

Моделирование переходных и аварийных процессов в магистральных нефтепроводах

С.И.Сумской

ГК «Промышленная безопасность»

risk@safety.ru

Введение

•

- **МН являются ОПО, отличаются большой протяженностью, прохождением вблизи разного рода объектов ⇒ особую значимость приобретает анализ**
 - **процесса развития аварии**
 - **последствий**
 - **риска**

Основа решения

- Система уравнений сохранения в различных приближениях
- Граничные условия:
 - - насосы
 - - емкости на входе/выходе
 - - отверстия разрушения
 - -стыки разных диаметров
 - - арматура разной степени закрытия
 - - предохранительные клапаны
 - - регуляторы
 - - ветвления

Уравнения, описывающие движение нефти и ее утечку

- Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho u)}{\partial x}$$

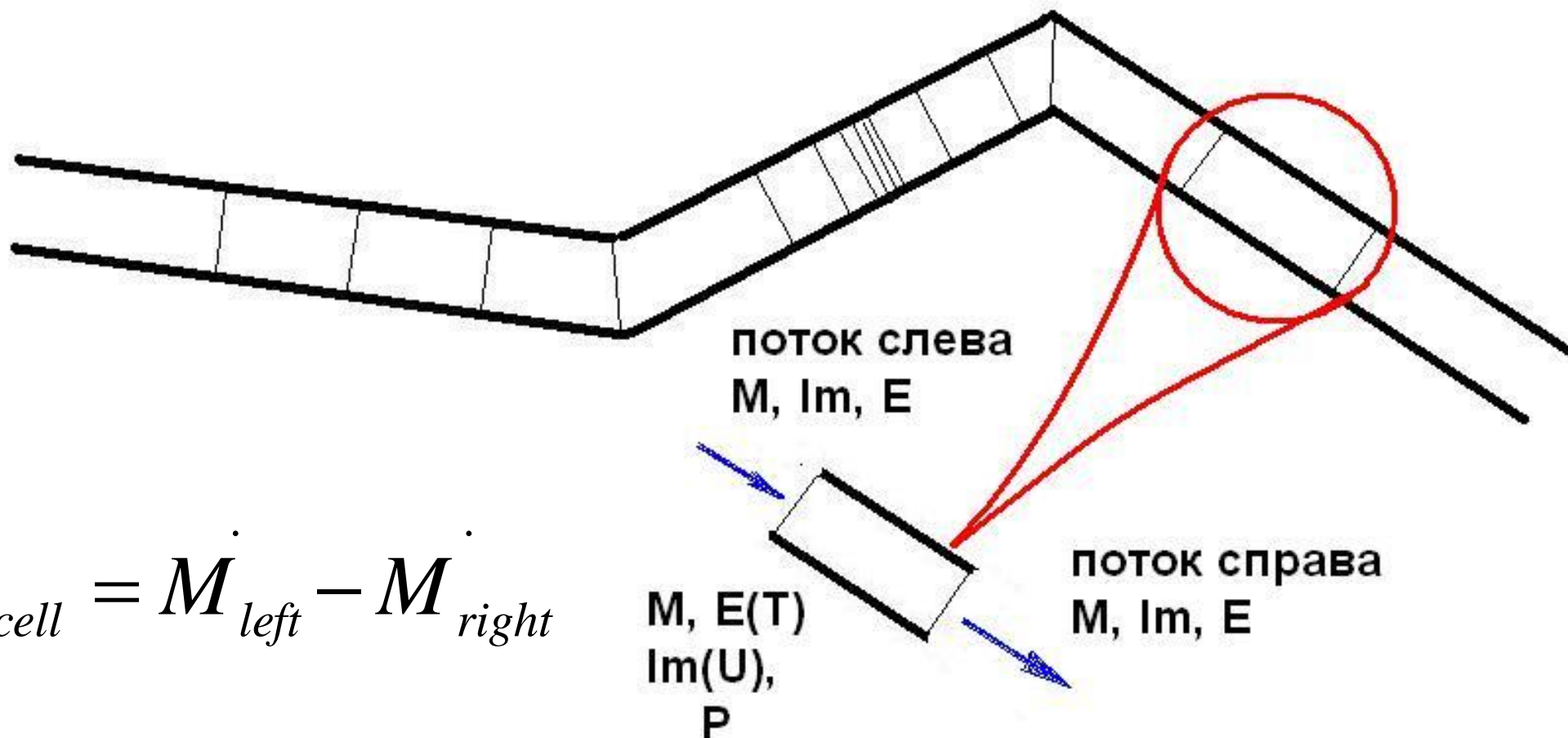
- Уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho u^2 + P)}{\partial x} - f(\text{Re}) \frac{\rho u^2}{2D} + \rho g h$$

- ...

Способы решения уравнений

- Метод Годунова



$$M_{cell} = M_{left} - M_{right}$$

Расчет по методу Годунова

- Распад разрыва

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{Пр}} - P_{i+1}^n = \rho_{i+1}^n \cdot C_{i+1}^n \cdot (u_{\text{Пр}} - u_{i+1}^n) \\ P_{\text{Пр}} - P_i^n = -\rho_i^n \cdot C_i^n \cdot (u_{\text{Пр}} - u_i^n) \end{array} \right. \rightarrow$$
$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{Л}} - P_i^n = \rho_i^n \cdot C_i^n \cdot (u_{\text{Л}} - u_i^n) \\ P_{\text{Л}} - P_{i-1}^n = -\rho_{i-1}^n \cdot C_{i-1}^n \cdot (u_{\text{Л}} - u_{i-1}^n) \end{array} \right. \rightarrow$$

Расчет по методу Годунова

- Параметры на границах ячейки

$$u_{\text{Пр}} = \frac{\rho_i^n - \rho_{i+1}^n + \rho_{i+1}^n \cdot c_{i+1}^n \cdot u_{i+1}^n + \rho_i^n \cdot c_i^n \cdot u_i^n}{\rho_{i+1}^n \cdot c_{i+1}^n + \rho_i^n \cdot c_i^n}$$

$$p_{\text{Пр}} = \rho_{i+1}^n + \rho_{i+1}^n \cdot c_{i+1}^n \cdot \frac{\rho_i^n - \rho_{i+1}^n + \rho_i^n \cdot c_i^n \cdot (u_{i+1}^n - u_i^n)}{\rho_{i+1}^n \cdot c_{i+1}^n + \rho_i^n \cdot c_i^n}$$

$$u_{\text{Л}} = \frac{\rho_{i-1}^n - \rho_i^n + \rho_i^n \cdot c_i^n \cdot u_i^n + \rho_{i-1}^n \cdot c_{i-1}^n \cdot u_{i-1}^n}{\rho_i^n \cdot c_i^n + \rho_{i-1}^n \cdot c_{i-1}^n}$$

$$p_{\text{Л}} = \rho_i^n + \rho_i^n \cdot c_i^n \cdot \frac{\rho_{i-1}^n - \rho_i^n + \rho_{i-1}^n \cdot c_{i-1}^n \cdot (u_i^n - u_{i-1}^n)}{\rho_i^n \cdot c_i^n + \rho_{i-1}^n \cdot c_{i-1}^n}$$

Расчет по методу Годунова

- **Потоки в ячейку**

$$\Phi_{M_i} = u_{L_i} \cdot \rho_{L_i} - u_{PR_i} \cdot \rho_{PR_i}, \dots \Phi_{P_i} = u_{L_i}^2 \cdot \rho_{L_i} + p_{L_i} - u_{PR_i}^2 \cdot \rho_{PR_i} - p_{PR_i}.$$

- **Новые значения**

$$\rho_i^{n+1} = \frac{m_i^{n+1}}{\Delta x} = \frac{m_i^n + \Phi_{M_i} \cdot \Delta t}{\Delta x}, \quad \rightarrow \quad u_i^{n+1} = \frac{R_i^{n+1}}{m_i^{n+1}} = \frac{R_i^n + \Phi_{m_i} \cdot \Delta t}{m_i^{n+1}}$$

Достоинства метода

Годунова

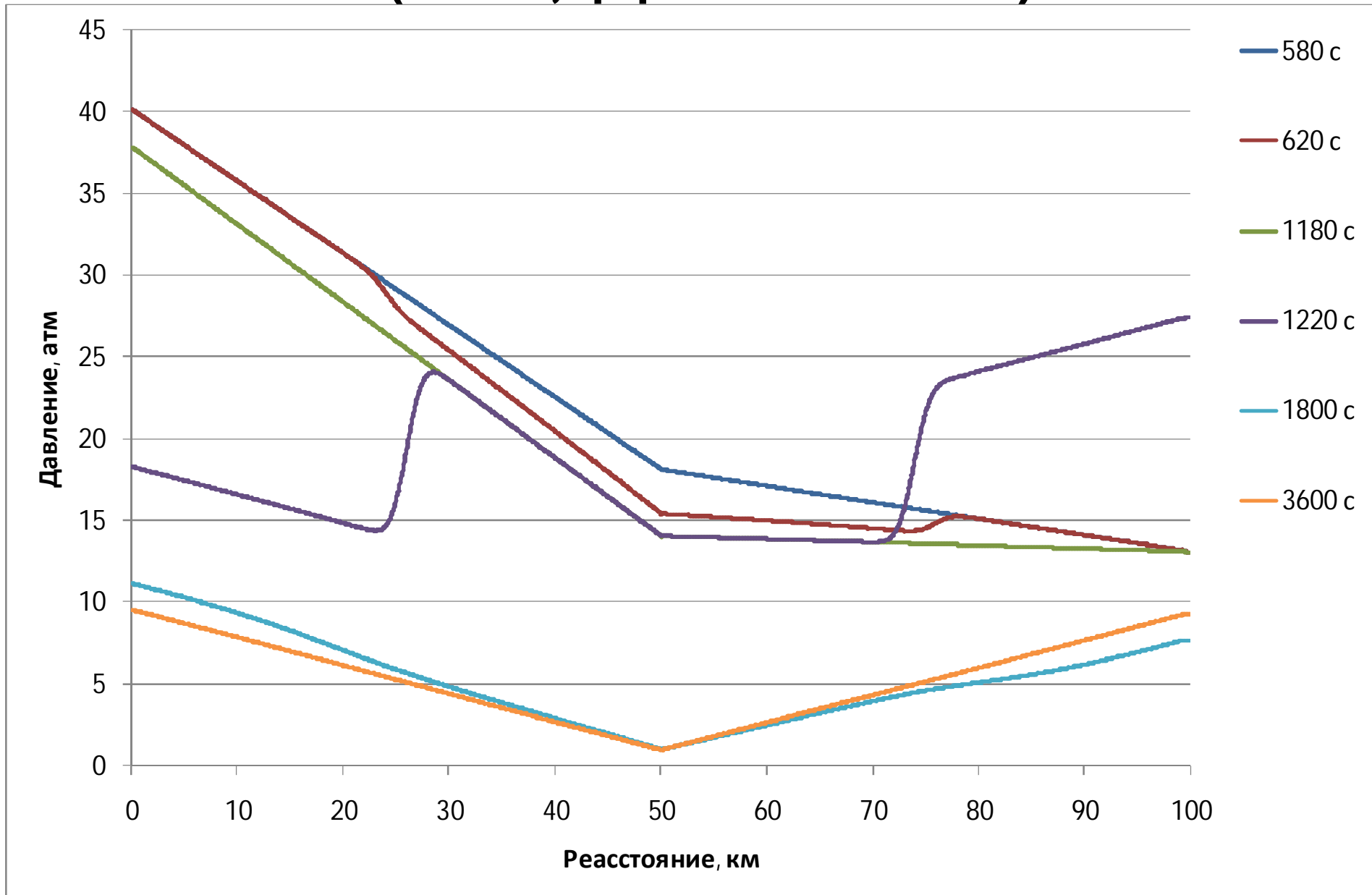
- **Простота реализации , консервативность, возможность адаптивных сеток**
- **Возможность учета естественным образом:**
 - **Реальные характеристики насосов;**
 - **Реальные условий срабатывания задвижек;**
 - **Наличие на трубопроводе клапанов, вантузов ...**
 - **Изменение диаметра трубы по трассе;**
 - **Наличие ответвлений любой конфигурации;**
 - **Образование газовых полостей и взаимодействие потока нефти с ними;**
 - **Возможность наличия разных нефтей при транспортировке;**
 - **Изменение температуры по трассе;**

...

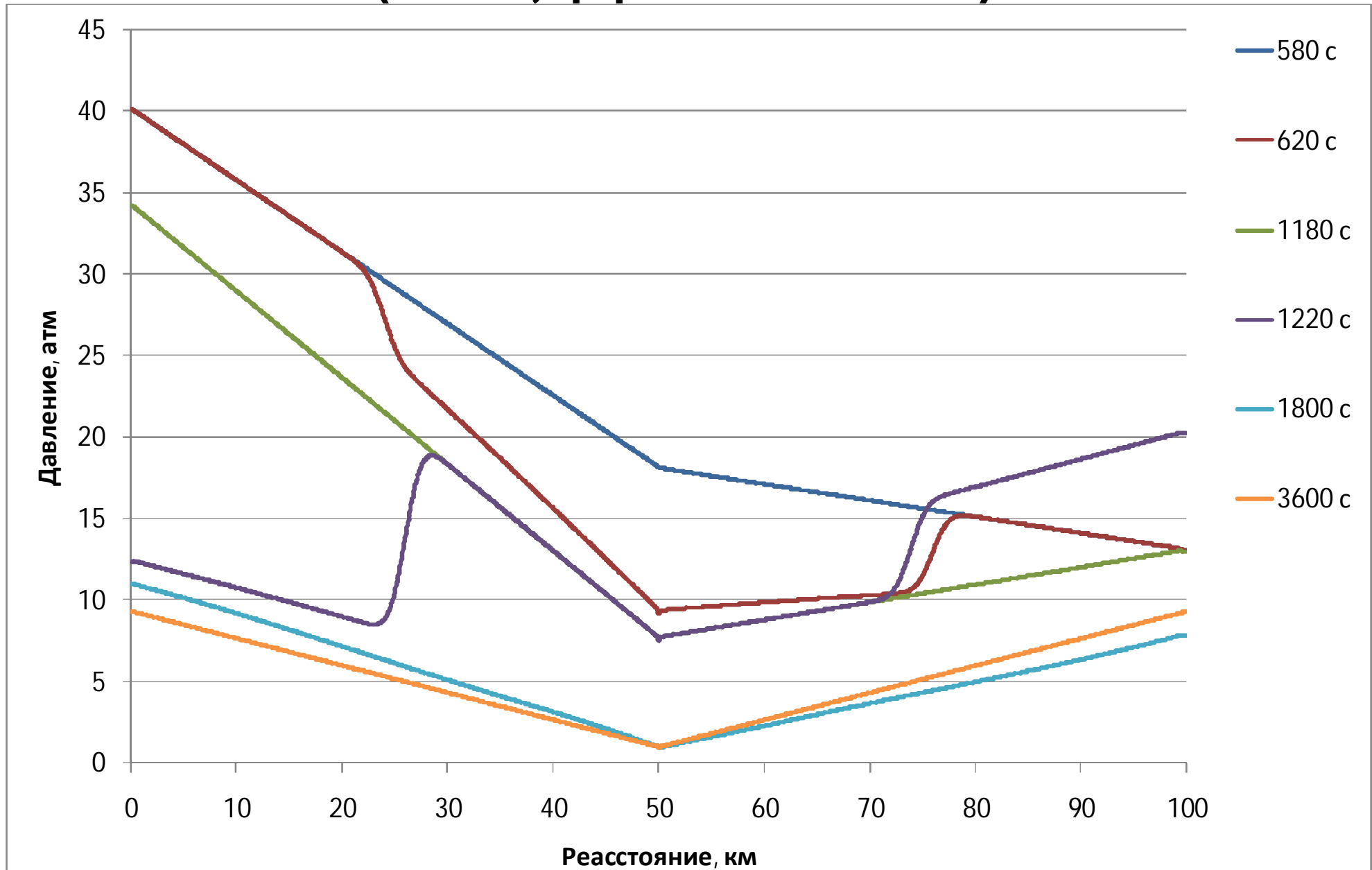
Пример тестового расчета

- Диаметр 500 мм, длина 100 км
- Задвижки 0, 100 км (мгновенные)
- Подъем 50 км до 100 м , спуск до 0 м.
- Скорость перекачки 1,2 м/с
- Разрушение в верхней точке – 1 и 5%
- Остановка и перекрытие через 10 мин

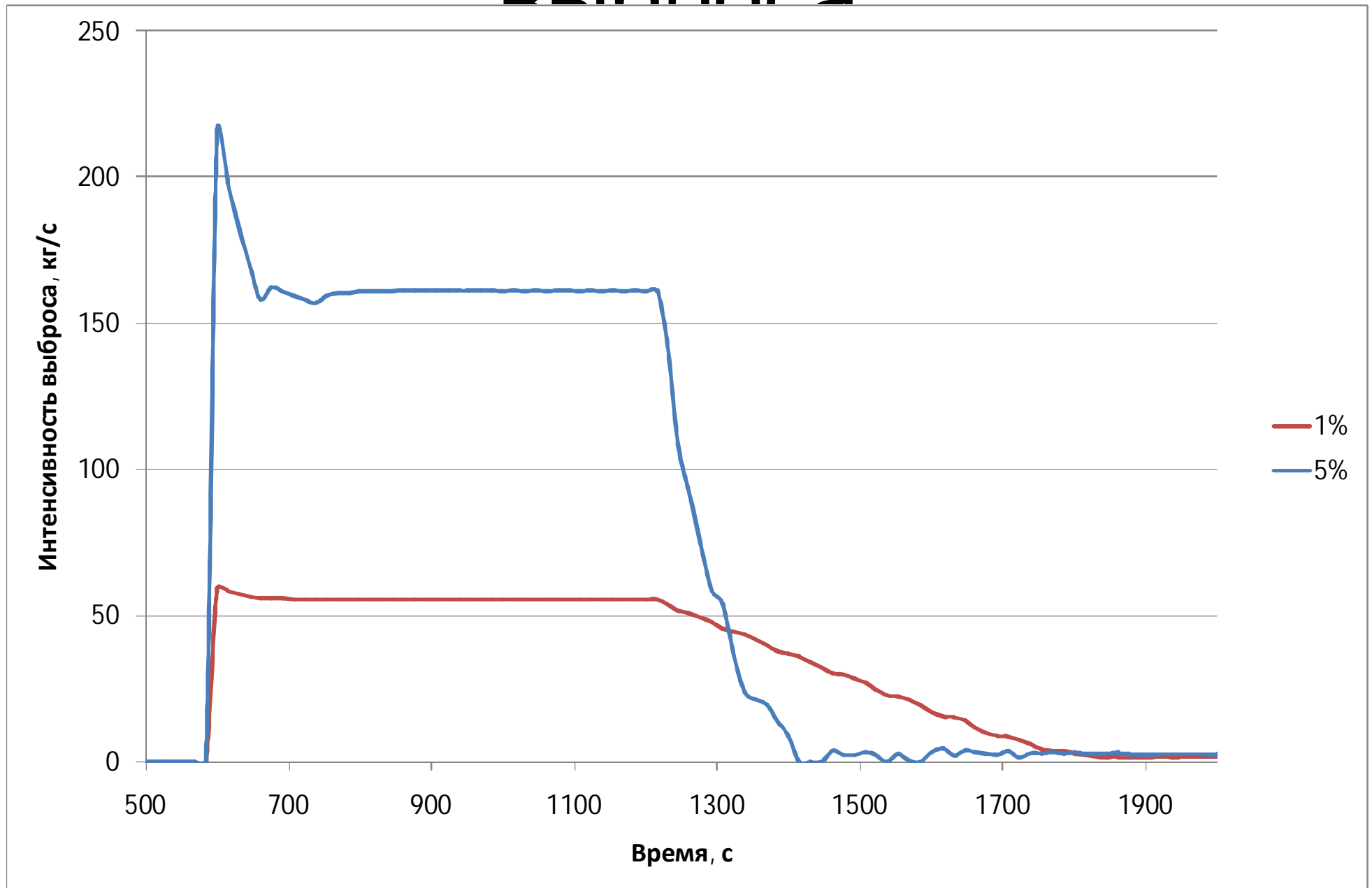
Пример тестового расчета (1%, давления)



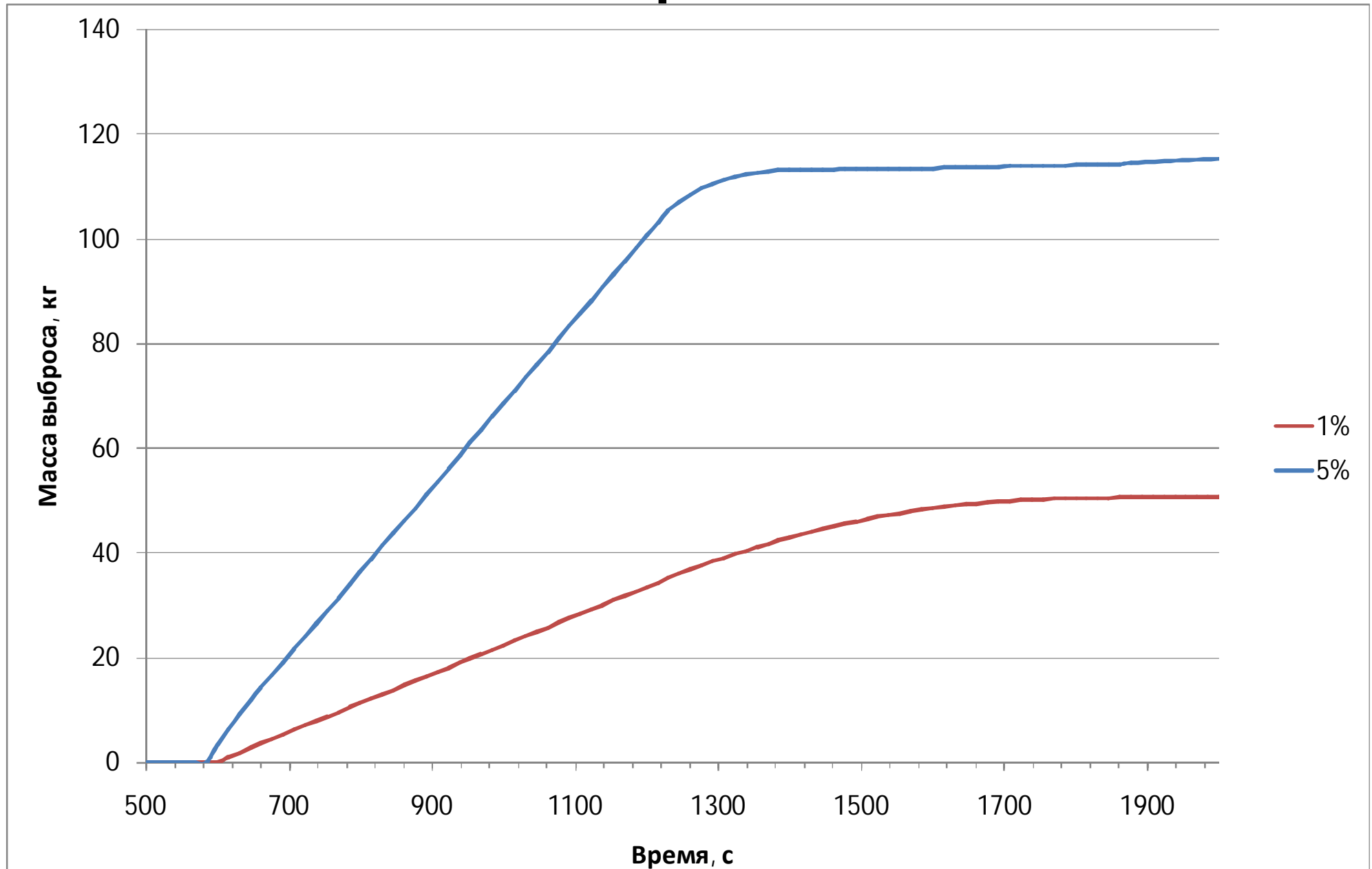
Пример тестового расчета (5%, давления)



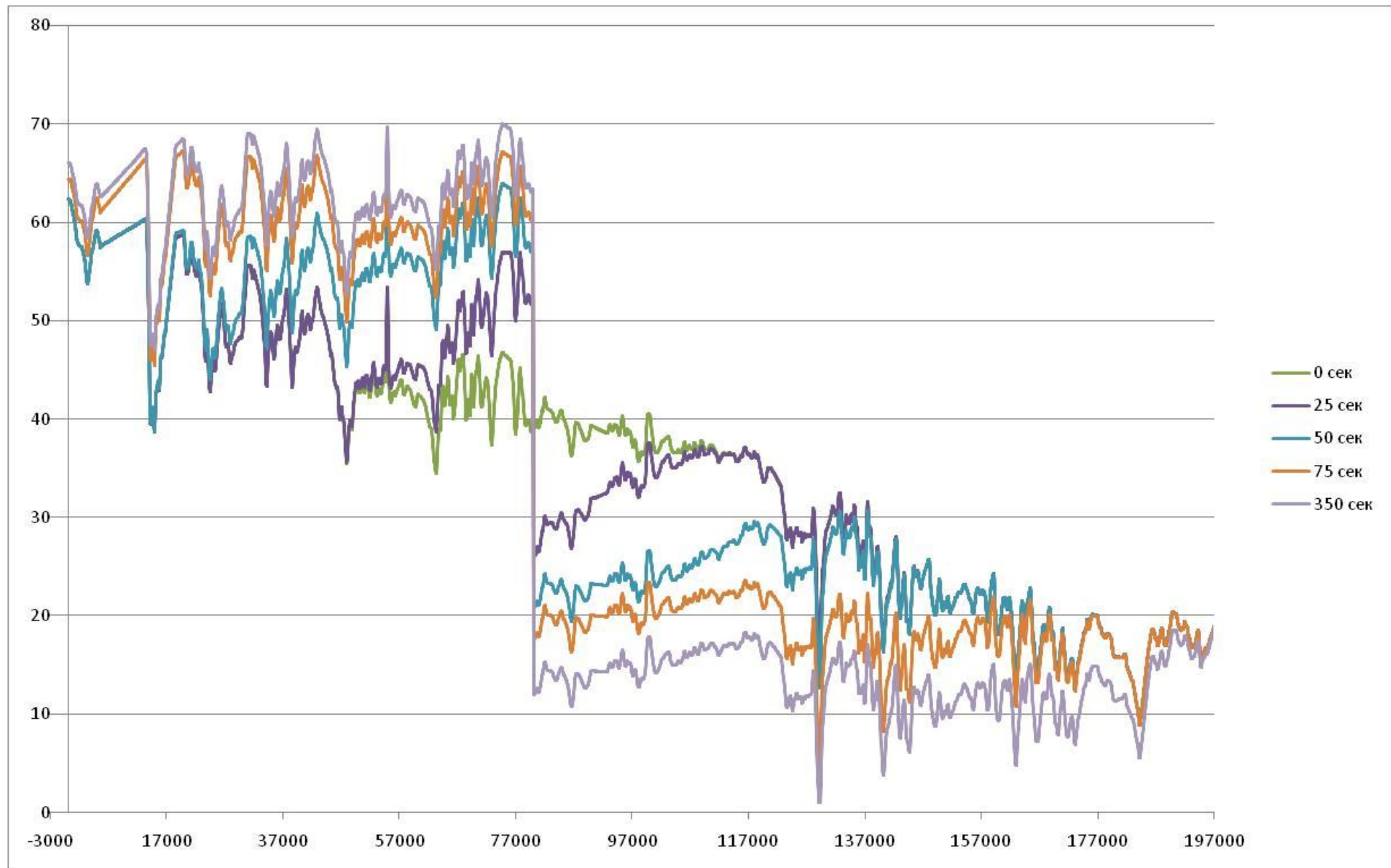
Пример интенсивность выброса



Пример интенсивность выброса



Закрытие промежуточной задвижки на трассе



ВЫВОДЫ

- На сегодня разработаны доступные методы расчета течения в МН и утечек из них практически для любой конфигурации оборудования и любого сценария. Эти методы доступны специалистам без специальной подготовки в области численного моделирования.
- На основе этих методов возможно создание единых компьютерных кодов для расчета работы МН в нормальном и аварийном режимах.