



Термодинамический анализ процесса распространения облака тяжелого газа при промышленных авариях (на основе РД 03-26-2007)

Р.А. Попов, А.А. Попов,
И.С. Чугунов, А.В. Шерстнев

ЗАО «Технориск»
410076, г. Саратов
4 пр. им. Чернышевского, д. 3
тел.: (8452) 549-549
mail: info@technorisk.ru
www.technorisk.ru

**Семинар НП НТЦ «Промышленная безопасность»
«Декларирование промышленной и пожарной безопасности
Методы и программные средства оценки риска»**

г. Москва 20-21 октября 2009 г.

Исходные уравнения расчета эффективных термодинамических характеристик облака

Закон Дальтона

$$p_a = p_{ОВ}(t) + p_{ВОЗД}(t)$$

Уравнение состояния подмешанного воздуха

$$p_{ВОЗД}(t) = R_{ВОЗД} \cdot \frac{m(t) \cdot T(t)}{V(t)}$$

Первый закон термодинамики

$$dH_{ОВ} + dH_{ВОЗД} - V(t) \cdot (dp_{ОВ} + dp_{ВОЗД}) = dQ$$

Уравнения состояния опасного вещества

влажный пар

перегретый пар

Корреляция Миллера

$$p_{ОВ} = f_1(T)$$

$$q_{КИП} = f_2(T)$$

$$V(t) = M \cdot \chi(t) \cdot v''(T)$$

$$p_{ОВ}(t) = R_{ОВ} \cdot M \cdot \frac{T(t)}{V(t)}$$

Уравнение Клапейрона-Клаузиуса

$$dp_{ОВ} = \frac{q_{КИП}(T)}{T \cdot v''(T)} \cdot dT$$

Уравнения состояния двухкомпонентной газовой смеси, подчиняющейся закону Дальтона

Состояние опасного вещества – перегретый пар

Дифференциальное уравнение объема облака

$$\frac{dV}{dt} = \frac{Q_{mn}(t) + \frac{dm}{dt} \cdot c_{p_{возд}} \left[T_a + \left(\frac{\psi(m)}{\psi_{возд}} - 1 \right) \cdot T(t) \right]}{p_a \cdot \psi(m)}$$

Безразмерные
комплексы

$$\psi(m) = \frac{M \cdot c_{p_{ОВ}} + m(t) \cdot c_{p_{ВОЗД}}}{M \cdot R_{ОВ} + m(t) \cdot R_{ВОЗД}}$$

$$\psi_{ВОЗД} = \frac{c_{p_{ВОЗД}}}{R_{ВОЗД}}$$

Уравнения состояния двухкомпонентной газовой смеси, подчиняющейся закону Дальтона

Состояние опасного вещества – влажный пар

Диф. уравнение эффективной температуры облака

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\bar{m}(t) \cdot q_{mn}(t) + \frac{d\bar{m}}{dt} \cdot \left[\bar{m}(t) \cdot c_{p_{\text{возд}}} \cdot (T_a - T(t)) - \chi(t) \cdot q_{\text{кун}}(T) \right]}{\frac{q_{\text{кун}}(T)}{\Delta T_g(t)} + \bar{m}(t) \cdot c_g(t)}$$

Диф. уравнение степени сухости

$$\frac{d\chi}{dt} = \frac{q_{mn}(t) + \frac{d\bar{m}}{dt} \cdot \left[c_{p_{\text{возд}}} \cdot (T_a - T(t)) + \chi(t) \cdot q_g(t) \right]}{q_{\text{кун}}(T) + \bar{m}(t) \cdot q_g(t)}$$

Эквивалентная разность температур

$$\Delta T_g(t) = \frac{1}{\chi(t) \cdot \left[\frac{\chi(t) \cdot q_{\text{кун}}(T)}{R_{\text{возд}} \cdot T(t)^2} + \bar{m}(t) \cdot \left(\frac{2}{T(t)} + \frac{p_T''}{p_T'} - \frac{q_T'}{q_{\text{кун}}(T)} \right) \right]}$$

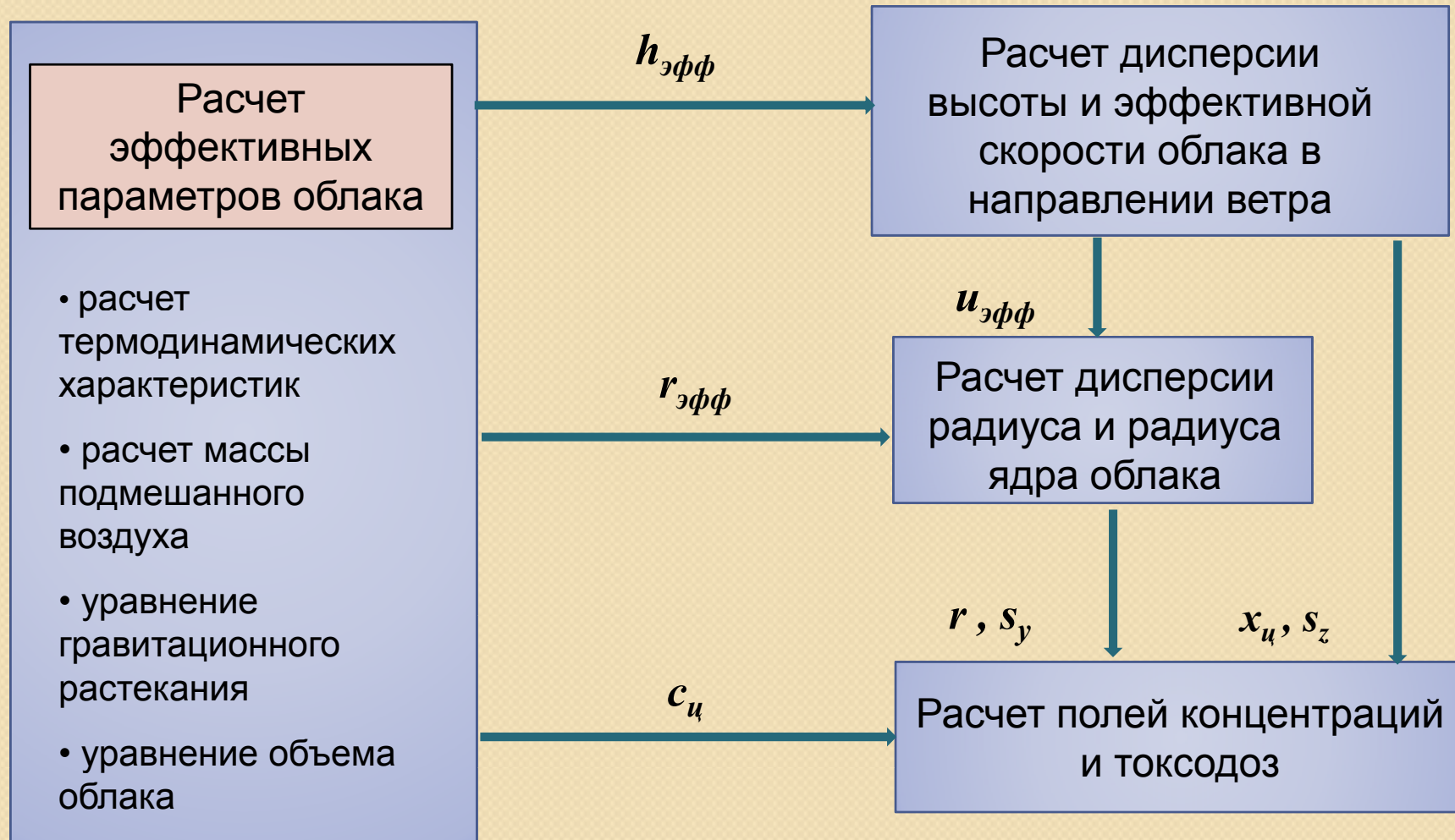
Эквивалентная удельная теплоемкость

$$c_g(t) = c_{ж} + \chi(t) \cdot q_T' + \bar{m}(t) \cdot c_{p_{\text{возд}}}$$

Эквивалентная удельная теплота

$$q_g(t) = c_g(t) \Delta T_g(t)$$

Принципиальная схема расчета процесса рассеивания первичного облака тяжелого газа в атмосфере при промышленных авариях



Система дифференциальных уравнений расчета эффективных характеристик облака

Состояние опасного вещества – перегретый пар

$$\frac{dr}{dt} = f_r(h, m, V)$$

$$\frac{dm}{dt} = f_m\left(\frac{dr}{dt}, r, h, m, V, T\right)$$

$$\frac{dV}{dt} = f_V\left(\frac{dm}{dt}, r, m, T\right)$$

$$V = \frac{M \cdot R_{ог} + m \cdot R_{возд}}{p_a} \cdot T$$

$$V = p \cdot r^2 \cdot h$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= f_{r1}(r, m, V) \\ \frac{dm}{dt} &= f_{m1}\left(\frac{dr}{dt}, r, m, V\right) \\ \frac{dV}{dt} &= f_{V1}\left(\frac{dm}{dt}, r, m, V\right) \end{aligned} \right\}$$

Схема преобразований системы дифференциальных уравнений расчета эффективных характеристик облака

Состояние опасного вещества – влажный пар

$$\frac{dr}{dt} = f_r(h, m, V)$$

$$\frac{dm}{dt} = f_m\left(\frac{dr}{dt}, r, h, m, V, T\right)$$

$$\frac{dT}{dt} = f_T\left(\frac{dm}{dt}, r, m, \chi, T\right)$$

$$\frac{d\chi}{dt} = f_\chi\left(\frac{dm}{dt}, r, m, \chi, T\right)$$

$$V = \frac{M \cdot \chi \cdot q_{\text{кун}}(T)}{T \cdot p_T}$$

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

$$\frac{dr}{dt} = f_{r1}(r, m, \chi, T)$$

$$\frac{dm}{dt} = f_{m1}\left(\frac{dr}{dt}, r, m, \chi, T\right)$$

$$\frac{dT}{dt} = f_T\left(\frac{dm}{dt}, r, m, \chi, T\right)$$

$$\frac{d\chi}{dt} = f_\chi\left(\frac{dm}{dt}, r, m, \chi, T\right)$$

$$t \in [t_0, t_*]$$

$$\frac{dr}{d\chi} = f_{r2}(r, m, T, \chi)$$

$$\frac{dm}{d\chi} = f_{m2}(r, m, T, \chi)$$

$$\frac{dT}{d\chi} = f_{T2}(r, m, T, \chi)$$

$$t_* = \int_{\chi_0}^1 \frac{d\chi}{f_{\chi 2}(r, m, T, \chi)}$$

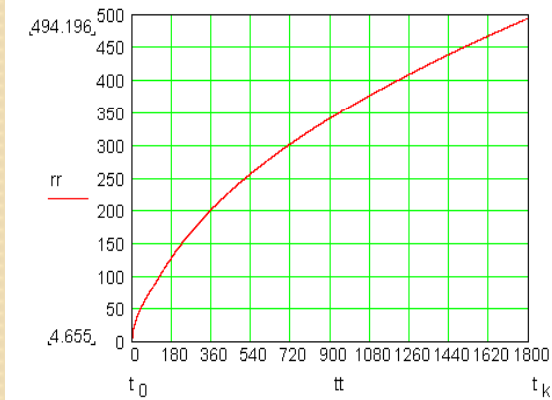
$$\chi \in [\chi_0, 1]$$

Результаты расчета характеристик облака

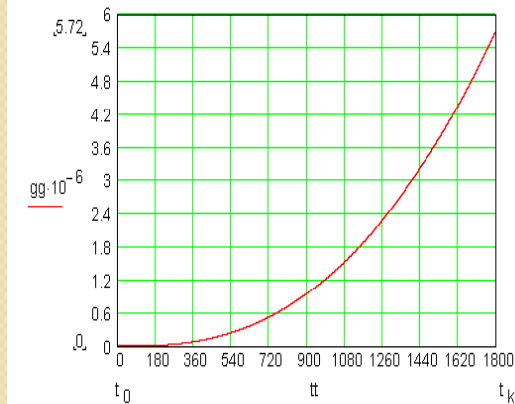
Опасное вещество -
хлор

Исходное состояние опасного вещества – перегретый пар

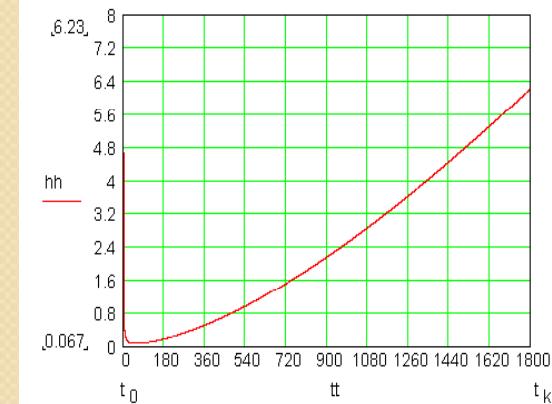
Эффективный
радиус, м



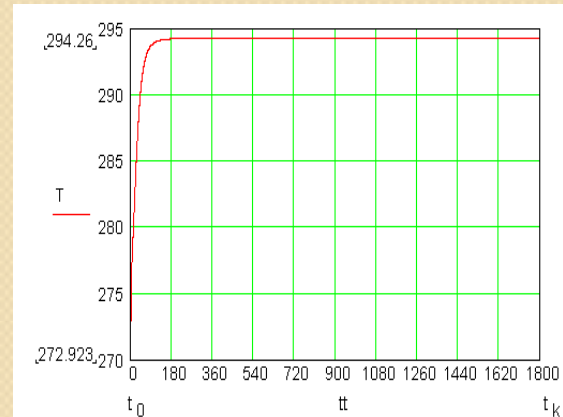
Масса воздуха, т



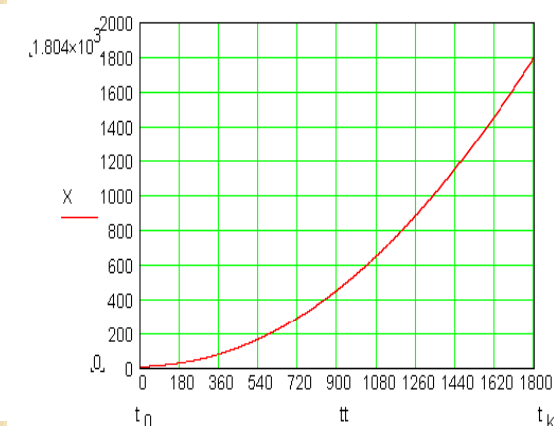
Эффективная
высота, м



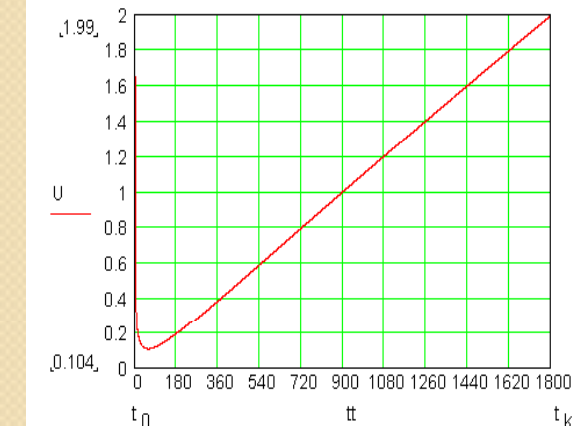
Эффективная
температура, К



Координата центра, м



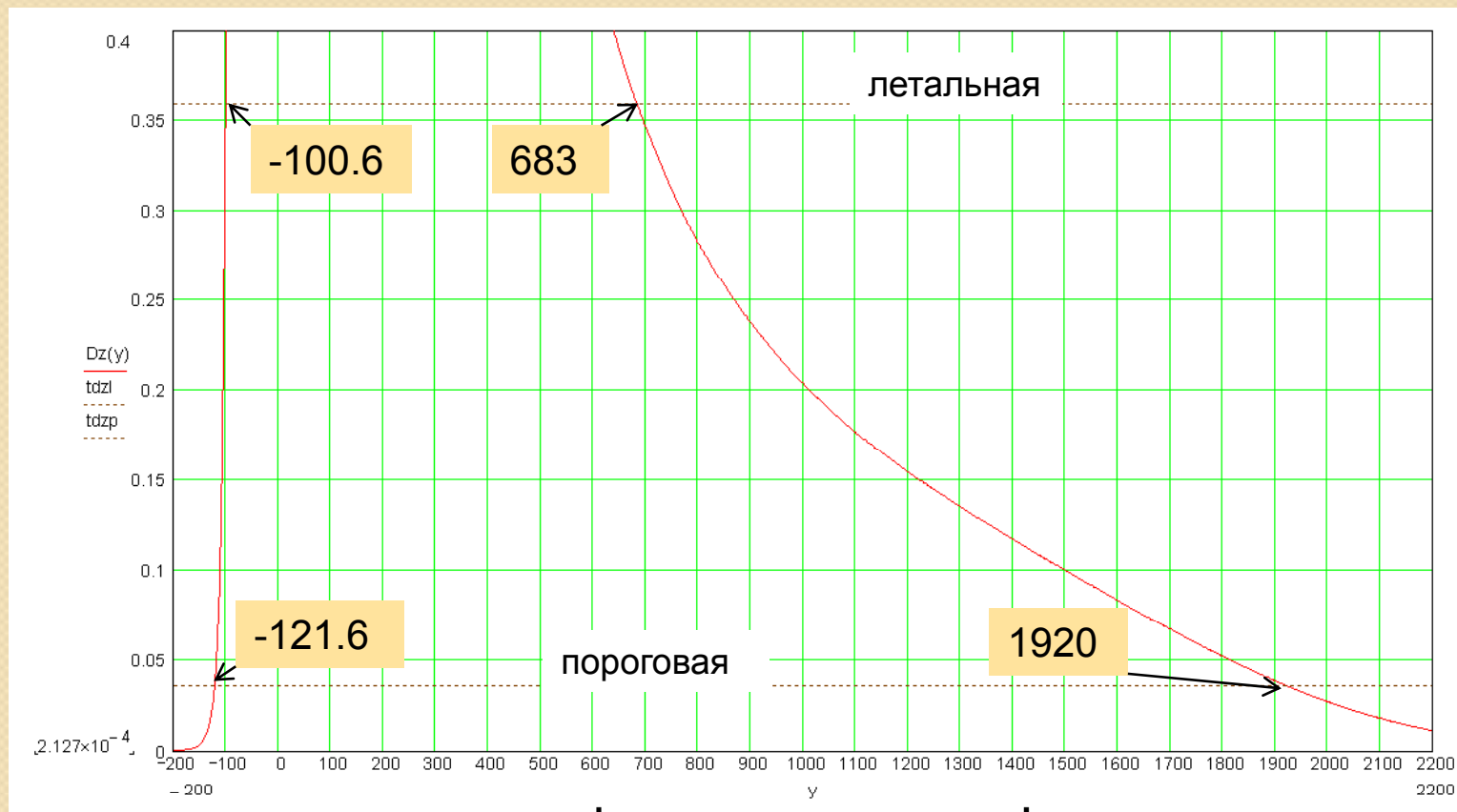
Эффективная
скорость, м/с



Результаты расчета токсодозы

Опасное вещество -
хлор

Исходное состояние опасного вещества – перегретый пар

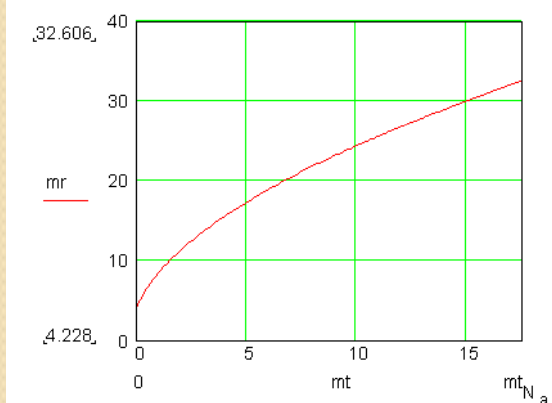


Результаты расчета характеристик облака в зоне парообразования

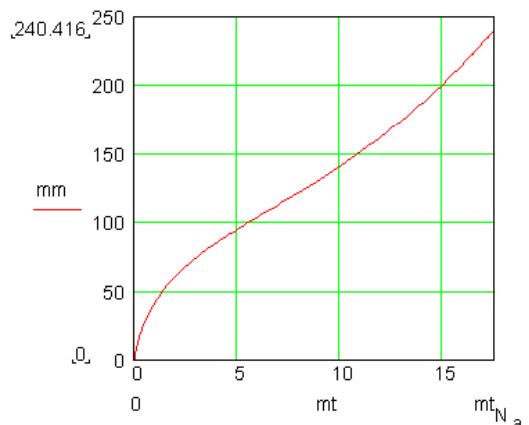
Опасное вещество -
хлор

Исходное состояние опасного вещества – влажный пар

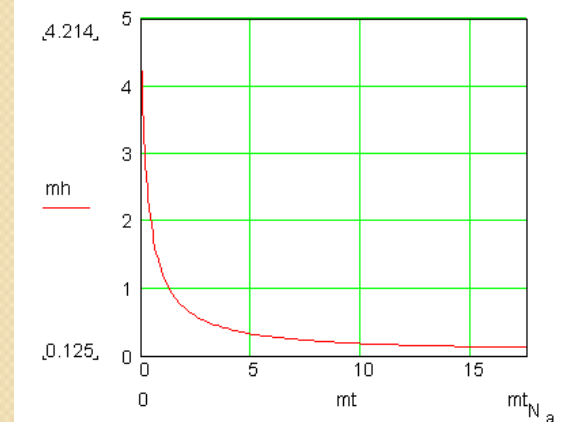
Эффективный
радиус, м



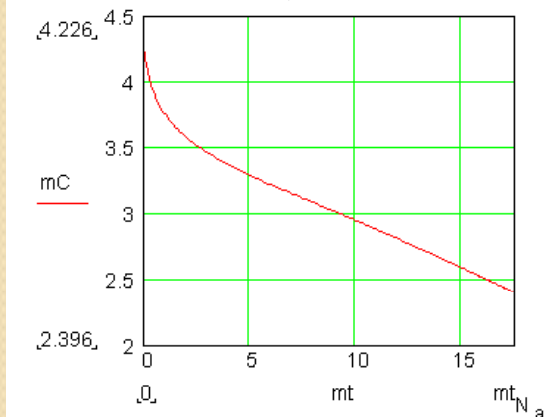
Масса воздуха, кг



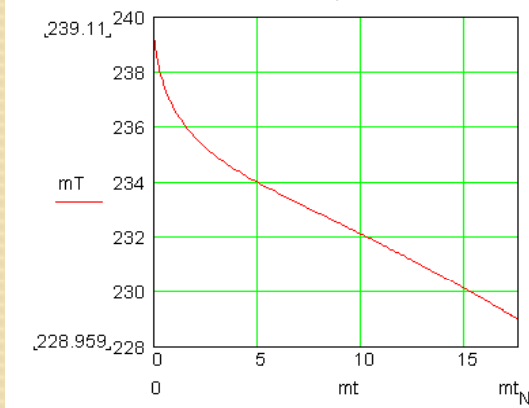
Эффективная
высота, м



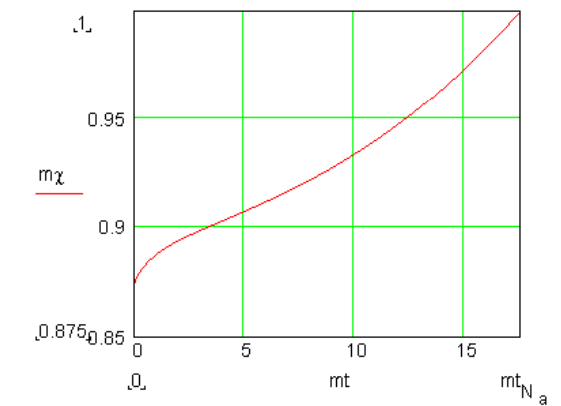
Концентрация
хлора в центре
облака, кг/м³



Эффективная
температура, К



Степень сухости



Основные результаты деятельности ЗАО «Технориск»

Разработано:

- ДЕКЛАРАЦИЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ – **31**;
- ПЛАС – **59**;
- ПЛАРН – **41**;
- ПАСПОРТОВ БЕЗОПАСНОСТИ – **22**.
- ИДЕНТИФИКАЦИИ ОПО – **12**.

Проведено экспертиз:

- ДЕКЛАРАЦИЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ – **63**;
- ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ – **216**;
- ПЛАС – **24**;
- ИНЫХ ДОКУМЕНТОВ, в т. ч. для получения лицензий – **17**;
- ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ – **28**;

тел.: (8452) 549-549

www.technorisk.ru