

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Классификация математических моделей кинетики электрохимической коррозии металлов по виду функций ( $y$  - потеря массы металла или глубина каверны,  $\dot{y}$  - скорость и  $\ddot{y}$  - ускорение коррозионного процесса)

№ п.п.	Автор	Математическая модель процесса коррозии	Параметры модели	Независимые переменные	Функциональная зависимость
1.	М. Фарадей	$y=At$	$A=ai=const$	$t$	$y=f(t)$
2.	И. Денисон, Е. Мартин, Г. Друмм, Х. Годарт, И. Сутерланд, В. Шванк, Х. Торнес, Е. Веллнер, В. Джонсон, В. Хейник, И. Упхам, Е. Мор, А. Биккарис и др.	$y = Ai^a$	$A = 1 \div 3$ ; $A=0,25; 0,5$ ; $1,0; \dots 3,0$	$t$	$y=f(t)$
3.	Ф. Чемпион, П.Азис, Ж. Миткальф, Л.Я. Цикерман	$y = y_0 [1 - \exp(-at)]$	$y_0, a = const$	$t$	$y=f(t)$
4.	Л.Я. Цикерман	$y = y_0 [1 - A_1 \exp(-at/T_1) - A_2 \exp(-at/T_2)]$	$y_0$ ; $A_1 = T_1/(T_1 - T_2)$ ; $A_2 = T_2/(T_1 - T_2)$	$t$	$y=f(t)$
5.	А.И.Лысяя	$\ddot{y} = \ddot{y}_0 \exp(-at)$	$\ddot{y}_0, a$	$t$	$\ddot{y} = f(t)$
6.	А. Лиддиард, Б. Виттакер, Н.П. Жук	$y = y_0 \lg(t_0 + t)$	$y_0, t_0$	$t$	$y=f(t)$
7.	П. Хок, Ф. Цигал	$y = A \lg(t + B)$	$A, B$	$t$	$y=f(t)$
8.	Ю.В.Демин	$y = a_n \ln^n t + a_{n-1} \ln^{n-1} t + \dots + a_0 \ln t + d$	$a_n, a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_0$ ; $d; 1 \leq n \leq z$	$t$	$y=f(t)$
9.	П. Середа	$\lg(\dot{y}) = A \dot{y}_c + B + C$	$A, B, C$	$\dot{y}_c$	$\dot{y} = f(\dot{y}_c)$
10.	Гуттман	$y = ax^b (z + C)$	$a=0,005$ ; $b=0,8152$ ; $C=0,02889$	$x, z$	$y=f(x, z)$
11.	С.М. Налимов, М.А. Лучина, А.С. Кац	$y = x_1 (a_1 + a_2 x_2 + \dots + a_7 x_7)$	$a_1, a_2, \dots, a_7$	$x_1, x_2, \dots, x_7$	$y = f(x_1, x_2, \dots, x_7)$
12.	Г.К. Шрейбер, Л.С. Саакинян, Е.В. Маркова, А.Г. Дорофеев	$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_7 x_7$	$a_1, a_2, \dots, a_7$	$x_1, x_2, \dots, x_7$	$y = f(x_1, x_2, \dots, x_7)$
13.	Р.К. Трипахи, У.С. Анигботи, Н.Н. Нанда	$y = y_1 + y_2 + \dots + y_7$	Не применяются	$y_1, y_2, \dots, y_7$	$y = f(y_1, y_2, \dots, y_7)$
14.	Л.Я. Цикерман, Я.П. Штурман, М.Таиси, С. Юиро, М.В. Бурая, Ю.М. Жук, А.В. Турковская	$y = y_0 \frac{t}{t + T}$	$y_0, T$	$t$	$y=f(t)$

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 1

№ п.п.	Автор	Математическая модель процесса коррозии	Параметры модели	Независимые переменные	Функциональная зависимость
15.	В.А. Притула	$y = -A + (A^2 + Bt)^{1/2}$	A, B	t	$y=f(t)$
16.	И.Д. Пальмер А.С. Купер И.В. Горман	$\mathcal{Y} = A \exp(-B/T)(C_{H_2S})^D P^E$	A, B, T, D, E	C, P	$\mathcal{Y} = f(C, P)$
17.	К.Г. Берушгис	$y = [A + b(t - D)]t - [a_1 - a_2(t - t_n) - a_3(r - E) - F_c]$	A, B, D, E, r, F <sub>c</sub> , a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , a <sub>3</sub>	t, t <sub>n</sub>	$y = f(t, t_n)$
18.	К.Г. Берушгис, Г.Б. Кларк	$y = \frac{A}{t_1} a_1 + \frac{B}{t_2} a_2$	A, B, a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub>	t <sub>1</sub> , t <sub>2</sub>	$y = f(t_1, t_2)$
19.	Ю.Н. Михайловский, Г.Б. Кларк, Л.А. Шувахина, В.В. Агафонов, Н.П. Журавлев	$y = A_1 t_1 + A_2 t_2$ или $y = At$	A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , A	t <sub>1</sub> , t <sub>2</sub> , t	$y = f(t)$ при $\mathcal{Y} = \text{const}$
20.	А.И. Голубев, М.Х. Кадыров	$y = y_0 \frac{A}{BC} t$	y <sub>0</sub> , A, C, B = 100	t	$y=f(t)$
21.	М.А. Керимов	$y = f(t) \left\{ y_0 - A_1 \int_0^T \tau [f_1(t)] I(\tau) d\tau \right\} + A_2 \int_0^T \tau [f_2(t) - f_3(t)] I(\tau) d\tau$	y <sub>0</sub> , A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub>	f(t), t, f <sub>1</sub> (t), I(t), f <sub>2</sub> (t), f <sub>3</sub> (t)	$y = f(t, \tau)$
22.	М.А. Керимов	$y = C_1 e^{A_1 t} + C_2 e^{A_2 t} + \alpha + \beta t + (\gamma + \theta t) \cos(\nu t) + (\varepsilon + Kt) \sin(t)$	C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , α, β, γ, ε, K	t	$y=f(t)$
23.	Л.Я. Цикерман	$\mathcal{Y} = \mathcal{Y}_0 Z(t); Z(t) = \frac{1}{t/A + 1}$	$\mathcal{Y}_0, A$	t	$\mathcal{Y} = f(t)$
24.	Л.Я. Цикерман	$\mathcal{Y} = \frac{t}{At^2 + Bt + C}$	A, B, C	t	$\mathcal{Y} = f(t)$
25.	Л.Я. Цикерман	$\mathcal{Y} = \frac{C - At^2}{(At^2 + Bt + C)^2}$	A, B, C	t	$\mathcal{Y} = f(t)$
26.	Л.Я. Цикерман	$\mathcal{Y} = A \sin Bte^{(-Bt)}$	A, B, C, T; B=1/T	t	$\mathcal{Y} = f(t)$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

## Сравнительная оценка ВНПС в условиях постоянного и переменного внутреннего давления

Дата ввода трубопровода в эксплуатацию **01.01.1983**. По данным внутритрубной диагностики глубина дефекта на **13.11.1999** = 1,8 мм; на **20.09.2001** = 2,9 мм. По алгоритму (пункт 2.3) определяем начальную скорость коррозии: в период с **13.11.1999** по **20.09.2001**  $v_{0B}=0,53216$  мм/год. Дата начала коррозии равна **17.02.1996**.

Прогнозирование проводилось при данных:  $p_0=0.12-1.2$  МПа;  $p_H=0,11$  МПа;  $D_H=1220$  мм;  $S_0=14,5$  мм;  $\sigma_T=363$  МПа;  $\mu=0,35$ ;  $T=293$  К;  $V=7,1$  см<sup>3</sup>;  $v_{0H}=0$  мм/год;  $A=1.0716$  МПа;  $\nu = 00.8380$  час<sup>-1</sup>; Переменное внутреннее давление определяется по (2.34), среднее напряжение определяется по (2.30).

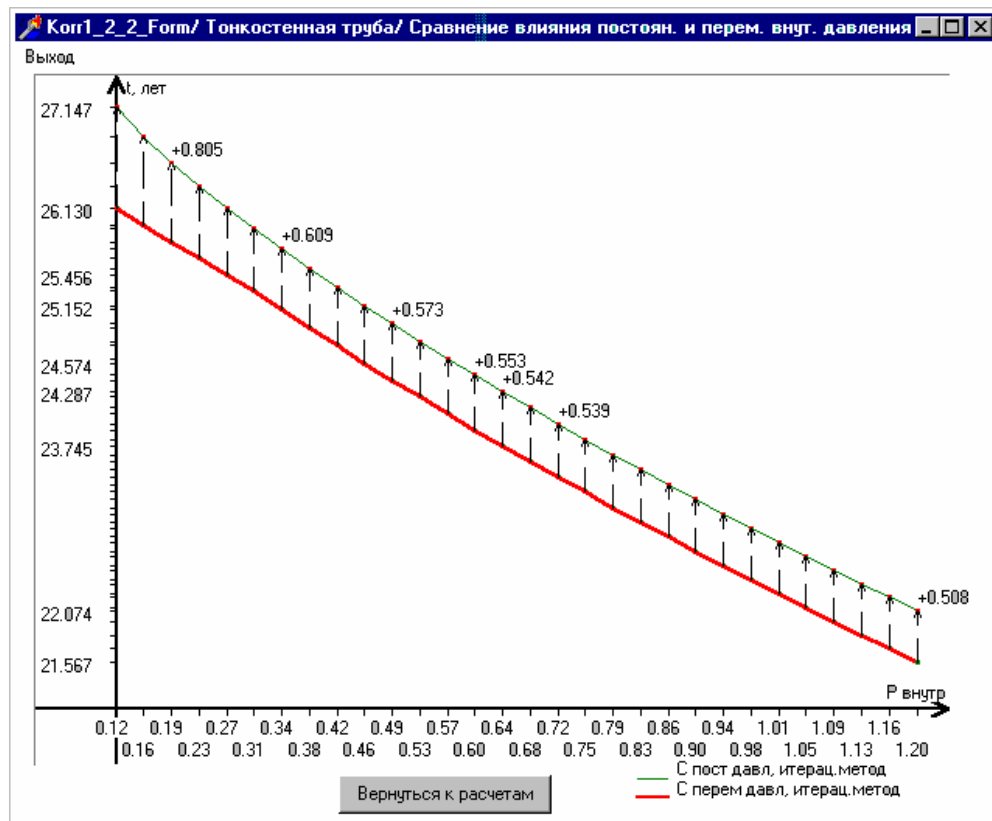


Рис. Результат расчета.

### Содержание паспорта

1. Технические и технологические характеристики трубопровода:
  - общие сведения о трубопроводе;
  - пространственные характеристики трубопровода;
  - испытания трубопровода при вводе его в эксплуатацию;
  - характеристики перекачиваемых по трубопроводу жидкостей;
  - сведения об оборудовании трубопровода;
  - контрольно-измерительные приборы и пункты;
  - сведения о задвижках;
  - кривые вставки на трубопроводе;
  - изоляция трубопровода;
  - установка электрохимической защиты;
2. морфологическая (гидроморфологическая) характеристика окружающей среды в районе трубопровода;
3. сведения о работах, проводимых на трубопроводе:
  - испытания трубопровода в процессе эксплуатации;
  - промывка трубопровода;
  - внутритрубная диагностика;
  - техническое состояние трубопровода по данным приборного обследования;
  - сведения о капитальном ремонте и техническом обслуживании на трубопроводе;
4. ликвидация аварий и их последствий на трубопроводе.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ТБД "Трубопровод" (главная таблица данных):

№ п/п	название поля ТБД	Тип	Длина поля	Количество знаков после запятой	Назначение поля
1.	NUMBER (INDEX)	Numeric	10		Порядковый номер
2.	TYPE_OILGAS (INDEX)	Numeric	10		Тип перекачиваемой жидкости
3.	MARKA (INDEX)	Numeric	6		Марка стали
4.	NAME_VETKI	Character	30		Название ветки
5.	KM_TRASS	Numeric	5		Километр по трассе
6.	DATA_VVODA	Date	8		Дата ввода в эксплуатацию, дд.мм.гггг
7.	PROEKT_ORG	Character	30		Проектная организация
8.	D_NARUG	Numeric	4		Наружный диаметр, мм
9.	T_STENKI	Numeric	5	2	Толщина стенки, мм
10.	MARKA	Character	15		Марка стали, ТУ или ГОСТ
11.	IZGOTOV	Character	30		Завод-изготовитель
12.	KATEGORIA	Character	10		Категория участка по СНиП
13.	NUMBER_UCH	Numeric	10		Номер участка трубы
14.	TEMPER_VVODA	Numeric	5	2	Температура трубы на момент укладки, в градусах Цельсия

ТБД "Марки труб" (Дочерняя таблица данных):

№ п/п	название поля ТБД	Тип	Длина поля	Количество знаков после запятой	Назначение поля
1.	MARKA (INDEX)	Numeric	6		Марка стали
2.	MARKA	Character	15		Марка стали, ТУ или ГОСТ
3.	IZGOTOV	Character	30		Завод-изготовитель

ТБД "Перекачиваемая жидкость" (Дочерняя таблица данных):

№ п/п	название поля ТБД	Тип	Длина поля	Количество знаков после запятой	Назначение поля
1.	TYPE_OILGAS (INDEX)	Numeric	10		Тип перекачиваемой жидкости
2.	NAME_PROD	Character	12		Наименование продукта
3.	PLOTN_MIN	Numeric	7	2	Минимальная плотность, кг/м <sup>3</sup>
4.	PLOTN_MAX	Numeric	7	2	Максимальная плотность, кг/м <sup>3</sup>
5.	DINAMICH	Numeric	12	9	Динамическая вязкость, (Н*с)/м <sup>2</sup>
6.	KINEMAT	Numeric	15	12	Кинематическая вязкость, м <sup>2</sup> /с
7.	TEMP_ZAST	Numeric	4		Температура застывания t, в градусах Цельсия
8.	TEMP_VSP	Numeric	4		Температура вспышки t, в градусах Цельсия

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 4

ТБД "Условия эксплуатации" (Дочерняя таблица данных):

№ п/п	название поля ТБД	Тип	Длина поля	Количество знаков после запятой	Назначение поля
1.	NUMBER (INDEX)	Numeric	10		Порядковый номер
2.	NUM_EXPR (INDEX)	Numeric	10		Номер эксперимента
3.	KOD_VKL (INDEX)	Numeric	4		Металлическое включение
4.	NAME_EXPR	Character	30		Название эксперимента
5.	DATE_EXPR	Date	8		Дата эксперимента
6.	ISH_P_N	Numeric	6	3	наружное давление, МПа
7.	ISH_V0_VN	Numeric	7	4	внутренняя начальная скорость, мм/год
8.	ISH_V0_N	Numeric	7	4	наружная начальная скорость, мм/год
9.	ISH_S_T	Numeric	7	2	предел текучести, МПа
10.	ISH_N_S_T	Numeric	5	2	коэффициент запаса прочности по пределу текучести
11.	ISH_F_N	Numeric	4	2	коэффициент несущей способности, Fн
12.	VKL_NAME	Character	10		Название вещества - металлическое включение в трубе, которое вступает в процесс электрохимической коррозии
13.	VKL_PLOTN	Numeric	7	2	Плотность вещества, кг/м <sup>3</sup>
14.	VKL_W	Numeric	3		W - атомная масса вещества
15.	VKL_ELEKTR	Numeric	2		p - количество электронов в атоме вещества
16.	ISH_T_ABS	Numeric	7	2	абсолютная температура, К
17.	ISH_V	Numeric	8	3	молярный объем металла, см <sup>3</sup> /моль
18.	ISH_Q	Numeric	7	2	Продольная сила Q, кН
19.	ISH_K_PUAS	Numeric	4	2	Коэффициент Пуассона
20.	TYPE_NAGR	Character	4		выбор модели нагружения трубопровода ()
21.	VN_P0	Numeric	7	4	Рабочее давление (На графике отмечено как P0)
22.	VN_L_CONST	Numeric	6		Длина участка с давлением P0
23.	VN_L_PEREM	Numeric	6		Длина участка с отклонениями давления от значения P0
24.	VN_AMEGA	Numeric	7	2	Частота колебаний
25.	VN_A	Numeric	6	4	Максимально возможная амплитуда колебаний, МПа
26.	VN_TAU	Numeric	6	4	Амплитуда скачка давления, МПа
27.	VN_MODEL	Character	4		Выберите тип изменения внутреннего давления
28.	T_GR_JAN	Numeric	6	1	Среднемесячная температура припочвенного слоя в градусах Цельсия: январь
29.	T_GR_FEB	Numeric	6	1	февраль
30.	T_GR_MAR	Numeric	6	1	март
31.	T_GR_APR	Numeric	6	1	апрель
32.	T_GR_MAY	Numeric	6	1	май
33.	T_GR_JUN	Numeric	6	1	июнь

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 4

№ п/п	название поля ТБД	Тип	Длина поля	Количество знаков после запятой	Назначение поля
34.	T_GR_JUL	Numeric	6	1	июль
35.	T_GR_AUG	Numeric	6	1	август
36.	T_GR_SEP	Numeric	6	1	сентябрь
37.	T_GR_OKT	Numeric	6	1	октябрь
38.	T_GR_NOV	Numeric	6	1	ноябрь
39.	T_GR_DEC	Numeric	6	1	декабрь
40.	T_OIL_JAN	Numeric	6	1	Среднемесячная температура перекачиваемого продукта в градусах Цельсия: январь
41.	T_OIL_FEB	Numeric	6	1	февраль
42.	T_OIL_MAR	Numeric	6	1	март
43.	T_OIL_APR	Numeric	6	1	апрель
44.	T_OIL_MAY	Numeric	6	1	май
45.	T_OIL_JUN	Numeric	6	1	июнь
46.	T_OIL_JUL	Numeric	6	1	июль
47.	T_OIL_AUG	Numeric	6	1	август
48.	T_OIL_SEP	Numeric	6	1	сентябрь
49.	T_OIL_OKT	Numeric	6	1	октябрь
50.	T_OIL_NOV	Numeric	6	1	ноябрь
51.	T_OIL_DEC	Numeric	6	1	декабрь
52.	IZOL_FUNC	Character	4		Выберите функцию износа изоляционного покрытия
53.	IZOL_TYPE	Character	20		Выберите тип изоляционного покрытия
54.	IZOL_TOLSH	Numeric	5	2	Толщина изоляционного покрытия
55.	IZOL_TIME	Numeric	7	4	Срок службы изоляционного покрытия до полного износа:
56.	IZOL_N	Numeric	3		Введите число разбиений срока службы изоляции (n):
57.	IZOL_K	Numeric	15	9	коэффициент износа изоляционного покрытия
58.	IZOL_PROZ	Numeric	2		Введите максимально возможный процент износа изоляции в год
59.	IZOL_RND	Character	254		
60.	KAT_U_OPT	Numeric	5	2	Введите значение оптимальной разности потенциалов $U_{opt}$ , при котором скорость коррозии равна нулю, В
61.	KAT_U	Numeric	5	2	Введите значение существующей разности потенциалов $U$ (т.е. $=E_k - E_a$ ), В
62.	KAT_TYPE	Character	3		Катодная защита используется или нет
63.	PREDEL_TYPE	Character	4		Условие перехода трубопровода в предельное состояние



## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 4

ТБД "Включения" (Дочерняя таблица данных):

№ п/п	название поля ТБД	Тип	Длина поля	Количество знаков после запятой	Назначение поля
1.	KOD_VKL (INDEX)	Numeric	4		Металлическое включение
2.	VKL_Name	Character	10		Название вещества - металлическое включение в трубе, которое вступает в процесс электрохимической коррозии
3.	VKL_PLOTN	Numeric	7	2	Плотность вещества, кг/м <sup>3</sup>
4.	VKL_W	Numeric	3		W - атомная масса вещества
5.	VKL_ELEKTR	Numeric	2		n - количество электронов в атоме вещества

ТБД «Диагностика» (Дочерняя таблица данных):

№ п/п	название поля ТБД	Тип	Длина поля	Количество знаков после запятой	Назначение поля
1.	NUMBER (INDEX)	Numeric	10		Порядковый номер
2.	KOD_DEFECT	Numeric	6		Код дефекта
3.	TYPE_DEFECT	Logical	1		Вид дефекта: 1 – внутренний, 0 - внешний
4.	S_DEFECT	Numeric	5	2	Глубина дефекта в мм
5.	A_DEFECT	Numeric	5		Длина дефекта в мм
6.	B_DEFECT	Numeric	4		Ширина дефекта в мм
7.	U_DEFECT	Numeric	3		Угловое положение характерной точки, град
8.	L_DEFECT	Numeric	11	2	Дистанция начала дефекта в м

ТБД «Результаты экспериментов» (Дочерняя таблица данных):

№ п/п	название поля ТБД	Тип	Длина поля	Количество знаков после запятой	Назначение поля
1.	NUM_EXPR (INDEX)	Numeric	10		Номер эксперимента
2.	V0_VN	Numeric	8	5	Начальная скорость внутренней коррозии, мм/год
3.	V0_N	Numeric	8	5	Начальная скорость наружной коррозии, мм/год
4.	DATA_BEGIN	Date	8		Дата начала коррозии, дд.мм.гггг
5.	DATA_PREDEL	Date	8		Дата перехода в предельное состояние, дд.мм.гггг

Примеры реализации интерфейса ПАК для ввода данных, которые необходимы для оценки ВНПС участка трубопровода

**Оценка долговечности трубопровода при различных условиях эксплуатации**

Давление внутреннее | Изоляция | Влажность и температура | Катодная защита | Выбор типа нагружения тонкостен. трубы  
 Сведения об участке трубопровода | Ввод исходных данных | Выбор типа нагружения толстостен. трубы

**Выберите участок трубы из базы:**

Порядковый номер:   
 Название ветки:   
 Километр по трассе:   
 Дата ввода в эксплуатацию, дд.мм.гггг:   
 Проектная организация:   
 Наружный диаметр, мм:   
 Толщина стенки, мм:   
 Марка стали, ТУ или ГОСТ:   
 Завод-изготовитель:   
 Категория участка по СНиП:   
 Номер участка трубы:   
 Температура трубы на момент укладки:  °С

**Характеристики перекачиваемого продукта:**

Порядковый номер:   
 Наименование продукта:   
 Минимальная плотность, кг/м<sup>3</sup>:   
 Максимальная плотность, кг/м<sup>3</sup>:   
 Динамическая вязкость, (Н\*с)/м<sup>2</sup>:   
 Кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с:   
 Температура застывания t °С:   
 Температура вспышки t °С:

**Выберите эксперимент или определите новый:**

Порядковый номер:   
 Номер эксперимента:   
 Название эксперимента:   
 Дата эксперимента:

**Оценка долговечности трубопровода при различных условиях эксплуатации**

Давление внутреннее | Изоляция | Влажность и температура | Катодная защита | Выбор типа нагружения тонкостен. трубы  
 Сведения об участке трубопровода | Ввод исходных данных | Выбор типа нагружения толстостен. трубы

**Введите исходные данные, общие для всех моделей напряженного состояния трубы:**

наружное давление, МПа:   
 внутренняя нач скорость, мм/год:   
 наружная нач скорость, мм/год:   
 предел текучести, МПа:   
 коэффициент запаса прочности по пределу текучести:   
 коэффициент несущей способности, Fн:

**Вещество - металлическое включение в трубе, которое вступает в процесс электрохимической коррозии**

Название вещества:

Плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>:   
 W - атомная масса вещества:   
 n - количество электронов в атоме вещества:

**Константы:**

абсолютная температура, К:   
 молярный объем металла, см<sup>3</sup>/моль:   
 универсальная газовая постоянная, Дж/(моль\*К):

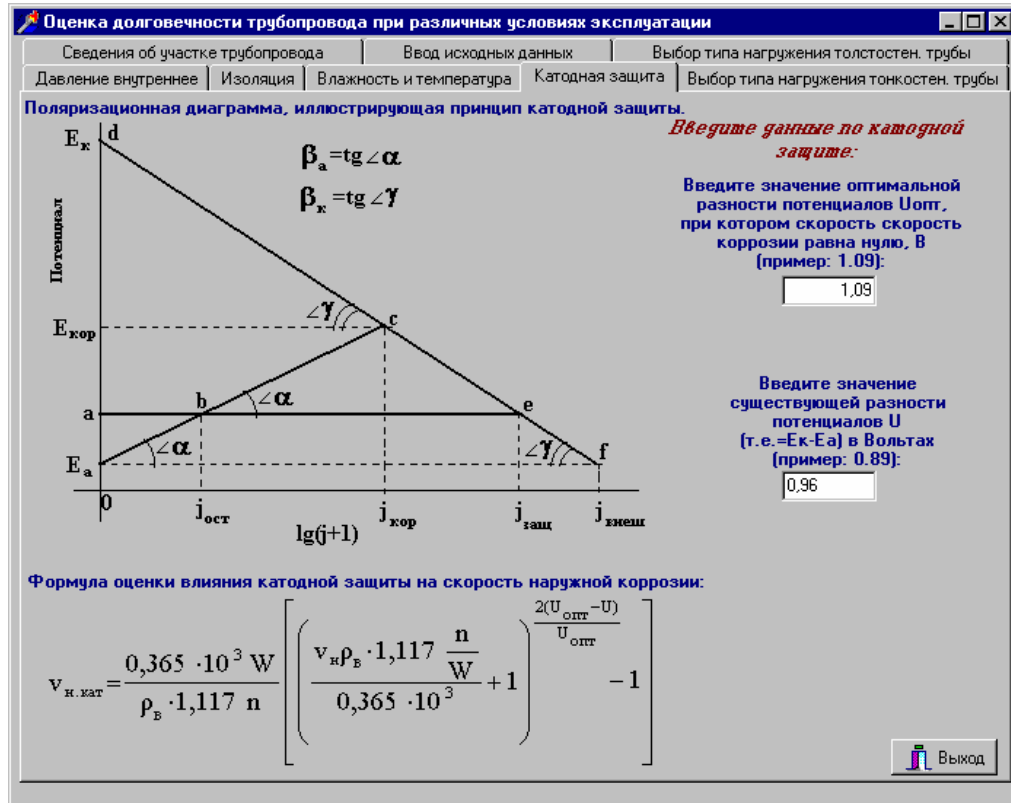
**К моделям №2, №3:**

Продольная сила Q, кН:

**К модели №4:**

Коэффициент Пуассона:

## ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ 5



Оценка долговечности трубопровода при различных условиях эксплуатации

Давление внутреннее | Изоляция | Влажность и температура | Катодная защита | Выбор типа нагружения тонкостен. трубы

Сведения об участке трубопровода | Ввод исходных данных | Выбор типа нагружения толстостен. трубы

Выберите тип нагруженного состояния толстостенной трубы

Модель №1  Модель №2  Модель №3

Толстостенные трубы под действием внутреннего и внешнего давления (модель №1):

$$\frac{\sigma_{\theta}}{r} = \frac{p_B r_B^2 - p_H r_H^2}{r_H^2 - r_B^2} + \frac{r_B^2 (p_B - p_H)}{r_H^2 - r_B^2} \cdot \frac{r_H^2}{r^2}$$

$$\frac{\sigma_r}{r} = \frac{p_B r_B^2 - p_H r_H^2}{r_H^2 - r_B^2} - \frac{r_B^2 (p_B - p_H)}{r_H^2 - r_B^2} \cdot \frac{r_H^2}{r^2}$$

$$\frac{\sigma_z}{r} = \frac{p_B r_B^2 - p_H r_H^2}{r_H^2 - r_B^2}$$

Трубы под внутренним давлением и продольной силой  $Q$ , наличие которой не изменяет окружных и радиальных напряжений в стенках (модель №3):

$$\frac{\sigma_{\theta}}{r} = \frac{p_B r_B^2}{r_H^2 - r_B^2} + \frac{p_B r_B^2}{r_H^2 - r_B^2} \cdot \frac{r_H^2}{r^2}$$

$$\frac{\sigma_r}{r} = \frac{p_B r_B^2}{r_H^2 - r_B^2} - \frac{p_B r_B^2}{r_H^2 - r_B^2} \cdot \frac{r_H^2}{r^2}$$

$$\frac{\sigma_z}{r} = \frac{p_B r_B^2}{r_H^2 - r_B^2} + \frac{Q}{\pi(r_H^2 - r_B^2)}$$

Толстостенные трубы под действием продольной силы, испытывают одноосное напряженное состояние при коррозии с внутренней поверхности (модель №2):

$$\frac{\sigma(t)}{r} = \frac{Q}{\pi[r_H^2 - (r_B + S_B(t))^2]}$$