



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 максимальные 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;

σ_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 σ_H – начальное кольцевое напряжение в трубе, кгс/мм²;
 h_H – начальная толщина стенки трубы, мм.

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

где σ - абсолютная величина напряжений в металле при одноосном нагружении до предела упругости, кгс/мм²;

u_0 - начальная скорость коррозии, мм/год;

V - мольный объем металла (для стали 7 см³/моль);

R - газовая постоянная (82,1 см³ 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 ψ_s описывает чисто механическое повреждение, мера ψ_c – чисто коррозионное.

Процесс накопления микроповреждений:

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

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

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;

σ_y – значения напряжений отрыва на фронте дефекта и ее продолжении;

t_s – постоянная времени;

σ_f – характеристика сопротивления материала накоплению механических повреждений;

σ_{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;
 λ_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_∞ – концентрация у входа в дефект; a_∞ – 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 ρ_s – радиус «острого» дефекта, ρ_f – радиус «тупого» дефекта от механических повреждений, ρ_c – радиус «тупого» дефекта от коррозии. λ_ρ – масштаб длины, характеризует расстояние, которое должен пройти фронт дефекта, чтобы заострение дефекта стало заметным.

Мера ψ_s описывает чисто механическое повреждение, мера ψ_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,

σ - 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

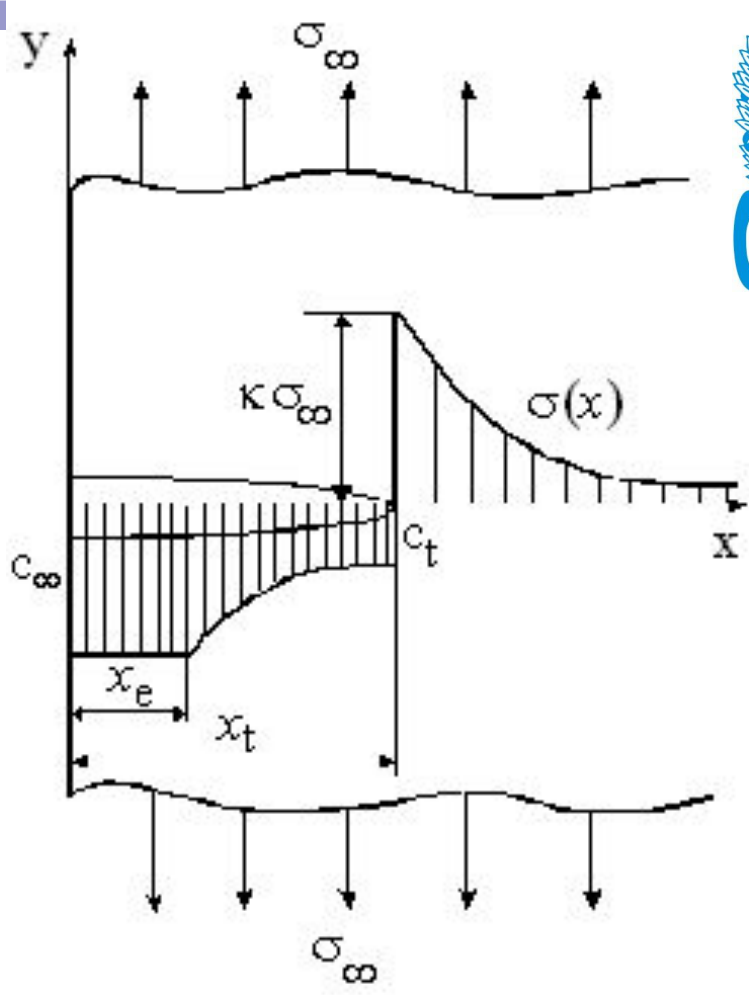
$t_{\text{max раб}}$ – максимальная допустимая при рабочем давлении глубина дефекта

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

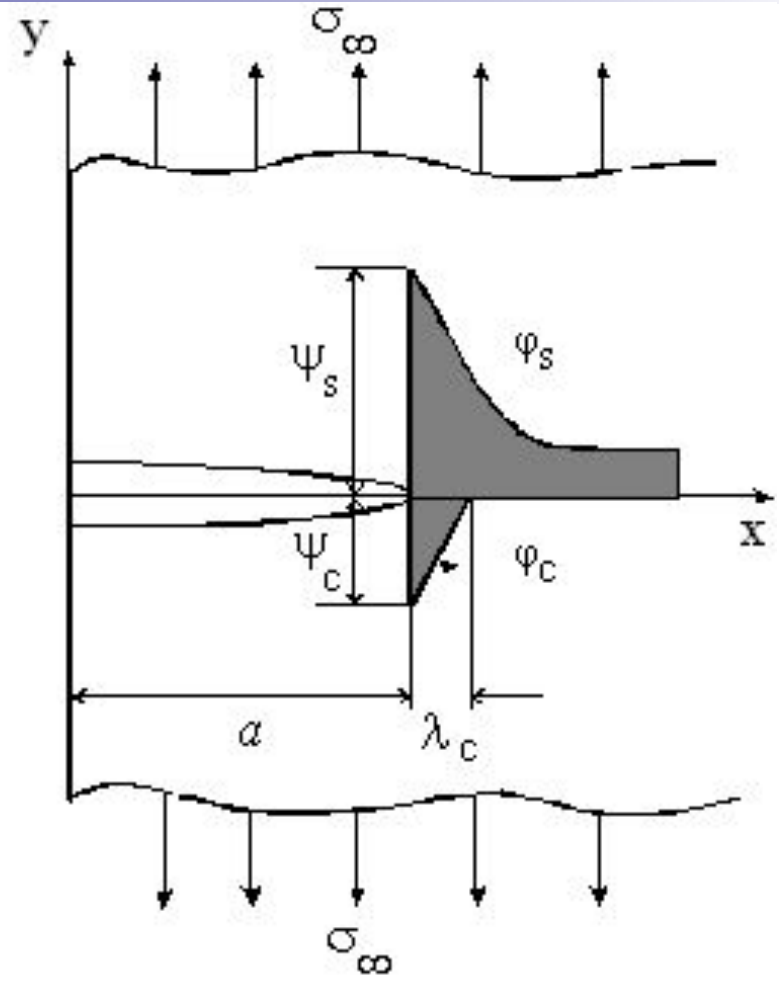
где $P_{\text{раб}}$ – рабочее давление в трубопроводе, МПа;

$K_{\text{и}}$ – 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.

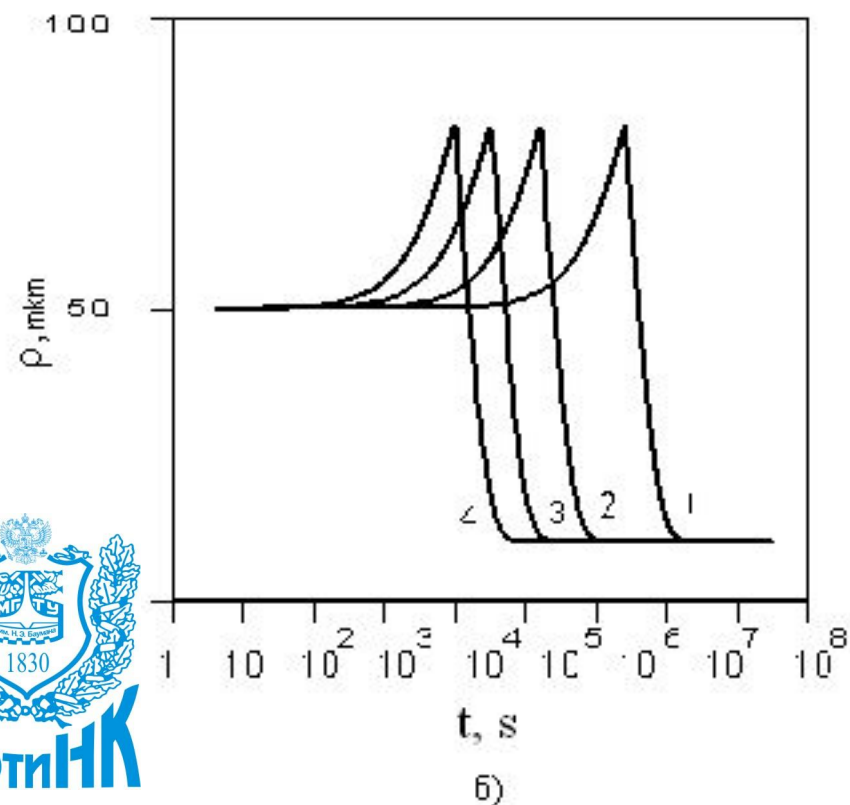
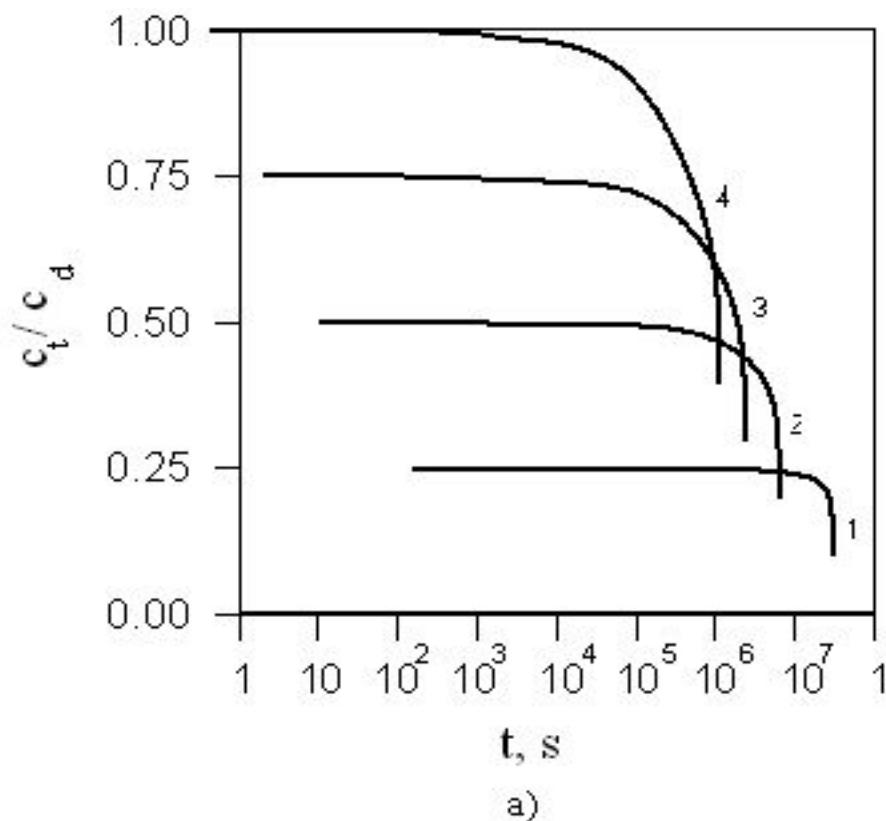


Рис. 2. Поведение концентрации активного агента (а), эффективного радиуса кривизны на фронте дефекта б) при изменении концентрации активного агента на входе в дефект в безразмерных величинах, отнесенных к параметру материала 0.25, 0.5, 0.75, 1. (соответственно кривые 1,2,3,4).

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

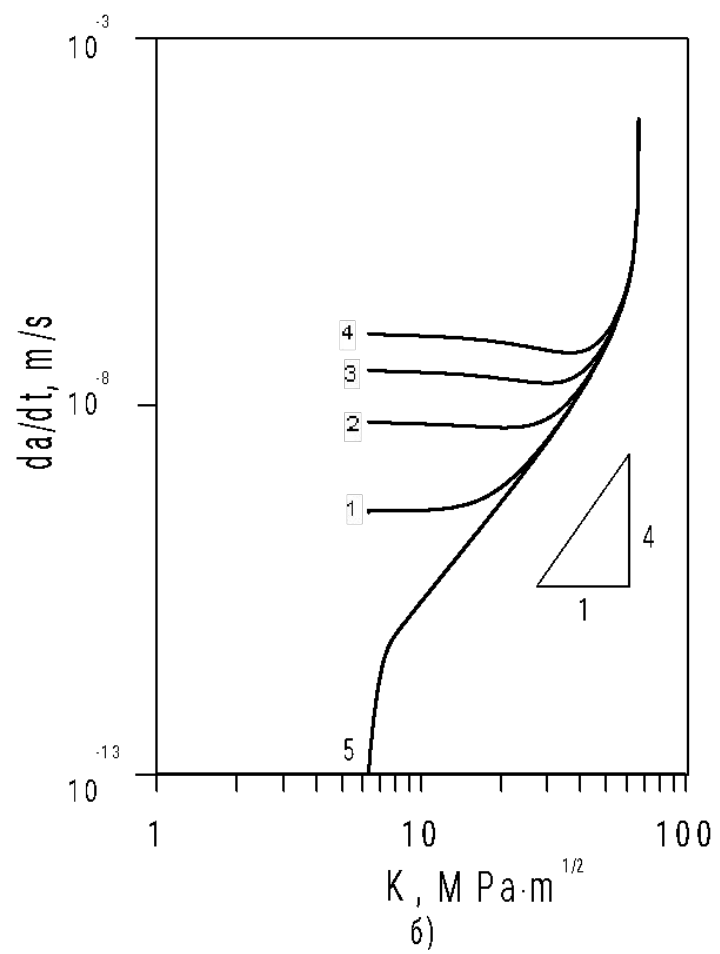
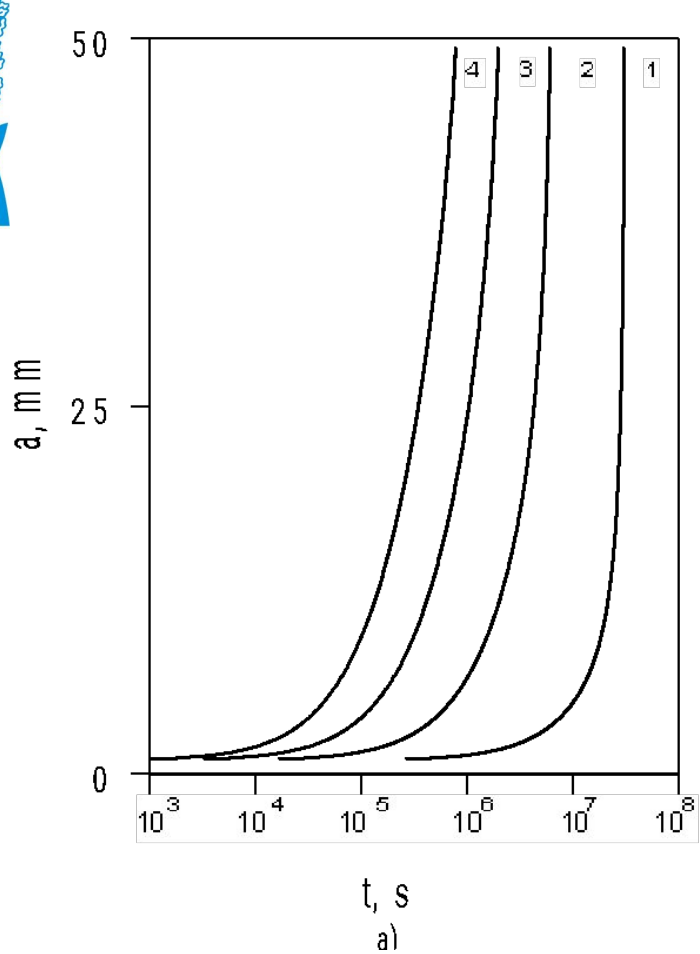


Рис. 3. Распространение дефекта в материале (а) и зависимость скорости роста дефекта от коэффициента интенсивности напряжений (б) при изменении концентрации активного агента на входе в дефект в безразмерных величинах, отнесенных к параметру материала 0.25, 0.5, 0.75, 1. и 0 (соответственно кривые 1,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

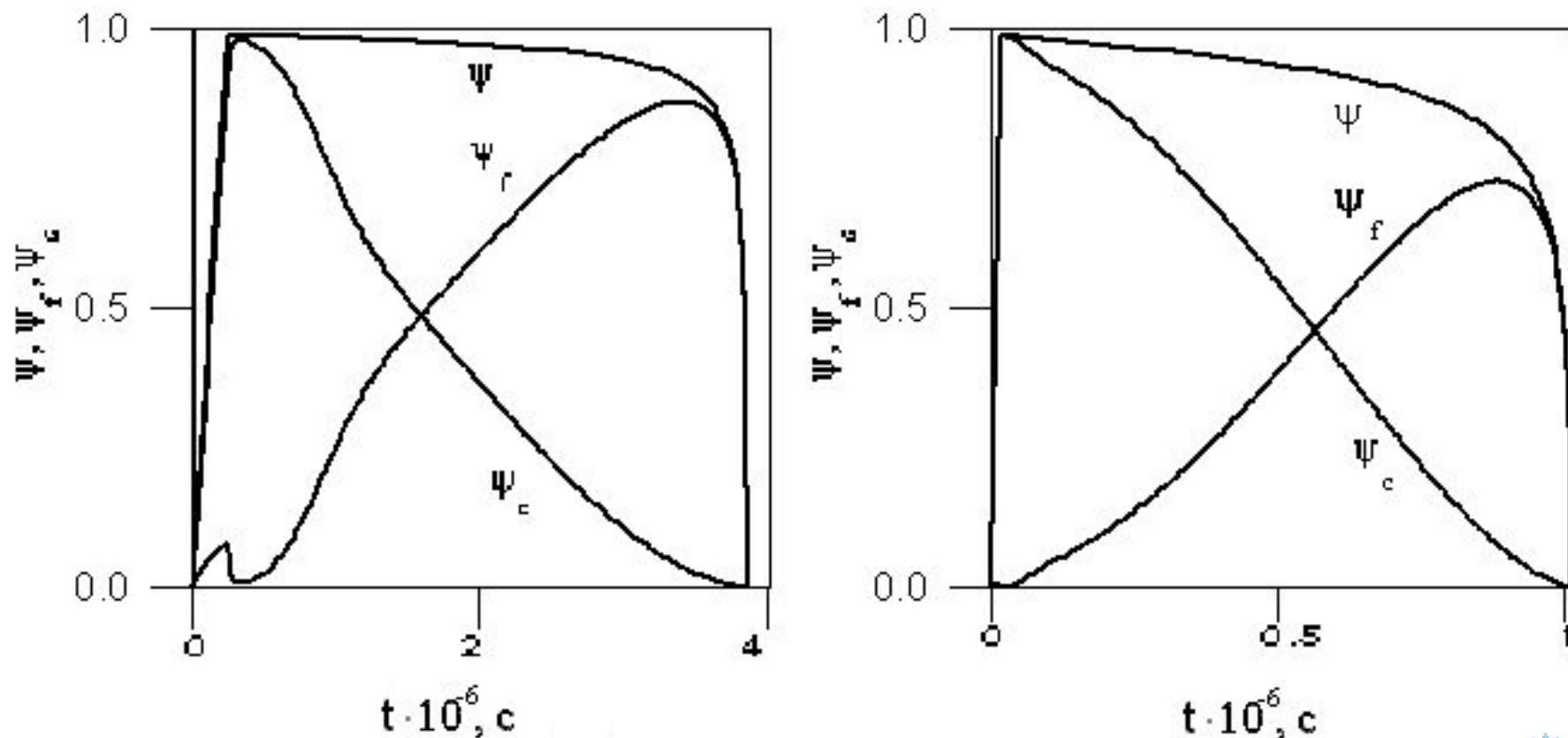


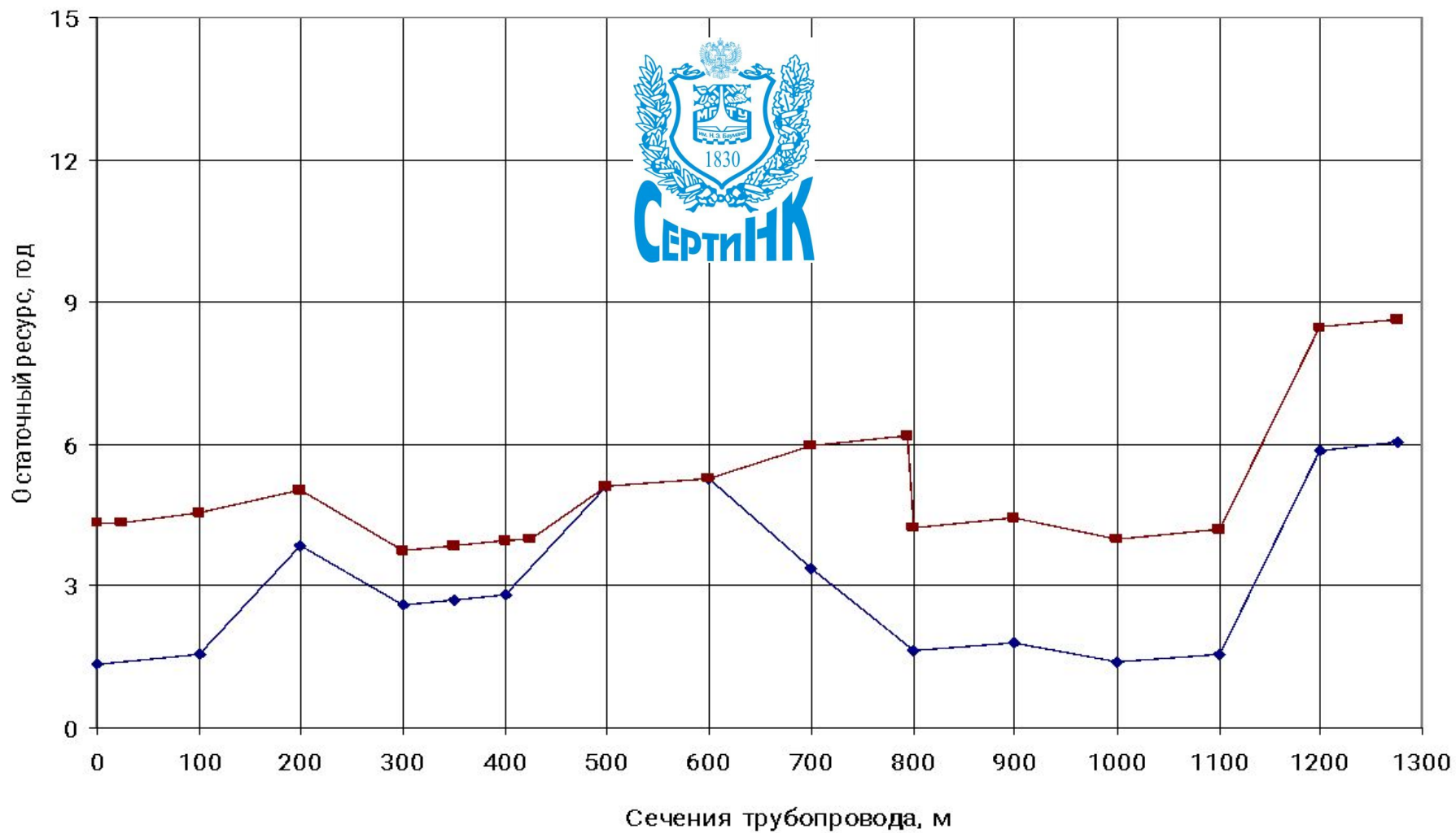
Рис. 4. Меры механических ψ_f коррозионных ψ_c , и их сумма ψ .



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

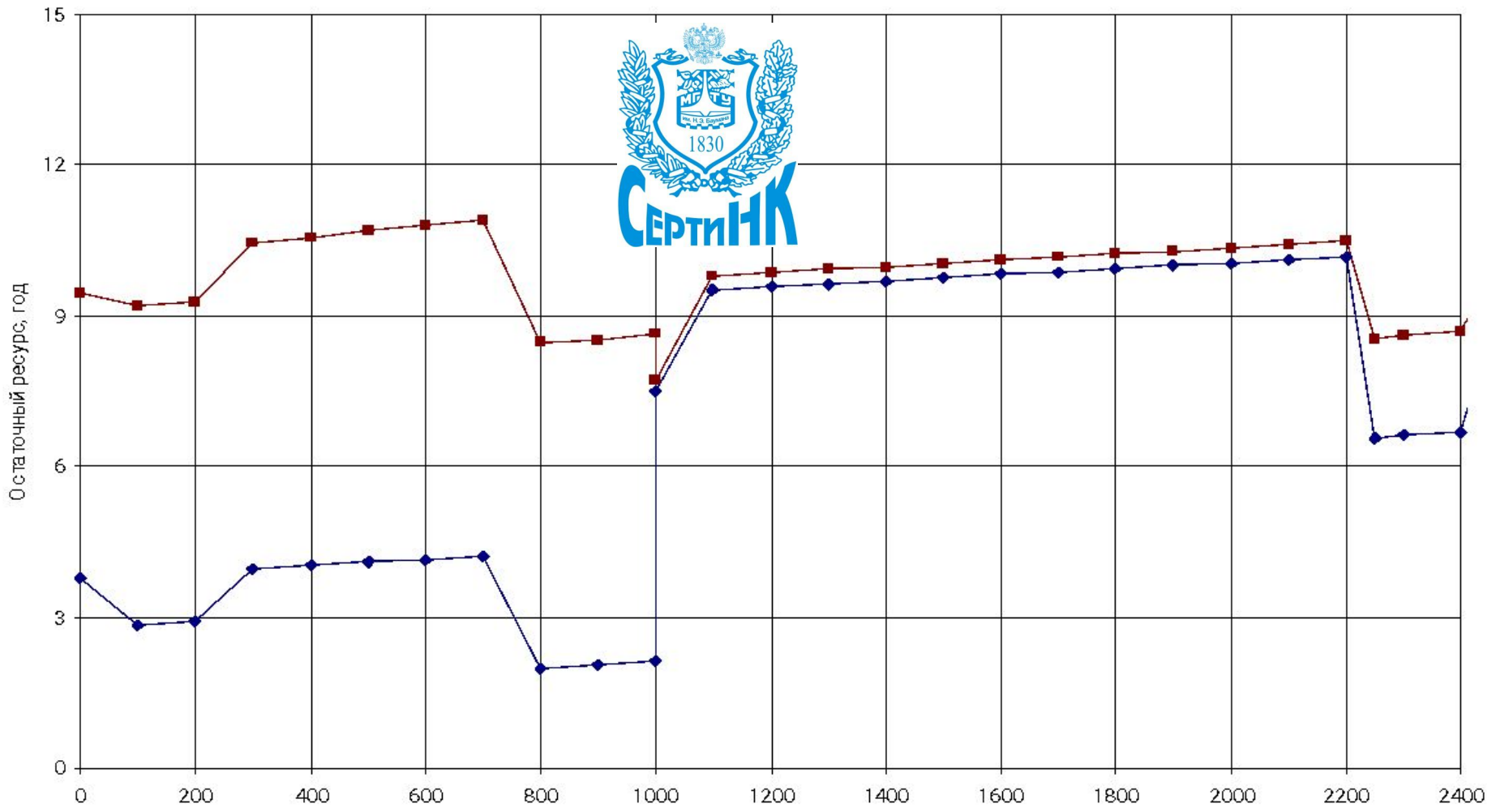


Сечения трубопровода, м

Рис. 5

◆ Предварительный расчет ■ Уточненный расчет

Остаточный ресурс газопровода ЦДНГ-1 - ГЗУ 32 - ТП

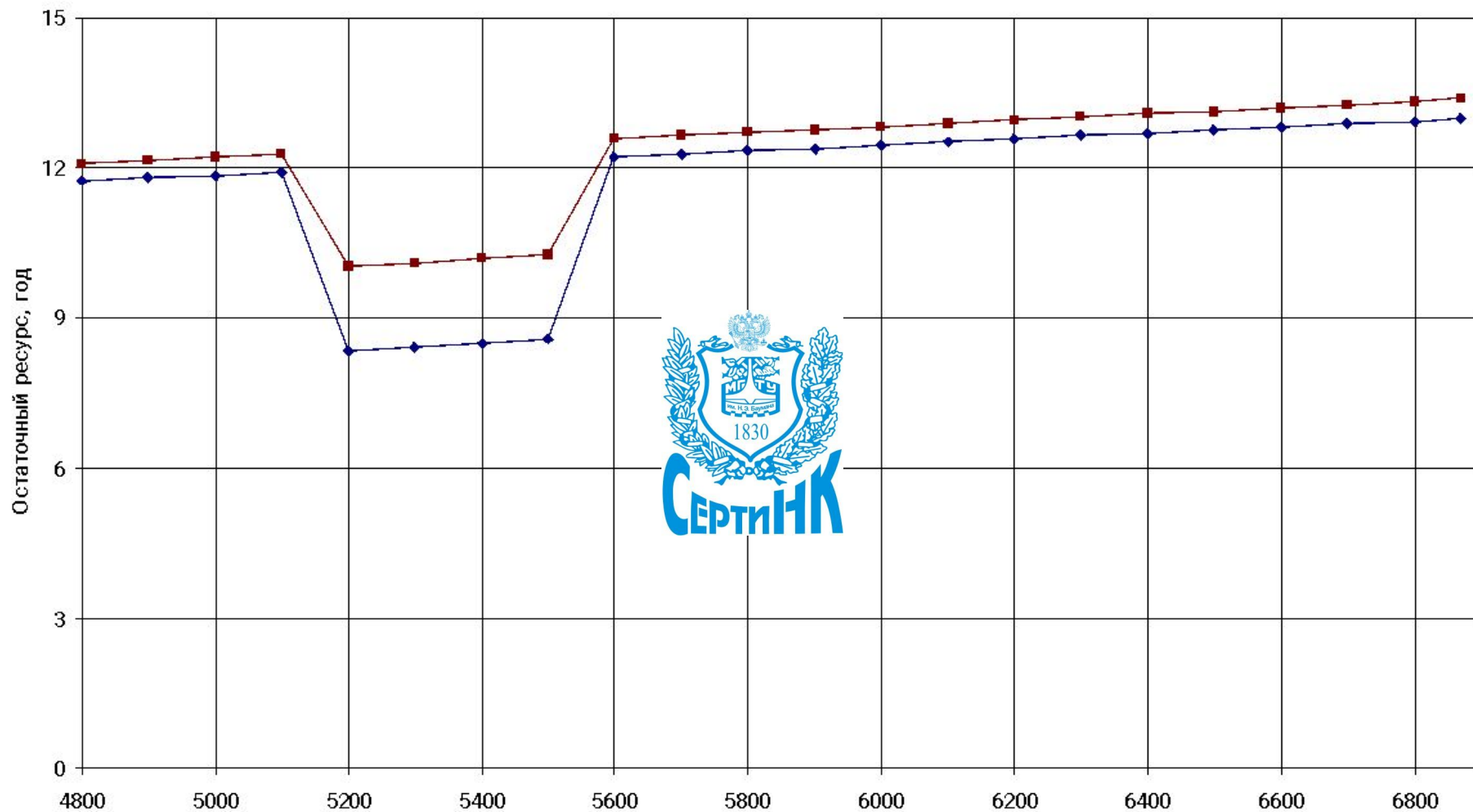


Сечения трубопровода, м

Рис. 6

◆ Предварительный расчет ■ Уточненный расчет

Остаточный ресурс газопровода ЦДНГ-1 - ГЗУ 32 - ТТП

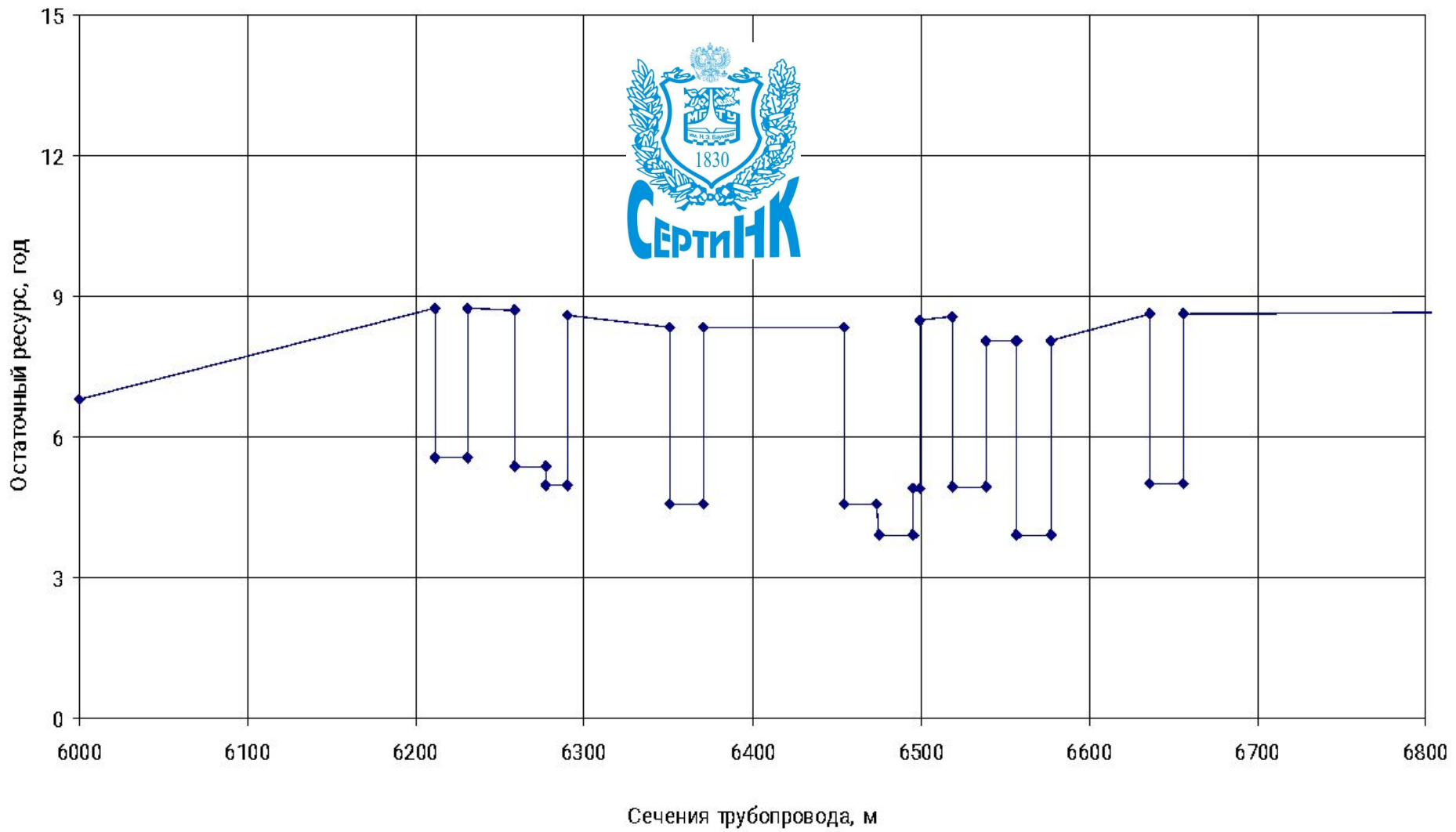


Сечения трубопровода, м

Рис. 6.2

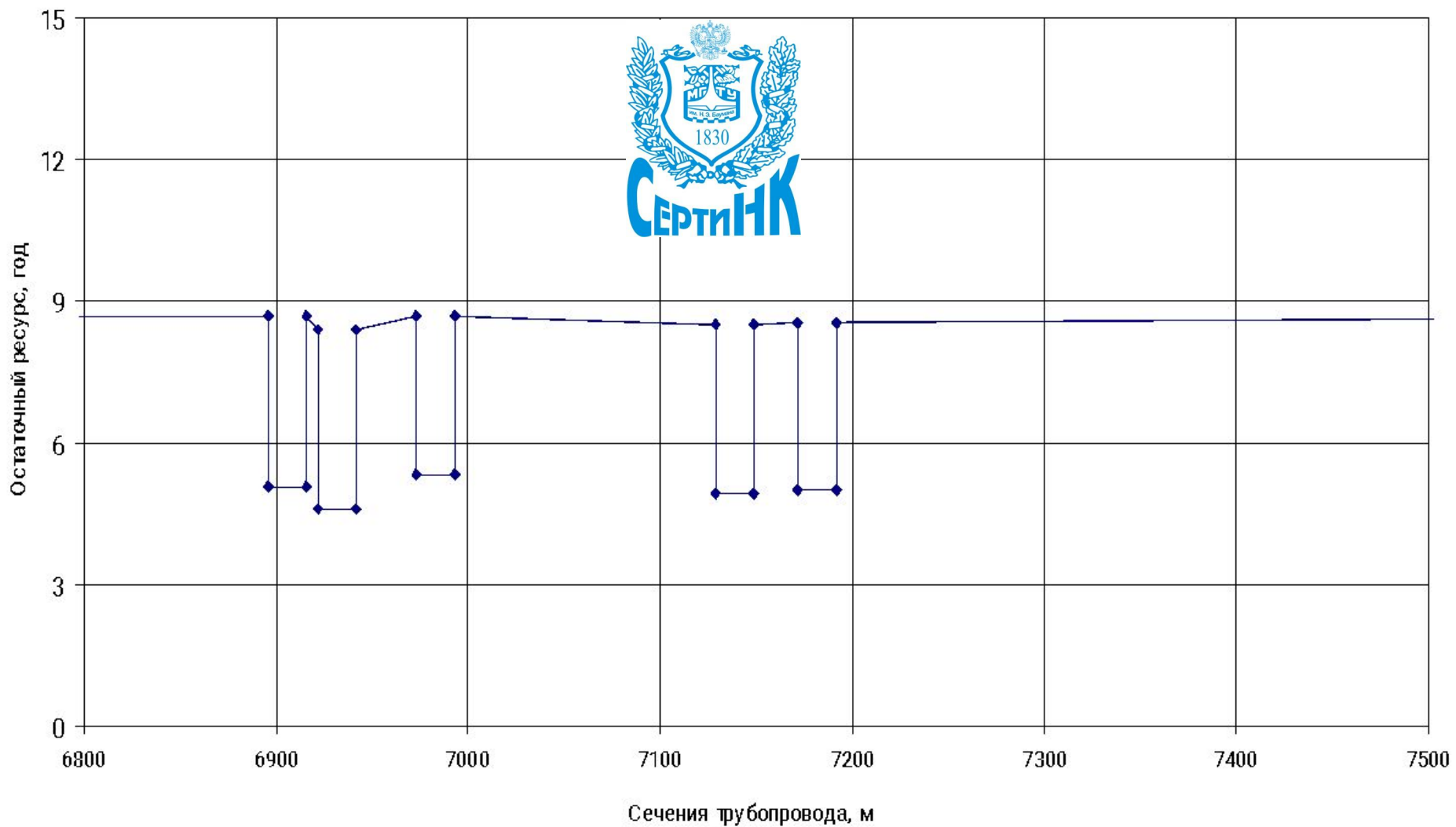
◆ Предварительный расчет ■ Уточненный расчет

Остаточный ресурс напорного газопровода основная линия



Сечения трубопровода, м
Рис. 7

Остаточный ресурс напорного газопровода основная линия



Сечения трубопровода, м
Рис. 7.1