



# ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ ПО МОДЕЛЯМ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

*Мурзаханов Г.Х.,  
Быстрова Н.А.*  
*Научно-учебный центр  
«Сварка и контроль»  
МГТУ им. Баумана  
«СертиНК»*

# Модели коррозионного разрушения трубопроводов

подавляющее большинство трубопроводов эксплуатируются в условиях одновременного воздействия механических нагрузок и активных сред. Причем эти факторы могут действовать в самых неблагоприятных сочетаниях. Такое совместное действие понижает долговечность и предел выносливости материала. Это приводит к значительно более быстрому разрушению металла труб, чем при действии каждого фактора в отдельности. Поэтому необходимо отслеживать не только общие коррозионные повреждения (равномерное уменьшение толщины), но и локальные: питтинг, язвенная, щелевая и ручейковая коррозия, которые при наложении механических воздействий могут стать источником коррозионной трещины



# Модели коррозионного разрушения трубопроводов

В настоящее время нет общей теории, описывающей механизм КРН. Коррозионное разрушение под напряжением изучают материаловеды, химики и механики. В методике для оценки остаточного ресурса трубопроводов в зависимости от полноты исходных априорных данных предлагается два подхода. Первый подход базируется на моделях, исследующих процесс (механизм) разрушения, второй - на классических критериях прочности.



# Расчет остаточного ресурса участка трубопровода по коррозионному износу

Расчет остаточного ресурса обследуемого участка трубопровода следует производить в следующей последовательности. Определяют по результатам толщинометрии минимальное и максимальное значения скорости коррозии металла обследуемого локального участка трубопровода по формуле:

$$V_{\phi} \begin{matrix} \min \\ \max \end{matrix} = \frac{r_{\begin{matrix} \min \\ \max \end{matrix}}}{T_{\text{э}}} \quad (1)$$

где  $r_{\begin{matrix} \min \\ \max \end{matrix}}$  - минимальное и максимальное значение глубины коррозии, мм;  
 $T_{\text{э}}$  - фактическое время эксплуатации трубопровода, год.





# Расчет остаточного ресурса участка трубопровода по коррозионному износу

Вычисляют минимальное и максимальное значения скорости коррозии с учетом коэффициента разброса скорости коррозии по формуле:

$$V'_{\phi \min \max} = \frac{r_{\min} \cdot (\pm k_c)}{T_{\phi}} = V_{\phi \min \max} \cdot (\pm k_c) \quad (2)$$

Определяют остаточный ресурс обследуемого локального участка трубопровода по формуле:

$$T_{pki} = \frac{h_{\phi \min} - h_{\text{доп. min}}}{V_{\phi \max} \cdot (+k_c)} \quad (3)$$

где  $h_{\phi \min}$  - фактическая минимальная остаточная толщина стенки трубы, мм;

$h_{\text{доп. min}}$  - минимально допустимая толщина стенки трубы.

# Расчет остаточного ресурса участка трубопровода с учетом механохимической коррозии

Модель механохимической коррозии

$$v = v_0 \chi(T) \varphi(\sigma_{\text{ЭКВ}}) \quad (4)$$

$$\varphi = 1 + k_1 \sigma_{\text{и}} \quad \varphi = \exp(k_2 \sigma_0) \quad \varphi = 1 + k_3 \mathcal{E} \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{и}}$  - интенсивность напряжений;

$\sigma_0$  - среднее напряжение;

$\mathcal{E}$  - удельная энергия деформации;

$\chi(T)$  - функция температуры;

$k_1, k_2, k_3$  - коэффициенты, определяемые из эксперимента.



# Расчет остаточного ресурса участка трубопровода с учетом механохимической коррозии

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{\sigma^2}{\sigma_H h_H} \cdot \frac{dh}{dt} \quad (6)$$

где  $\sigma_H$  – начальное кольцевое напряжение в трубе, кгс/мм<sup>2</sup>;  
 $h_H$  – начальная толщина стенки трубы, мм.

$$\frac{dh}{dt} = -u_0 \exp \frac{V \cdot \sigma}{RT}$$

где  $\sigma$  - абсолютная величина напряжений в металле при одноосном нагружении до предела упругости, кгс/мм<sup>2</sup>;

$u_0$  - начальная скорость коррозии, мм/год;

$V$  - мольный объем металла (для стали 7 см<sup>3</sup>/моль);

$R$  - газовая постоянная (82,1 см<sup>3</sup> атм/моль · град);

$T$  - температура, К.



# Расчет остаточного ресурса участка трубопровода с учетом механохимической коррозии



Относительную долговечность участка:

$$T_0 = a \cdot F_H [E_i(-aF_H) - E_i(-aF)] + \exp(-aF_H) - \frac{F_H}{F} \exp(-aF), \quad (7)$$

где  $F_H$  – коэффициент использования несущей способности;

$a$  – поправочный коэффициент;

$E_i$  – интегральная функция.

Остаточный ресурс локального участка трубопровода до наступления предельного состояния в стенке трубы следует определять по следующей зависимости:

$$T_{pki} = \frac{T_0 \cdot h}{v_0}. \quad (8)$$

За остаточный ресурс обследуемого участка трубопровода следует принимать величину  $T_{p.k} = \min T_{p.ki}$



# Объединенная модель КРН трубопроводов



Условие роста дефекта  $G(t) > \Gamma(t)$  (9)

где  $\Gamma = \gamma_0 \left[ 1 - (\psi_s + \psi_c)^\alpha \right]$  (10)

Меры микроповреждений:

$$\psi_s(t) = \varphi_s(a(t), t), \quad \psi_c(t) = \varphi_c(a(t), t) \quad (11)$$

Мера  $\psi_s$  описывает чисто механическое повреждение, мера  $\psi_c$  – чисто коррозионное.

Процесс накопления микроповреждений:  $\frac{\partial \varphi_s}{\partial t} = \frac{1}{t_s} f_s(\sigma_\infty, c_\infty, a, \rho, \varphi_s, \varphi_c, x),$  (12)

$$\frac{\partial \varphi_c}{\partial t} = \frac{1}{t_c} f_c(\sigma_\infty, c_\infty, a, \rho, \varphi_s, \varphi_c, x),$$

где  $t_s, t_c$  – постоянные времени;  $f_s, f_c$  – некоторые функции.

# Объединенная модель КРН трубопроводов

Модель накопления  
микрповреждений:

$$\frac{\partial \varphi_s}{\partial t} = \frac{1}{t_s} \left( \frac{\sigma_y - \sigma_{th}}{\sigma_f} \right)^{m_f} \quad (13)$$

где  $t$  – время;

$\sigma_y$  – значения напряжений отрыва на фронте дефекта и ее продолжении;

$t_s$  – постоянная времени;

$\sigma_f$  – характеристика сопротивления материала накоплению механических повреждений;

$\sigma_{th}$  – пороговое значение этого сопротивления;

$m_f$  – положительный показатель



# Объединенная модель КРН трубопроводов



Распределение напряжений

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_\infty} = \frac{\xi^2 + \mu}{\xi^2 - \mu} + \frac{(1 + \mu)^2 [\xi^4 + 3\xi^2 + \mu(\xi^2 - 1)]}{2(\xi^2 - \mu)^3}, \quad (14)$$
$$\xi = \frac{(x/a) + [(x/a)^2 + (\rho/a) - 1]^{1/2}}{1 + (\rho/a)^{1/2}}, \quad \mu = \frac{1 - (\rho/a)^{1/2}}{1 + (\rho/a)^{1/2}}.$$

Коэффициент концентрации напряжений около эллиптического отверстия

$$k = 1 + 2Y \left( \frac{a}{\rho} \right)^{1/2} \quad (15)$$

# Объединенная модель КРН трубопроводов



В инженерных расчетах для вычисления напряжений можно использовать формулу

$$\sigma = \sigma_{\infty} k \left[ 1 + 4 \frac{x-a}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

$$\frac{dc_t}{dt} = \frac{c_a - c_t}{\lambda_c} \frac{da}{dt} + \frac{c_a - c_t}{t_a} \quad (17)$$

где  $c_a$  – установившееся значение концентрации на неподвижном фронте;  $\lambda_c$  – параметр длины;  $t_a$  – временной параметр, который характеризует скорость изменения  $ct(t)$  при остановившемся фронте

# Объединенная модель КРН трубопроводов



Концентрацию  $c_a$  введем как

$$c_a = \frac{c_\infty}{1 + a/a_\infty} \quad (18)$$

где  $c_\infty$  – концентрация у входа в дефект;  $a_\infty$  – параметр материала, размерности длины.

Процесс накопления коррозионных повреждений будем описывать уравнением вида:

$$\frac{\partial \psi_c}{\partial t} = \frac{1}{t_c} \left[ \frac{c_t - c_{th}}{c_d} \right]^{m_c} \frac{1 - \psi_c}{1 - \psi_s} \quad (19)$$

где  $t$  – время;  $c_t$  – концентрация активного агента в момент времени  $t$ .

# Объединенная модель КРН трубопроводов



Аналитическая модель описывающая радиус кривизны дефекта:

$$\frac{d\rho}{dt} = (\rho_f - \rho) \frac{d\psi_s}{dt} + \frac{\rho_s - \rho}{\lambda_\rho} \frac{da}{dt} + (\rho_c - \rho) \frac{d\psi_c}{dt} \quad (20)$$

Здесь  $\rho_s$  – радиус «острого» дефекта,  $\rho_f$  – радиус «тупого» дефекта от механических повреждений,  $\rho_c$  – радиус «тупого» дефекта от коррозии.  $\lambda_\rho$  – масштаб длины, характеризует расстояние, которое должен пройти фронт дефекта, чтобы заострение дефекта стало заметным.

Мера  $\psi_s$  описывает чисто механическое повреждение, мера  $\psi_c$  – чисто коррозионное.

Простейшая связь радиуса кривизны с мерами микроповреждений – конечное соотношение вида

$$\rho = \rho_s + \rho_f \psi_s + \rho_c \psi_c \quad (21)$$

# Объединенная модель КРН трубопроводов



Медленно растущий дефект в квазистационарном приближении:

$$\frac{da}{dt} = \left[ \frac{\lambda_f}{t_f} \left( \frac{\sigma_y - \sigma_{th}}{\sigma_d} \right)^{m_f} + \frac{\lambda_c}{t_c} \left( \frac{c_t - c_{th}}{c_d} \right)^{m_c} \right] \left[ \left( 1 - \frac{K^2}{K_c^2} \right)^{1/2} - \Psi_{ff} \right]^{-1} \quad (22)$$

Где  $K_c$  - критическое значение коэффициента интенсивности напряжений

Коэффициент интенсивности напряжений:  $K = Y \sigma_{\infty} (\pi a)^{1/2}$  (23)

Дальнейшее углубление ямки можно описать с помощью приближенного уравнения

$$\frac{da}{dt} = \frac{\lambda_c}{t_c} \left( \frac{c_t - c_{th}}{c_d} \right) (1 - \Psi_{ff})^{-1} \quad (24)$$

# Модель КРН трубопроводов, основанная на оценке остаточной прочности

Связь давления в трубопроводе с геометрическими параметрами дефекта

$$P = \frac{\sigma h}{R} \left( \frac{1 - A/A_0}{1 - (A/A_0)M^{-1}} \right), \quad M = \sqrt{1 + 1,61 \frac{(L/2)^2}{Rh}} \quad (25)$$

Где  $P$  - давление в трубе,

$\sigma$  - напряжение течения (flow stress),

$h$  - толщина стенки трубы,

$R$  - радиус трубы,

$A$  - площадь потери металла на проекции дефектного участка в продольном сечении стенки трубы,

$A_0$  - первоначальная (без коррозии) площадь продольного сечения стенки трубы по длине дефектного участка,  $A_0 = Lh$ ,

$L$  - длина дефектного участка,

$M$  - коэффициент Фолиаса





# Модель КРН трубопроводов, основанная на оценке остаточной прочности

Для одномерного дефекта:

Срок безопасной эксплуатации трубы с дефектом определяют по формуле

$$\tau_{\text{э}} = \tau_{\text{экс}} \left( \frac{t_{\text{max раб}}}{t_{\text{max}}} - 1 \right), \quad (26)$$

где  $\tau_{\text{экс}}$  – время работы трубопровода с момента его ввода в эксплуатацию до момента обследования, годы

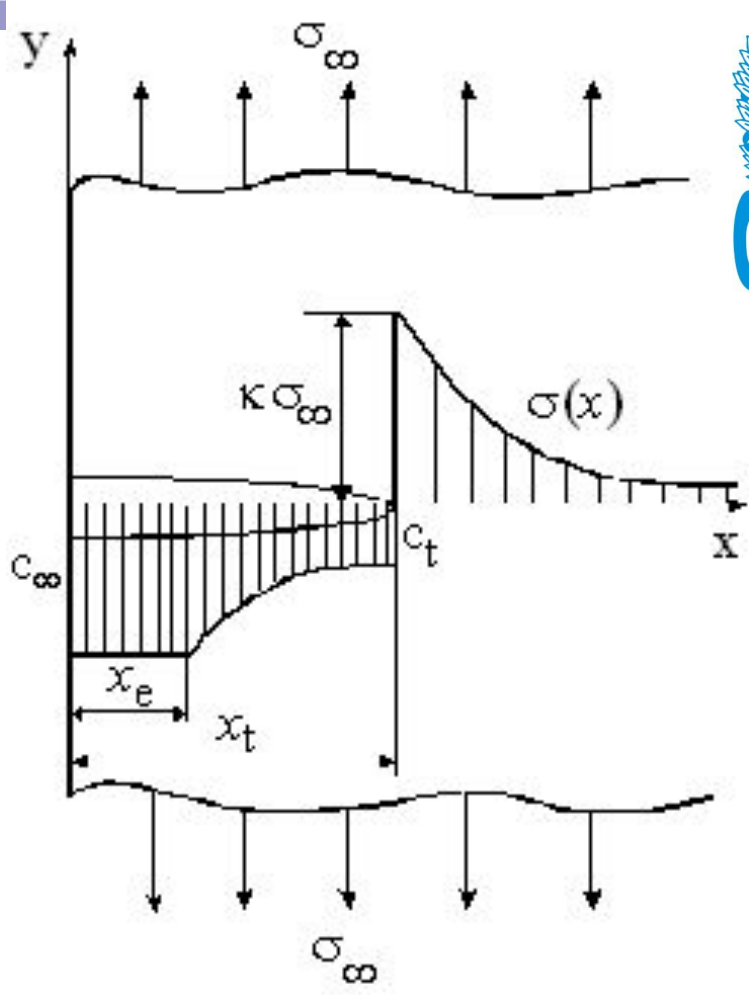
$t_{\text{max раб}}$  – максимальная допустимая при рабочем давлении глубина дефекта

$$t_{\text{max раб}} = h \frac{\frac{\sigma h}{K_{\text{и}} P_{\text{раб}} R} - 1}{\frac{\sigma h}{K_{\text{и}} P_{\text{раб}} R} - M_{\text{п}}^{-1}}, \quad (27)$$

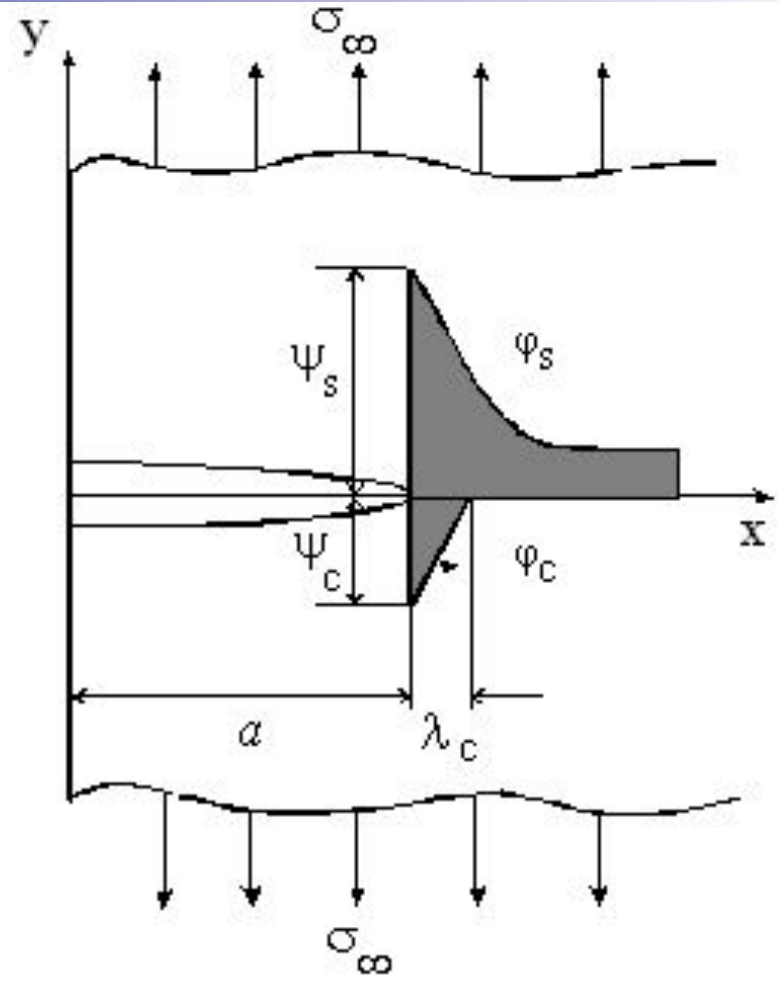
где  $P_{\text{раб}}$  – рабочее давление в трубопроводе, МПа;

$K_{\text{и}}$  – коэффициент, зависящий от минимального нормативного испытательного давления



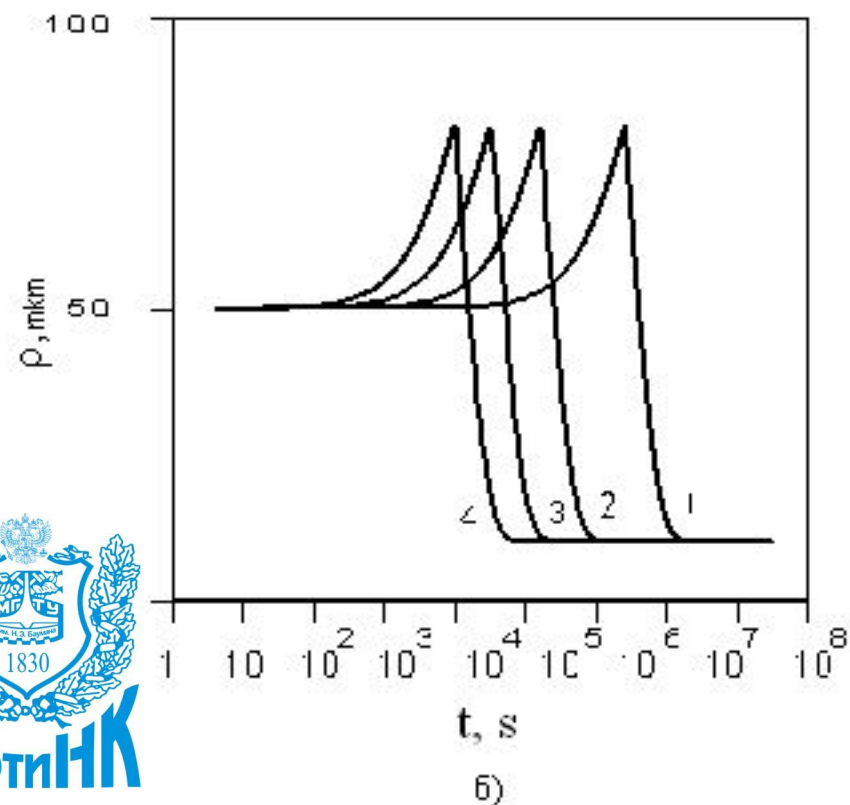
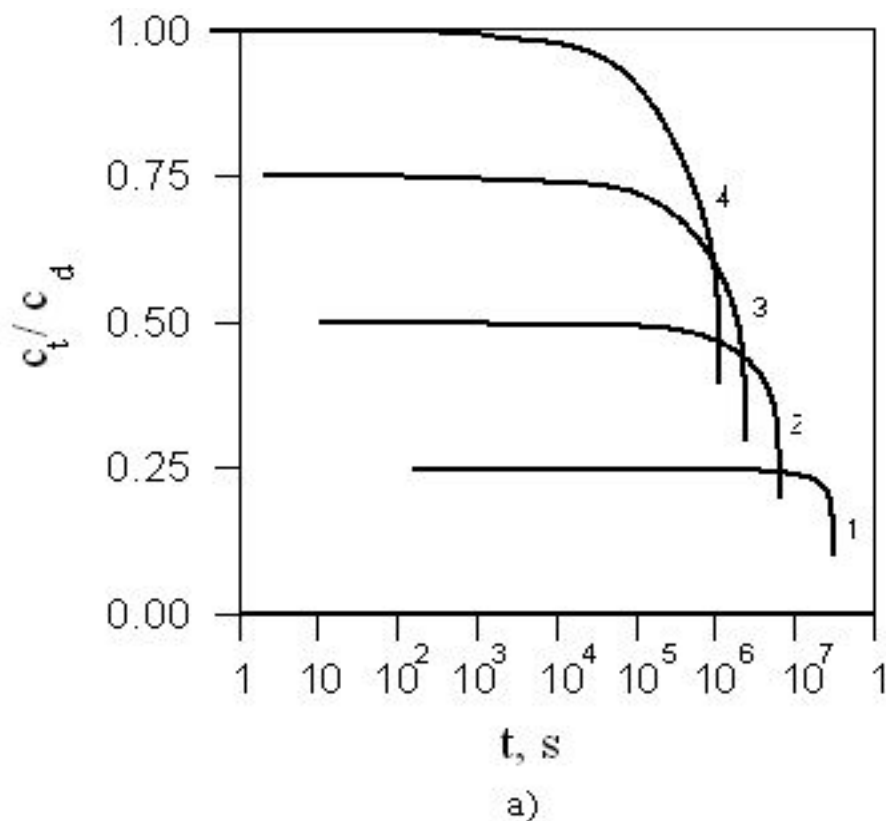


а)



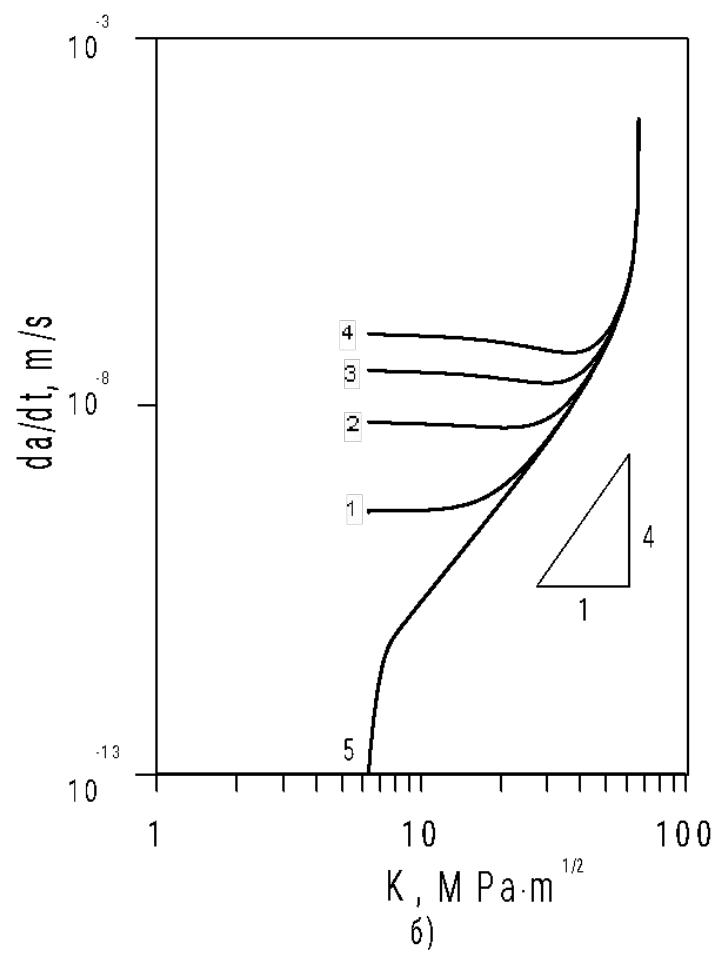
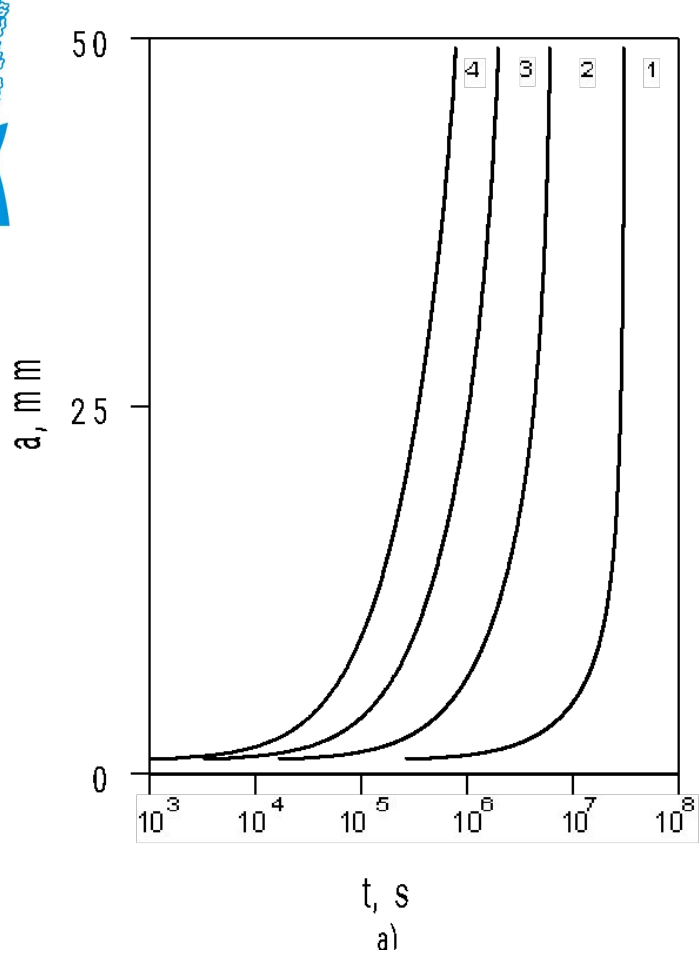
б)

**Рис. 1.** Распределение напряжений и концентрации агрессивного агента (а) механических и коррозионных повреждений (б) при воздействии на участок поверхности тела под действием напряжений отрыва и активной среды.



**Рис. 2.** Поведение концентрации активного агента (а), эффективного радиуса кривизны на фронте дефекта б) при изменении концентрации активного агента на входе в дефект в безразмерных величинах, отнесенных к параметру материала 0.25, 0.5, 0.75, 1. (соответственно кривые 1,2,3,4).

**Некоторые численные данные и результаты:**  $E=200$  ГПа, глубина 1мм, напряжение отрыва 100МПа.



**Рис. 3.** Распространение дефекта в материале (а) и зависимость скорости роста дефекта от коэффициента интенсивности напряжений (б) при изменении концентрации активного агента на входе в дефект в безразмерных величинах, отнесенных к параметру материала 0.25, 0.5, 0.75, 1. и 0 (соответственно кривые 1, 2, 3, 4, 5)

Характер взаимодействия механических и коррозионных механизмов при росте дефекта иллюстрируют на рис. 4 меры механических и коррозионных повреждений ( а) – концентрация 0.25, б) – концентрация 0.5).

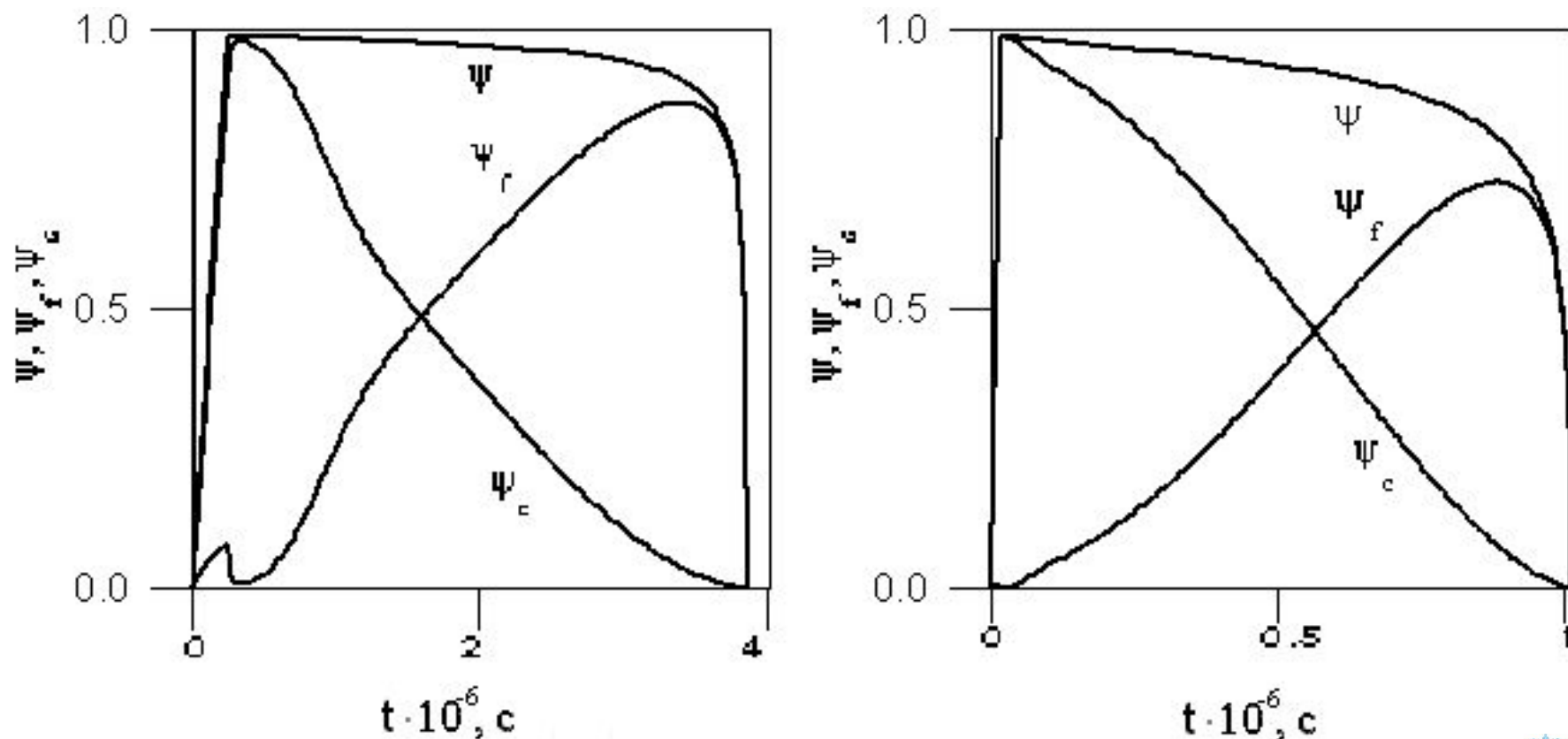


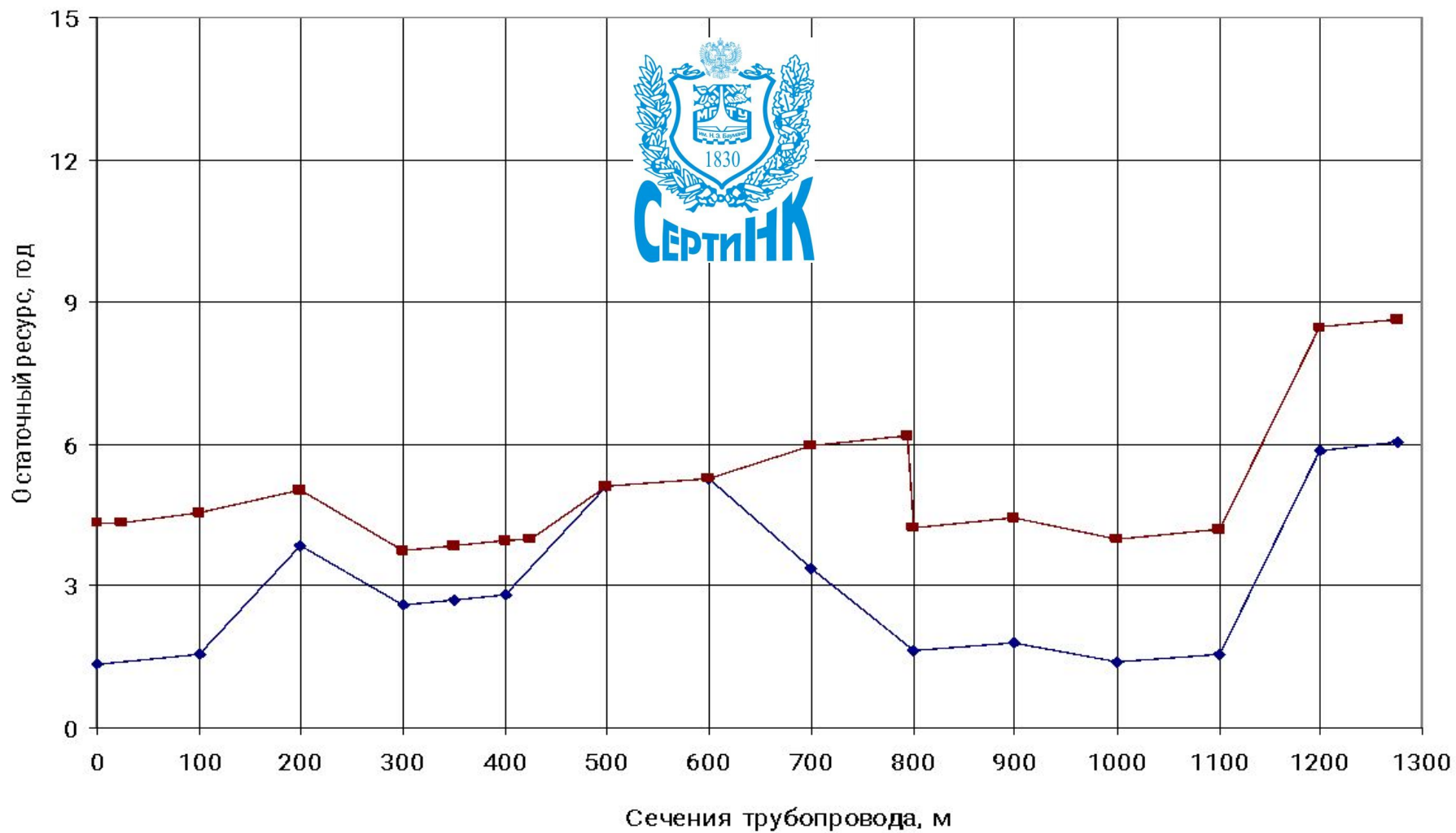
Рис. 4. Меры механических  $\psi_f$  коррозионных  $\psi_c$ , и их сумма  $\psi$ .



Таблица 1. Требования к составу исходной информации

№ п	Перечень исходной информации по промышленному трубопроводу
1	Акт сдачи трубопровода в эксплуатацию.
2	Рабочие параметры трубопровода (давления: начальное, конечное, рабочая среда, ее физический и химический составы, температура окружающей среды).
3	Паспортные данные по трубопроводу (диаметр, толщина стенки по всем участкам, сертификаты качества на трубопроводную сталь);
4	Состав и состояние внешней изоляции трубопровода, использование ингибиторов внутренней коррозии.
5	Топографическая съемка оси трассы трубопровода с указанием всех близкорасположенных объектов: линии электропередачи, автомобильные и железные дороги, наличие других трубопроводов с указанием их класса, водные преграды, заболоченные участки, населенные пункты и др.
6	Профиль трассы с указанием отметок над уровнем моря, состав и степень коррозионной активности грунтов.
7	Данные по обнаруженным дефектам и статистику по отказам.
8	Данные по результатам приборного диагностирования (результаты шурфовок)

# Остаточный ресурс газопровода ЦДНГ-2 скв.6053 - ГЗУ 222

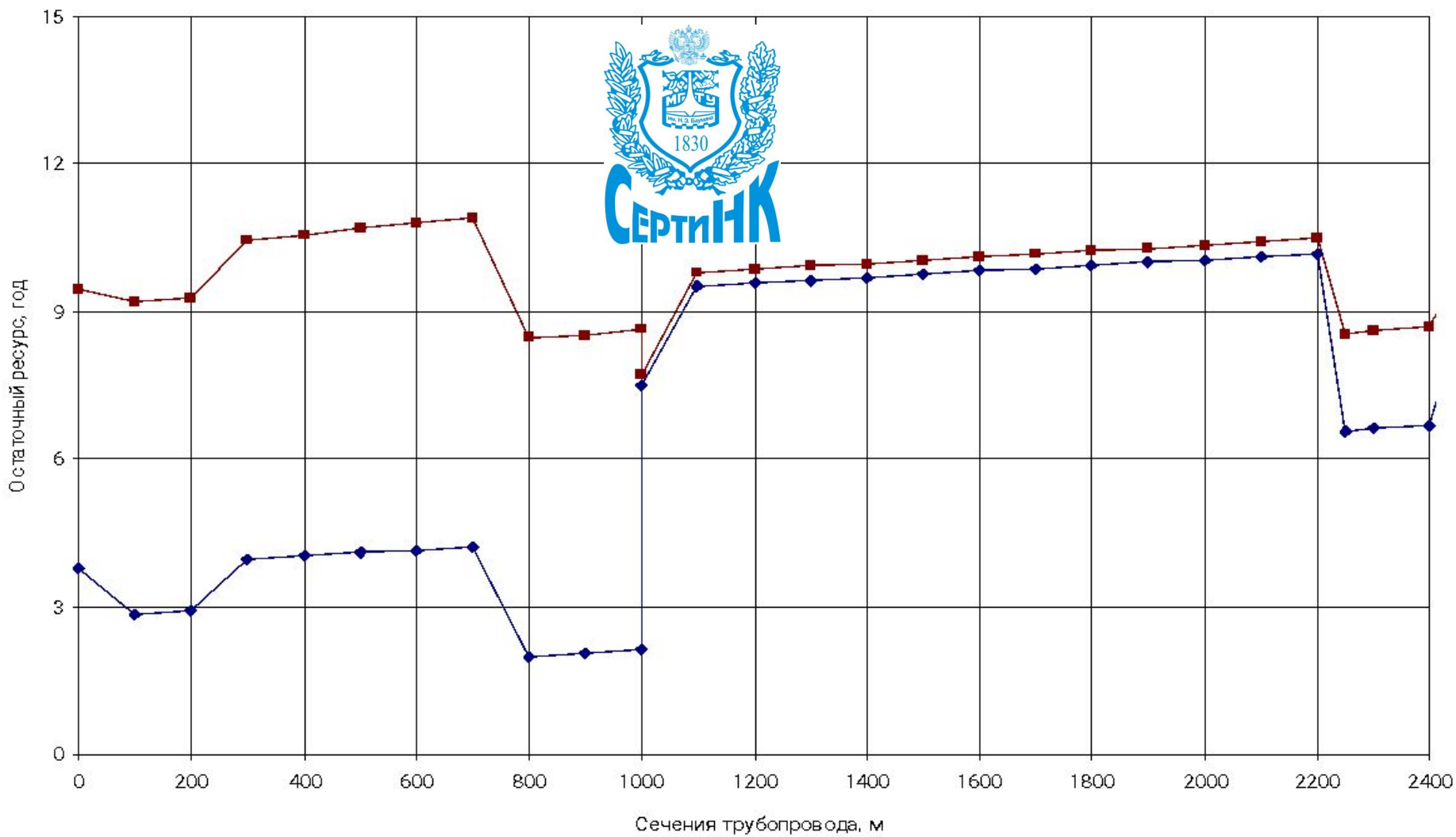


Сечения трубопровода, м

Рис. 5

—◆— Предварительный расчет —■— Уточненный расчет

# Остаточный ресурс газопровода ЦДНГ-1 - ГЗУ 32 - ТП



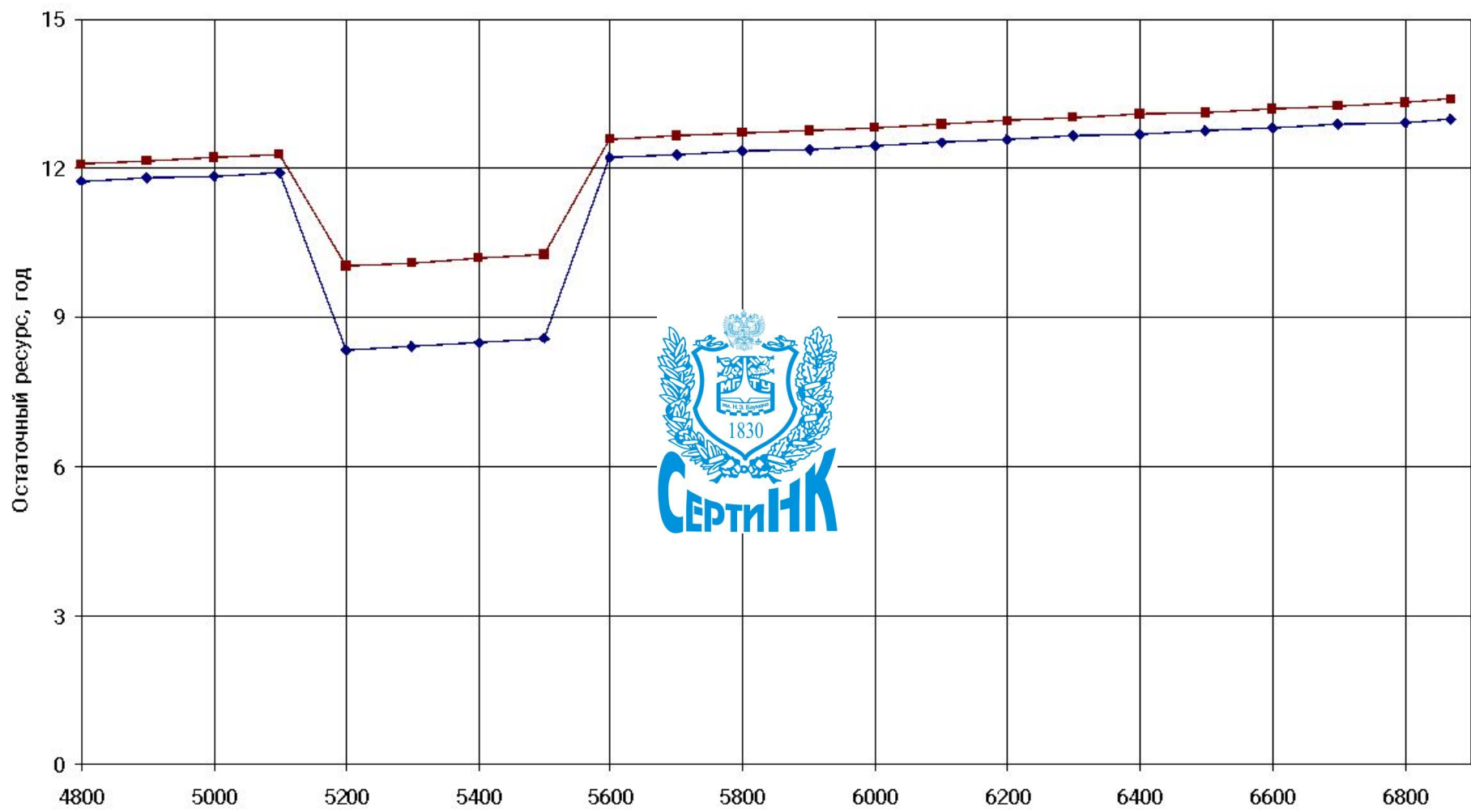
Сечения трубопровода, м

Рис. 6

◆ Предварительный расчет ■ Уточненный расчет



# Остаточный ресурс газопровода ЦДНГ-1 - ГЗУ 32 - ТТП

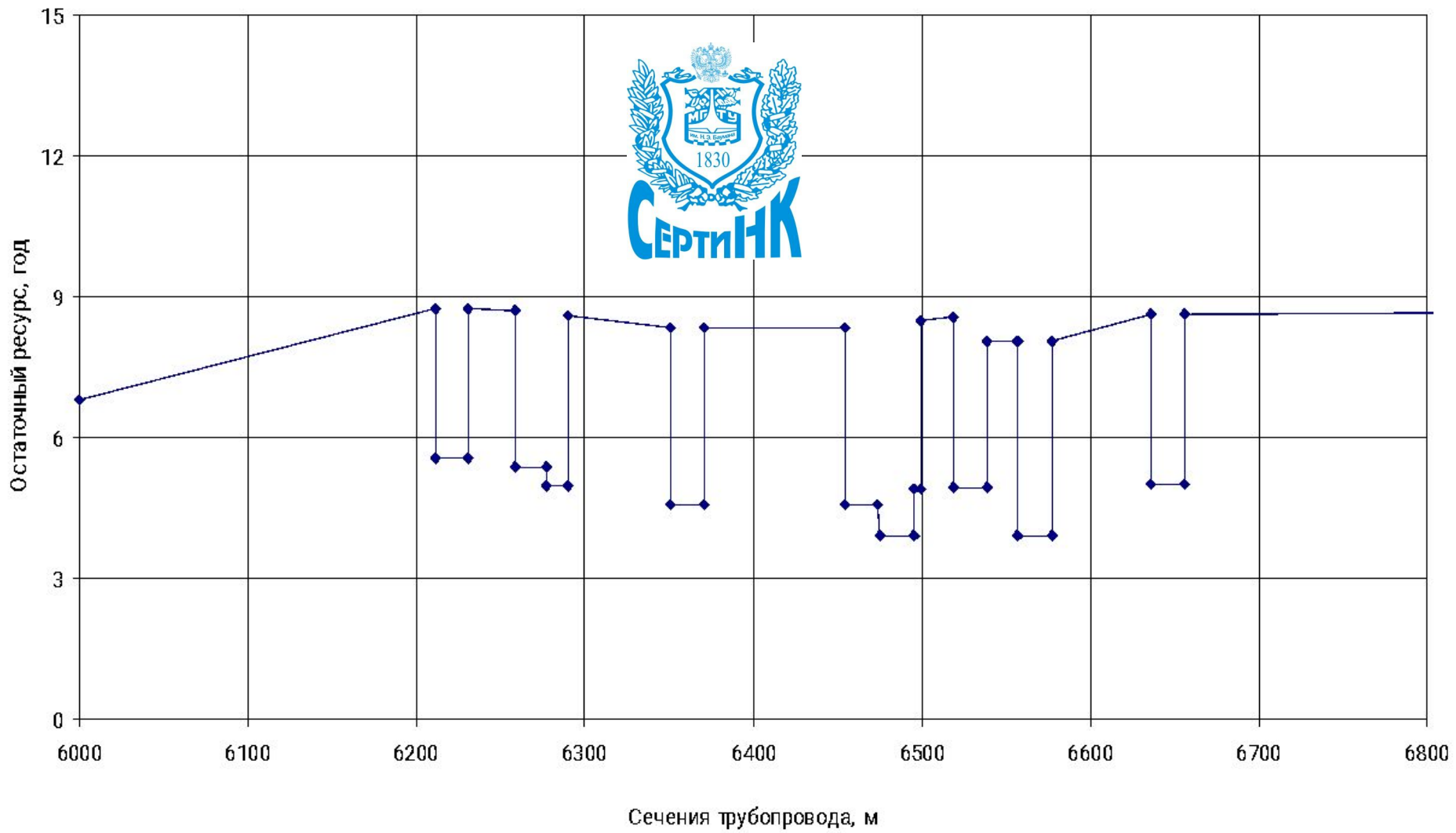


Сечения трубопровода, м

Рис. 6.2

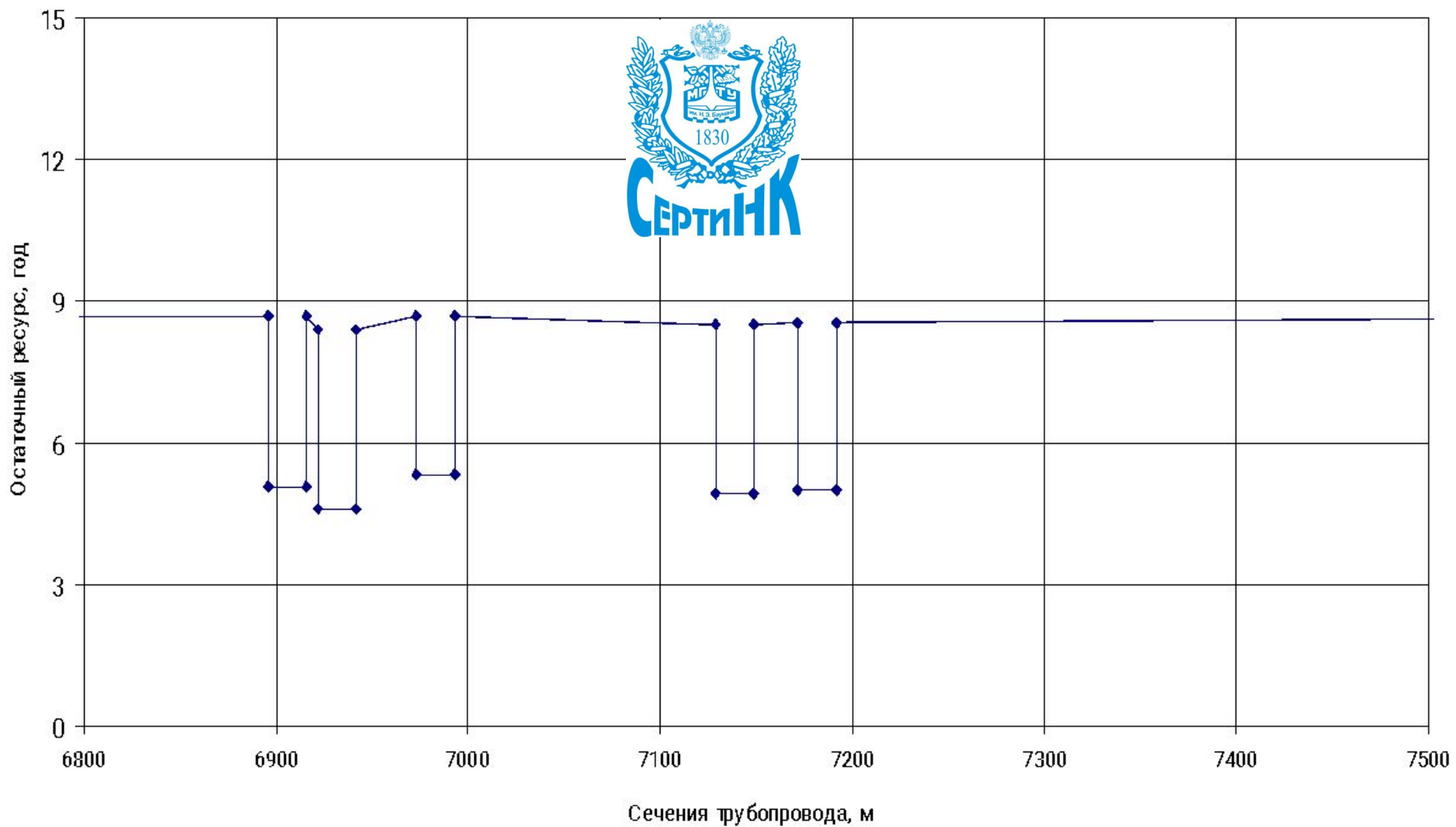
◆ Предварительный расчет ■ Уточненный расчет

# Остаточный ресурс напорного газопровода основная линия



Сечения трубопровода, м  
Рис. 7

# Остаточный ресурс напорного газопровода основная линия



Сечения трубопровода, м  
Рис. 7.1