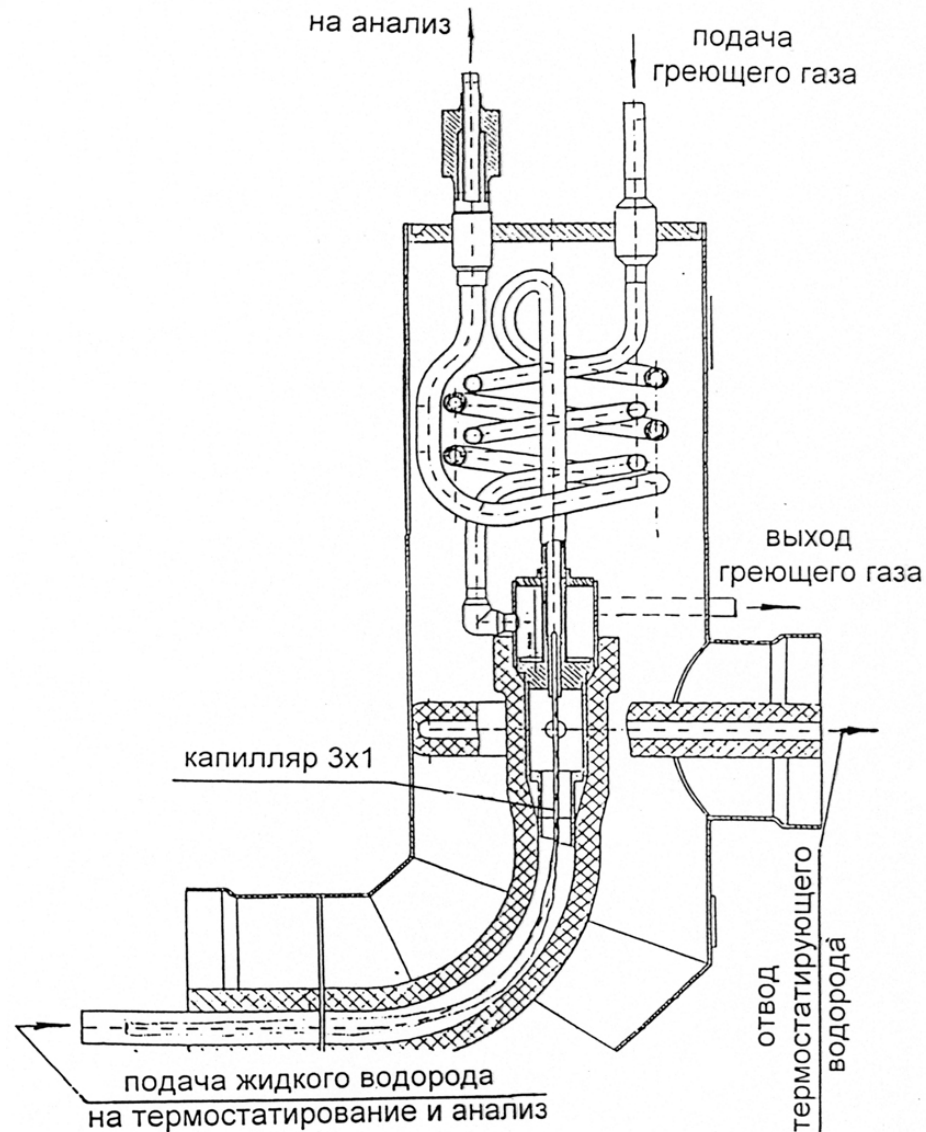
Схема взятия анализа на содержание примесей в жидком водороде



1. Резервуар с жидким водородом.
2. Устройство для вывода жидкого водорода на анализ.
3. Трубопровод подающий жидкий водород к пробоотборнику.
4. Пробоотборник.
5. Разъем.
6. Аналитическая коммуникация.
7. Хроматограф.
8. Манометр.

Пробоотборник капиллярного типа производства Криогенмаш

www.cryogenmash.ru

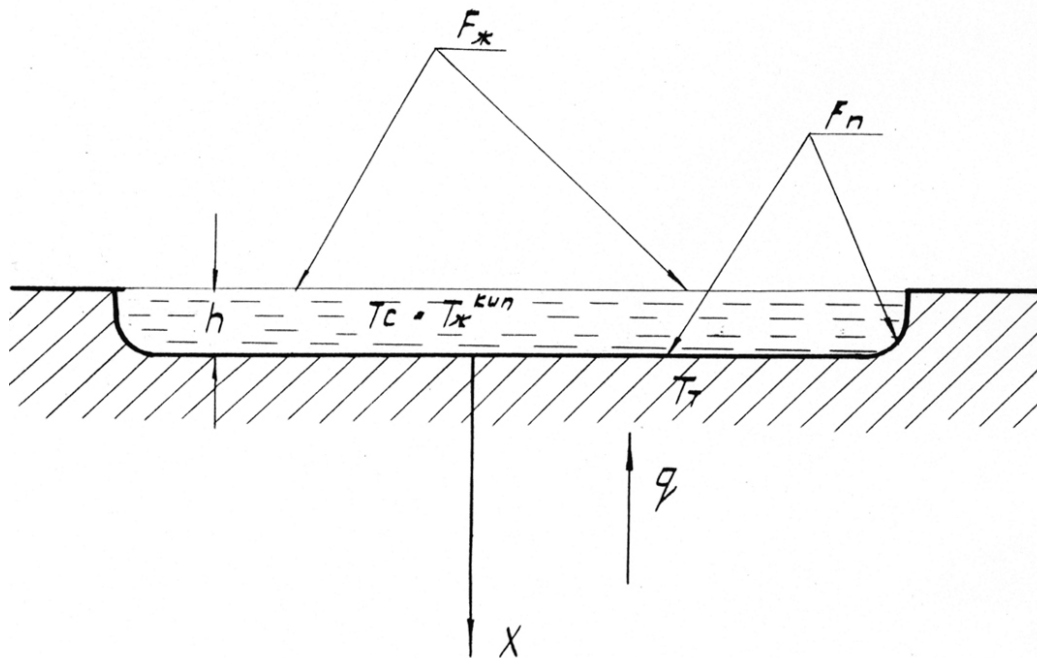


Пролив ж. H_2 на грунт.

Выброс водорода в атмосферу.

Газосброс водорода.

Пролив жидкого водорода на грунт



Схематическое изображение «лужи» жидкого водорода

Распределение концентраций

Полный расход тепла и количество испарившейся жидкости:

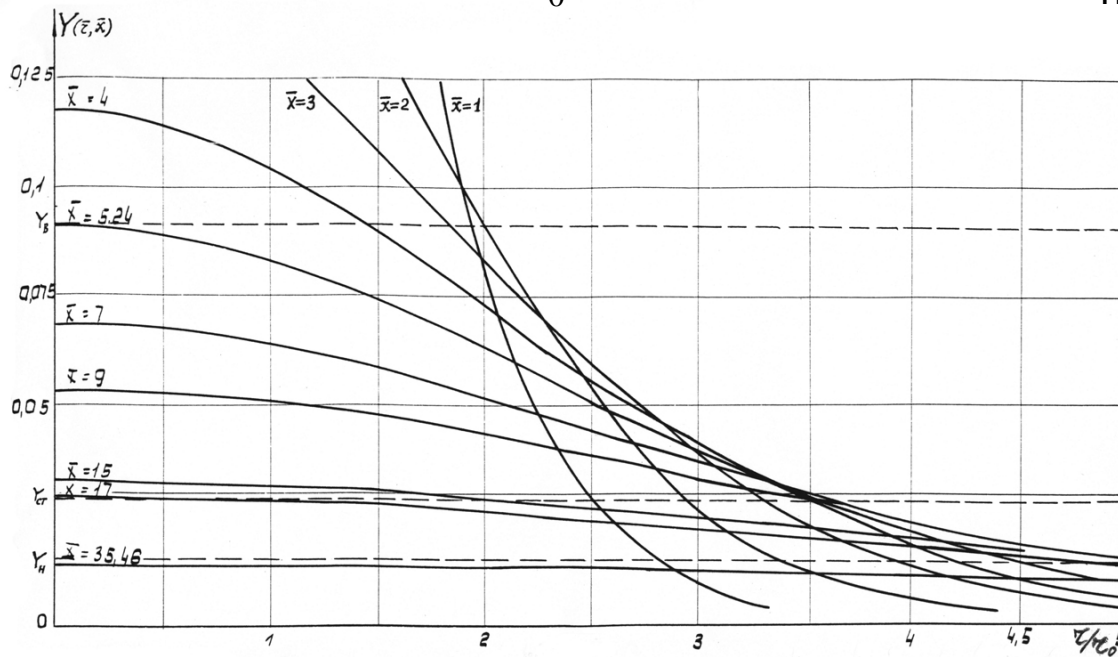
$$1. Q_{нл} = \alpha(T_0 - T_c) \cdot Fn \int_0^t e^{H^2 \alpha t} \cdot \operatorname{erfc} H \sqrt{at} \cdot dt$$

$$2. M_{нл} = \alpha \frac{(T_0 - T_c)}{r} \cdot Fn \int_0^t e^{H^2 \alpha t} \cdot \operatorname{erfc} H \sqrt{at} \cdot dt$$

Распределение концентраций:

$$3. Y(\bar{r}, z) = \frac{1}{\bar{x}} e^{-\frac{\bar{r}^2}{2\bar{x}}} \int_0^1 e^{-\frac{\lambda^2}{2\bar{x}}} J_0\left(\lambda \frac{\bar{r}}{\bar{x}}\right) \lambda d\lambda$$

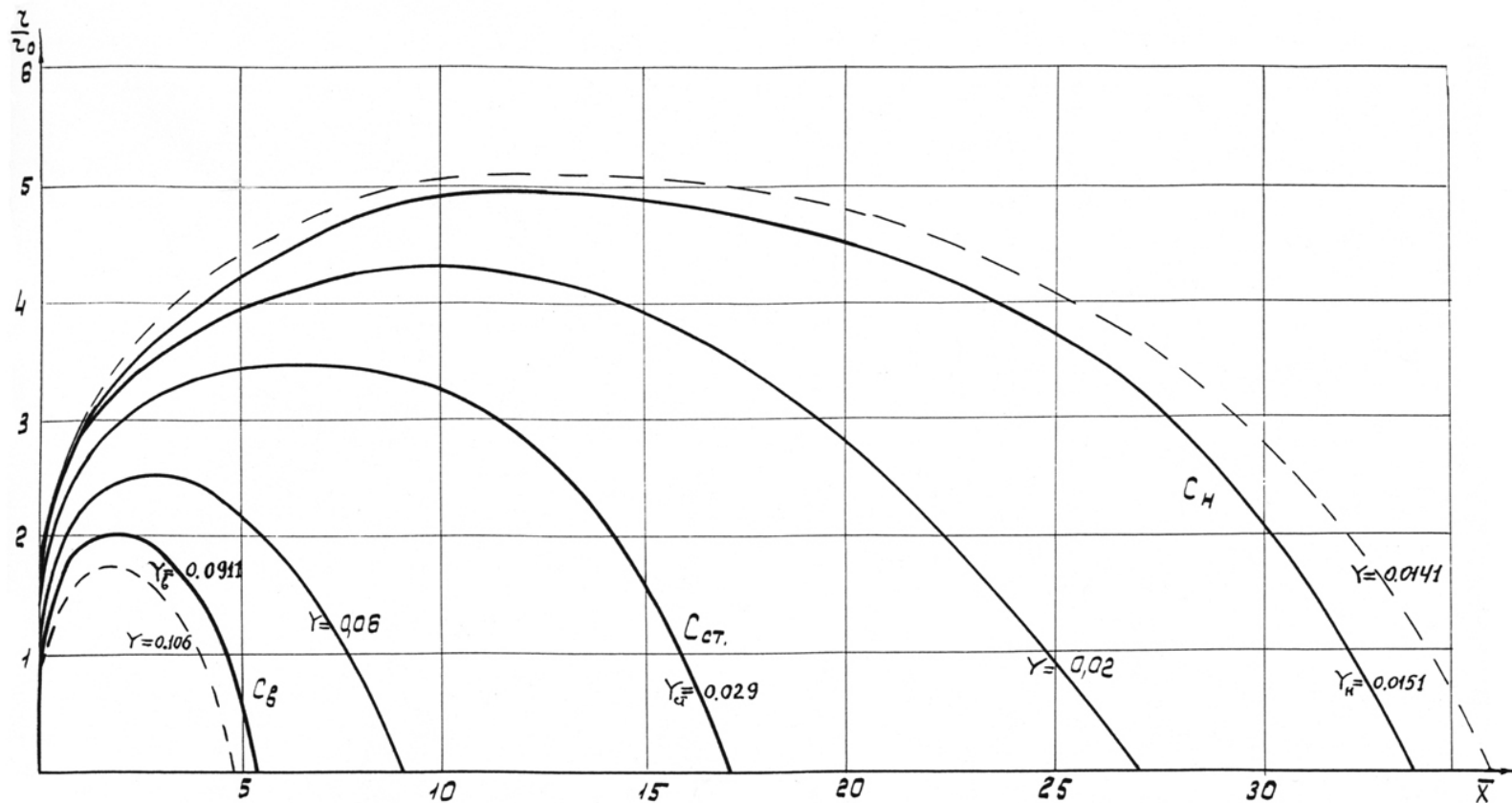
$$4. J_0\left(\lambda \frac{\bar{r}}{\bar{x}}\right) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{1}{(p)^2} \left(\frac{1}{2} \frac{\lambda \bar{r}}{\bar{x}}\right)^{2p}$$



Распределение концентраций при испарении ж. N_2 в воздух в зависимости от $r = r \setminus r_0$

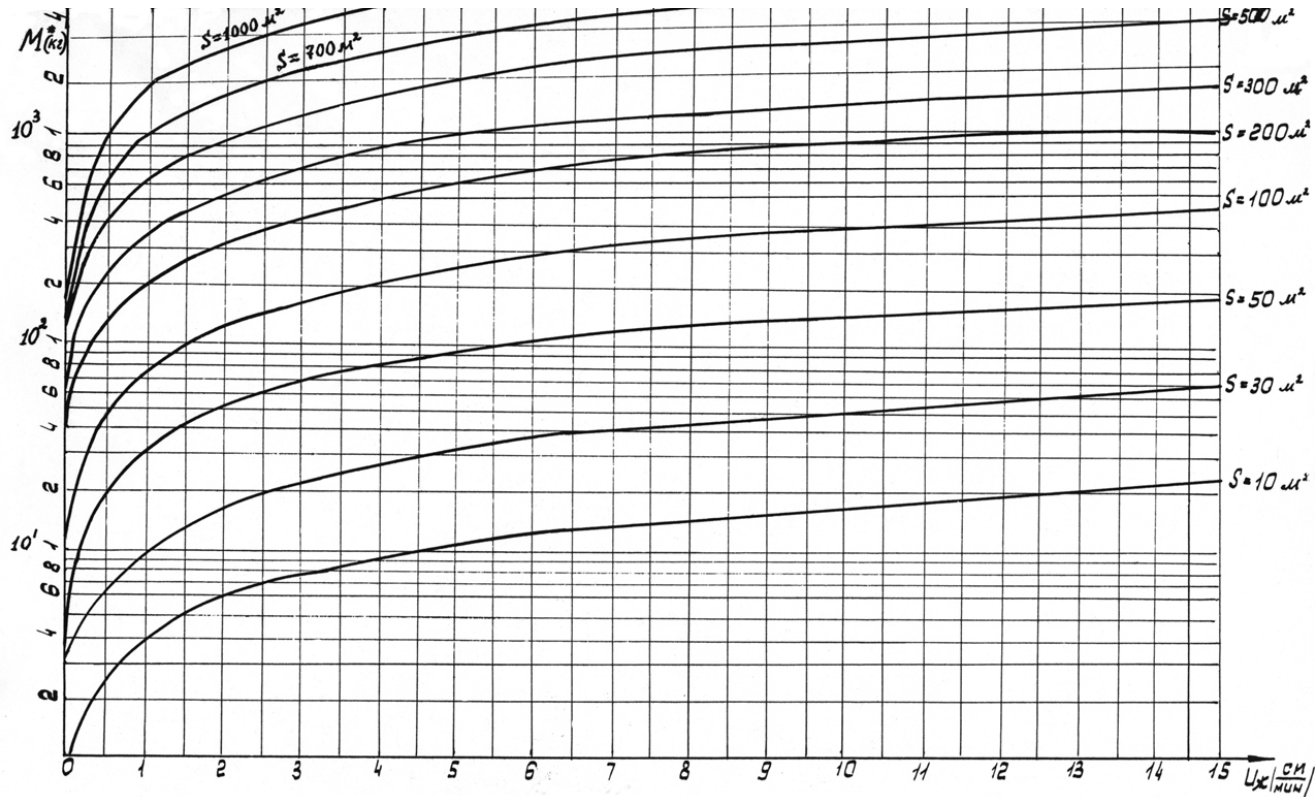
для различных значений $\bar{x} = \frac{2 \epsilon x}{U_0 r_0^2}$

Линии равных значений концентрации при испарении жидкого водорода в воздух



Зависимость взрывоопасности массы водорода при испарении в воздух от скорости испарения и площади пролива

www.cryogenmash.ru



$$M^* = 0,175 \rho^{4/3} U_{\text{ж}}^{2/3}$$

$$C_{\text{ЭКВ}} = 50 F_{\text{ж}}; \quad C_{\text{ЭКВ}} \text{ в кг. ТНТ}$$

$$R_{\text{без}} = \kappa_1 \sqrt[3]{C_{\text{ЭКВ}}} \quad \text{при } C_{\text{ЭКВ}} > 1000$$

$$R_{\text{без}} = \kappa_2 \sqrt[3]{C_{\text{ЭКВ}}} \quad \text{при } C_{\text{ЭКВ}} < 1000$$

Выброс водорода в атмосферу

Распределение концентраций $C(r, t)$ имеет вид:

$$C(\bar{r}, z) = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{\bar{r}+1}{z} \right) - \Phi \left(\frac{\bar{r}-1}{z} \right) \right] + \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{z}{\bar{r}} \left[e^{-\left(\frac{\bar{r}+1}{z} \right)^2} - e^{-\left(\frac{\bar{r}-1}{z} \right)^2} \right]$$

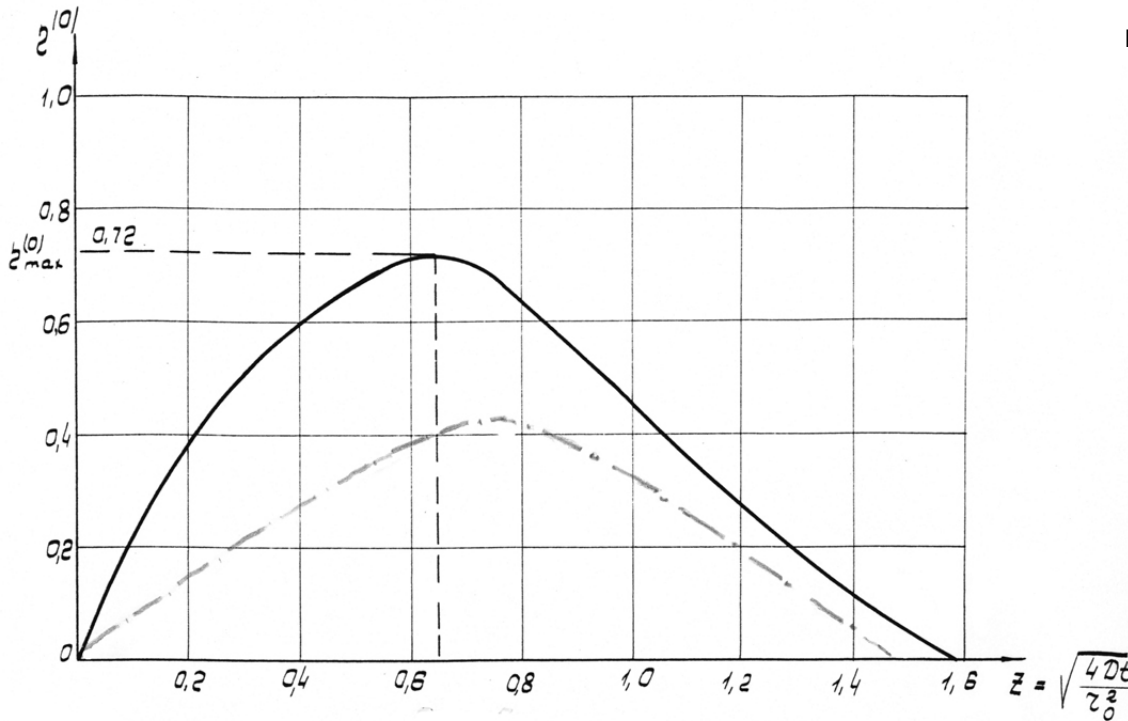
$$\frac{M_e}{X} = \frac{4\pi}{x} \mu_2 n r_0^3 \int_{\frac{\bar{r}_e}{6}}^{\bar{r}_{cm}} (1 - C(\bar{r})) \bar{r}^2 d\bar{r}$$

Значение взрывоопасной массы:

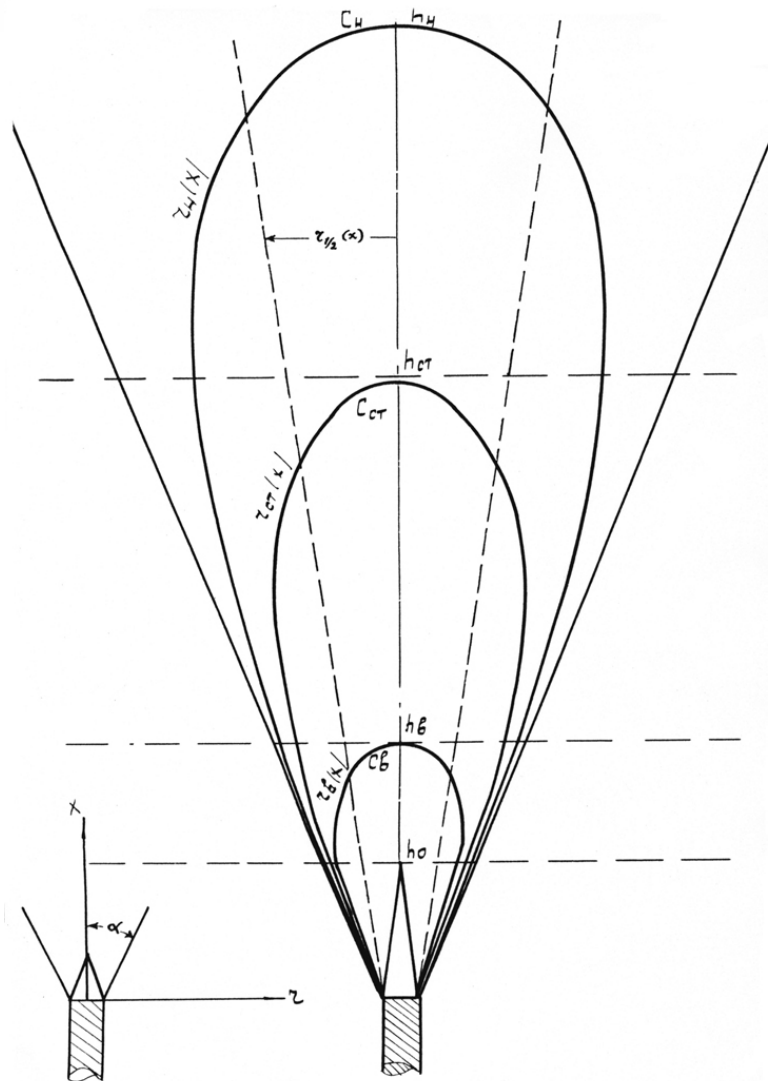
$$M_H = 4\pi \mu_1 n r_0^3 \int_{\frac{\bar{r}_{cm}}{6}}^{\bar{r}_H} C(\bar{r}) \bar{r}^2 d\bar{r}$$

$$\frac{M_e}{X} = \frac{4\pi}{x} \mu_2 n r_0^3 \int_{\frac{\bar{r}_e}{6}}^{\bar{r}_{cm}} (1 - C(\bar{r})) \bar{r}^2 d\bar{r}$$

n – число молей в смеси ($n = \text{const}$)



Зависимость отношения взрывоопасной массы к первоначальной массе от $\sqrt{\frac{4Dt}{r_0^2}}$ Z = мгновенной выдаче водорода в воздух (-) и кислорода (- - - -)



$$\frac{y_6}{R} = \frac{1}{C} \sqrt{\frac{T}{T_N} \left[C + \frac{M_S}{M_N} (1 - C) \right]}$$

$$\frac{L_c}{D} = \frac{1,87}{C} \sqrt{\frac{T_S}{T_N} \left[C + \frac{M_S}{M_N} (1 - C) \right]}$$

$$\frac{L_{nl}}{D} = \frac{5,3}{C_T} \sqrt{\frac{T_{nl}}{\alpha_T T_N} \left[C_T + \frac{M_S}{M_N} (1 - C_T) \right]}$$

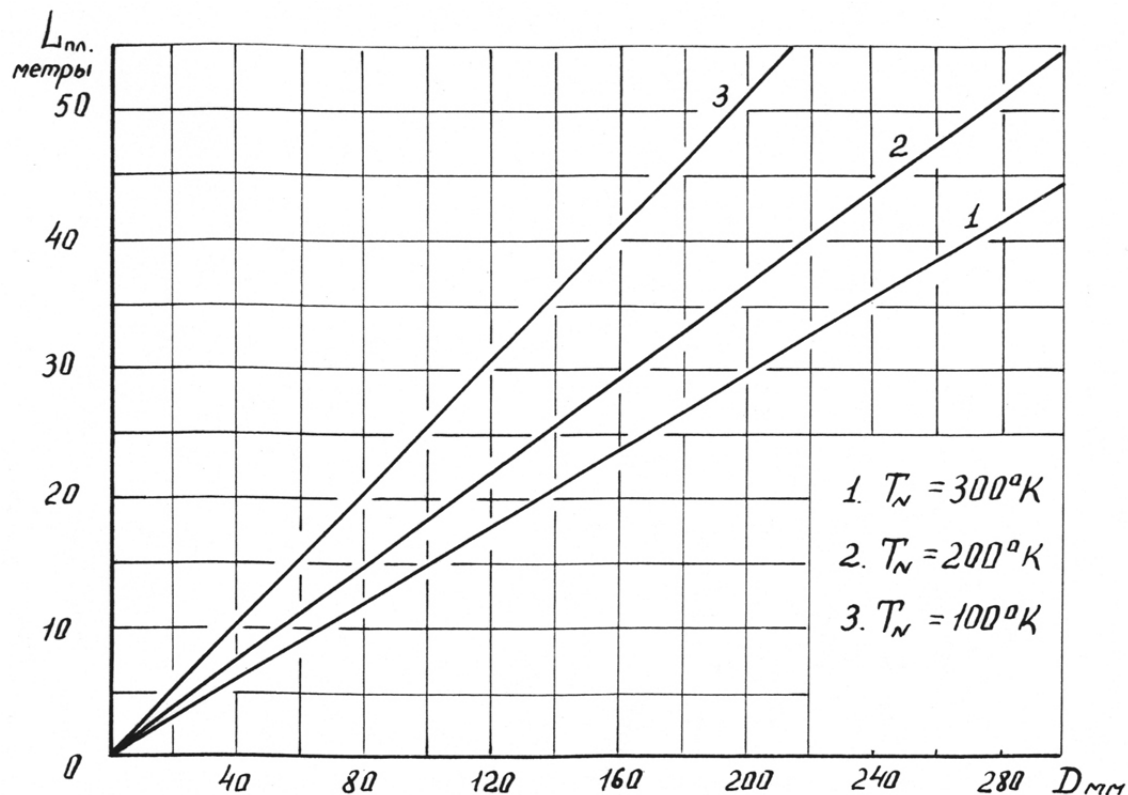
Высота турбулентного диффузионного пламени водорода в зависимости от диаметра отверстия истечения. T_N - температура вытекающего водорода

Иллюстрация к расчету взрывоопасной массы водорода для турбулентной струи

Высота турбулентного диффузионного пламени водорода

www.cryogenmash.ru

В зависимости от диаметра отверстия истечения.
 T_N - температура вытекающего водорода



ПО БЕЗОПАСНОСТИ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАЩЕНИЯ С ЖИДКИМ ВОДОРОДОМ

Правила безопасности при производстве, хранении и работе с водородом. 1974г. Головной исполнитель: ОАО Криогенмаш, исполнитель: ГИПХ, ВНИИПО, Ипромашпром, ГИАП.

Оборудование криогенной. Системы транспортирования и хранения жидкого водорода. Общие требования к эксплуатации. СТП2082-561-2—6. Головной исполнитель: ОАО «Криогенмаш», исполнители: ГИПХ, НИИХиммаш.

Водород жидкий. Определение содержания примесей. РД2082-33-2—3. Головной исполнитель: ОАО Криогенмаш, исполнители: НТА"Наука".



КРИОГЕНМАШ

ОАО "Криогенмаш"

Россия, 143907, Московская область,
г. Балашиха, проспект Ленина, 67

тел.: +7 (495) 505-9303

факс: +7 (495) 521-5722

e-mail: market@cryogenmash.ru

web-site: www.cryogenmash.ru