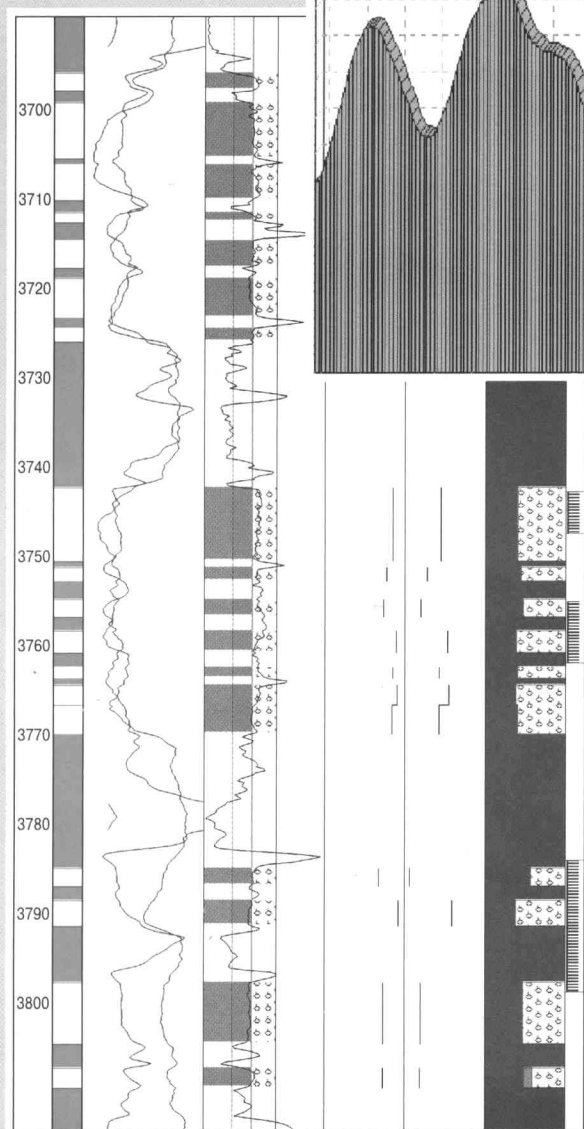


1.2003 Геофизика



Выделение коллекторов
и определение их свойств,
Уренгойское месторождение

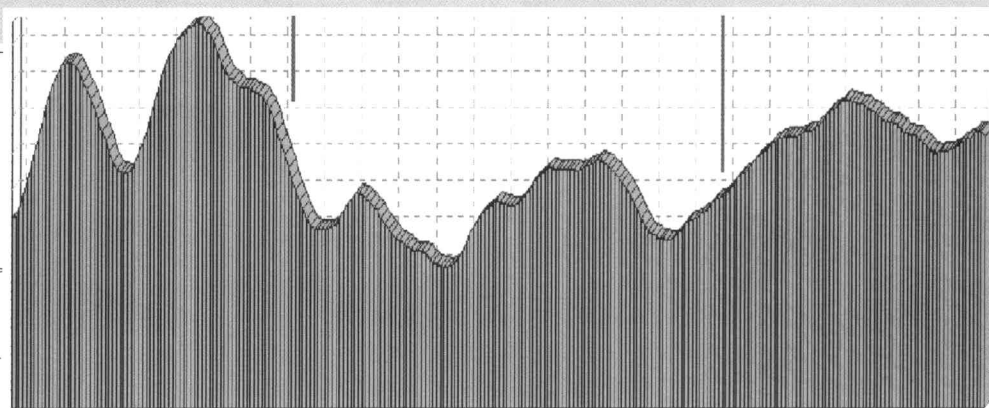
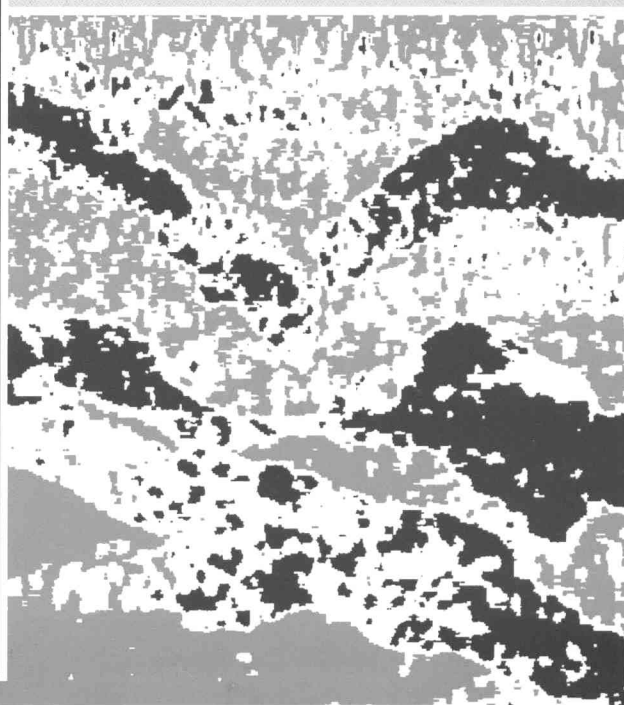


График амплитуд сейсмозаписи в интервале анализа



Сейсмический разрез земной коры
в параметрах когерентности отраженных волн



ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ
С 1993 ГОДА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
МИНИСТЕРСТВА ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
И ЕВРО-АЗИАТСКОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

1.2003 Геофизика

СОДЕРЖАНИЕ

О. К. Кондратьев

Прогноз землетрясений: причины неудач
и пути решения проблемы 3

**В. И. Бондарев, С. М. Крылатков,
Н. А. Крылаткова, Т. С. Силина**

Новые возможности метода многократных
перекрытий на этапе детальных работ 15

Ю. П. Кострыгин

Влияние шероховатости грунта
на динамику колебательной системы
гидравлического вибратора 22

В. М. Погожев, А. Б. Городков

Оценка точности определения глубин
отражающих горизонтов с использованием
опорной границы 26

**М. Ф. Печеркин, А. А. Качкин,
С. С. Говоров**

Новые данные о строении и перспективах
нефтегазоносности доюрских отложений
Яхлинской площади 28

Е. Д. Казаченко, М. Г. Марков

Анализ моделей для расчета упругих характеристик
сцементированных осадочных пород 32

**В. Г. Драцов, Я. Н. Абдухаликов,
Т. Д. Наказная**

Выделение слабоконсолидированных
терригенных коллекторов и определение
фильтрационно-емкостных свойств
по их акустическому импедансу 41

**В. Г. Фоменко, Л. Е. Николаева,
С. Н. Мохова, Н. В. Комар,
И. Е. Шандрыгина**

Особенности интерпретации данных ГИС
в ачимовских отложениях Западной Сибири 45

А. А. Мусатов, Л. Накамура, В. А. Шевнин
Аппроксимация трубопровода длинной линией
для оценки его технического состояния 51

В. Н. Семов

В поиске критериев регионального прогноза
нефтегазоносности по особенностям
глубинного строения земной коры 59

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР О.К. КОНДРАТЬЕВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: Л.Д. Бовт (первый зам. главного редактора), В.В. Бродовой (зам. главного редактора),
А.И. Фионов (зам. главного редактора), И.А. Безрук, А.М. Блюменцев, Г.Н. Боганик, Ю.И. Горбачев,
М.И. Кременецкий, А.С. Лаврик, А.В. Липилин, И.А. Мушин, А.А. Никитин, В.И. Петерсилье,
Е.Е. Поляков, С.Н. Птецов, Б.С. Светов, С.А. Серкерев, Ю.К. Щукин

РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ЕАГО:

Л.Д. Овчининская - науч. и худож. редактор
Москва, 113184, ул. Пятницкая, 9/28.

Тел.: (095) 959-44-41, факс (095) 950-83-84.

E-mail: eago@dol.ru

Свидетельство о регистрации журнала

№ 0110923 от 21.07.93 г.

ISSN 1681-4568

"ИЗДАТЕЛЬСТВО ГЕРС": лицензия ЛР № 063997

Л.И. Гевчук - компьютерная верстка,

Р.С. Калинина - набор,

Н.В. Царева - корректор

170034, Тверь, ул. Новоторжская, 12Б.

Тел.: (0822) 42-59-32, 33-56-37.

Отпечатано в типографии "Издательство ГЕРС":

лицензия ПД № 5-0012

тираж 1500 экз.

АППРОКСИМАЦИЯ ТРУБОПРОВОДА ДЛИННОЙ ЛИНИЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

А. А. Мусатов, Л. Накамура, В. А. Шевнин

Введение

Трубопроводы являются основными путями транспортировки нефти и газа. В течение эксплуатации трубопровода различные факторы (гидрогеологические условия, микротектонические движения, механические деформации, нелегальные подключения, качество транспортируемых продуктов) влияют на трубопроводы и изменяют их состояние. Под действием этих факторов ухудшается качество защитного покрытия трубопровода, развивается процесс коррозии и снижаются механические свойства стенок трубы. Указанные процессы приводят к возникновению потенциально опасных мест на стенках трубопровода. В таких местах, принимая во внимание характер транспортируемых продуктов и условия транспортировки (высокие давление и температура), возможны серьезные аварии. Повреждения трубопроводов приводят к существенным экономическим потерям и загрязнению среды. Для безопасной и надежной работы трубопровода проводятся периодические инспекции, которые включают как методы внутреннего контроля, так и наблюдения с поверхности земли.

Обзор геофизических методов для бесконтактного контроля технического состояния трубопроводов дан в книге [3]. Среди геофизических методов, используемых для инспекции трубопроводов, важное место занимают наземные электрические и электромагнитные методы, которые обеспечивают определение положения и глубины трубопровода. Эти методы также позволяют оценить степень нарушения электрической изоляции трубопровода и состояние катодной защиты. Один из наиболее эффективных методов определения повреждений изоляции состоит в измерении магнитного поля, созданного током, текущим в трубопроводе. Система катодной защиты или специальный генератор, присоединенный между трубопроводом и точкой заземления могут использоваться как источники такого тока. Низкочастотное магнитное поле (50 Гц - 1 кГц) измеряют с помощью индуктивных антенн, а для постоянного или инфранизкочастотного диапазона (ниже 4 - 5 Гц) применяют феррозондовые магнитометры.

Известны разные методы и аппаратура для изучения технического состояния трубопровода: метод CIPS (Close Interval Pipe-to-Soil Potential), метод DCVG - метод градиента потенциала постоянного тока, аппаратура C-Scan фирмы Dynalog Electronics, Pipeline Current Mapper (PCM) фирмы Radiodetection, аппаратура ЭРА-Трасса фирмы "ЭРА" (С.-Петербург) и другие. В послед-

них трех типах аппаратуры измеряется магнитное поле. Методики проведения исследований, различаясь в деталях, все же во многом сходны. Измерения магнитного поля обычно проводят с шагом 25 м вдоль оси трубы. Прежде всего определяется глубина трубопровода, и при определении тока в трубе вводится компенсация за глубину трубы. По результатам измерений строят графики тока и приращения тока вдоль трубы (ток утечки). Приращение тока логарифмируют и нормируют к одному погонному метру. Максимальные значения параметра тока утечки совпадают с зонами изменения тока, по которым и выявляют участки для более детальных исследований непосредственно зон утечки. Оценка состояния трубопровода по току утечки является косвенной, поскольку при этом не оценивается сопротивление утечки, которая является более прямой характеристикой состояния изоляции, особенно, если она дополняется измерениями сопротивления грунта.

Наиболее простым и широко используемым при разработке методики полевых работ и обработки экспериментальных данных является предположение, заключающееся в том, что измеряемое магнитное поле определяется током, равным по величине текущему в бесконечном изолированном проводе, находящемся в высокоомной немагнитной среде на глубине, соответствующей оси трубопровода (закон Био-Савара). При таком подходе расчет магнитного поля производится без учета изменения тока в трубопроводе, вызванного утечкой тока в окружающую среду через изоляцию даже в относительно простом случае трубопровода с однородной изоляцией.

Численное решение для трубопровода с переменным сопротивлением утечки (с поврежденной изоляцией) для 2D-осесимметричной модели методом конечных разностей было предложено в работе [6]. Численное решение такой задачи является довольно сложным, принимая во внимание особую геометрию модели (протяженность) и очень высокий контраст удельных сопротивлений цилиндрических слоев.

Наиболее удобным, на наш взгляд, аппаратом для решения подобной задачи является представление трубопровода с высокой электрической проводимостью и изоляцией конечного сопротивления моделью с распределенными параметрами (длинной линией). Такая аппроксимация является физически более адекватной по сравнению с простейшим решением для модели изолированного провода и существенно более простой для численной реализации по сравнению с 2D-моделированием, сохраняя при этом возможность учета высоких

конечных значений проводимости металлической трубы и сопротивления изоляции, определяющих ток утечки. Модель длинной линии соответствует постановке задачи о поиске зон повреждения изоляции, в которой не требуется находить распределение тока в окружающей среде.

Учитывая высокую проводимость трубопровода по сравнению с сопротивлением изоляции и вмещающей среды, можно предположить, что ток главным образом концентрируется в трубопроводе, и этим током определяется магнитное поле.

В геофизической практике теория длинных линий использовалась в методе определения удельного сопротивления коллекторов при измерении через обсадную трубу в скважинной геофизике [1, 8, 9], при вычислении электрического поля от линейного заземления [5], в теории электрического каротажа для проводящей буровой жидкости [2, 7]. Модель длинной линии также используется при расчете токов катодной защиты для протяженного участка трубопровода [10]. В этом случае предполагается замена трубопровода эквивалентной однородной длинной линией.

В настоящей работе используется аппроксимация трубопровода с изменяющимся вдоль него сопротивлением утечки (изменение сопротивления изоляции и удельного сопротивления окружающей среды) в виде неоднородной длинной линии, состоящей из кусочно-однородных участков. В этом случае задача 2D сводится к 1D, и обеспечивается ее аналитическое решение. Применяя такой подход, на первом этапе рассчитывают распределение напряжения, тока в трубопроводе и тока утечки через изоляцию в окружающую среду. На втором этапе рассчитывается магнитное поле от меняющегося текущего по трубопроводу тока.

Проведенное моделирование для трубопровода с нарушенной изоляцией позволило установить зависимость указанных параметров от сопротивления утечки и размеров зоны повреждения. На основе этих расчетов уточнена методика полевых работ и обработки данных. Предлагается дополнить измерения магнитного поля измерениями напряжения с помощью электрической линии, подключенной к контрольным выводам и заземленной в бесконечности. Распределение напряжения вдоль трубопровода связано в основном с интегральными его характеристиками и слабо отражает локальные неоднородности сопротивления изоляции. Для восстановления напряжения по всей длине трубопровода с необходимой для практических целей точностью достаточно проводить его измерение в одной-двух точках, используя контрольные выводы на трубопроводе. На основе этих измерений в каждой точке профиля над трубопроводом оценивается сопротивление утечки, соответствующее отношению восстановленного напряжения к току утечки (разнице токов на интервале наблюдения).

Приведены результаты инспекции реального трубопровода, для которого на основе оценки сопротивления утечки выявлены зоны сильного повреждения изоляции.

АППРОКСИМАЦИЯ ТРУБОПРОВОДА ДЛИННОЙ ЛИНИЕЙ

При оценке состояния электрической изоляции трубопровода в качестве генераторов используются станции катодной защиты или специальные внешние источники, один полюс которых подключен непосред-

ственно к высокопроводящей металлической трубе, а другой - к земле.

Источник катодной защиты обеспечивает отрицательный потенциал постоянного тока на трубопроводе 1 - 2 В. Кроме компоненты постоянного тока, в спектре сигнала катодной защиты содержатся четные гармоники переменного тока промышленной частоты. В этом случае измерения магнитного поля производятся на второй гармонике 100 или 120 Гц. При измерении магнитного поля постоянного тока такой генератор можно считать генератором напряжения. В то же время, когда для наблюдений используются гармоники тока, возбуждаемые станцией катодной защиты, заданным является ток в генераторе. Внешние источники переменного электромагнитного поля, применяемые для контроля технического состояния трубопровода, являются генераторами тока с рабочими частотами, обычно не превышающими 1 кГц. Для измерения магнитной составляющей в низкочастотном диапазоне используются индуктивные приемные антенны или феррозондовые магнитометры, позволяющие проводить измерения на инфранизких частотах, вплоть до постоянного тока.

Предположим, что генератор гармонически меняющегося переменного тока создает напряжение $V(\omega, 0) = V_0 \exp(j\omega t)$ в начальной точке трубопровода, которая принимается за начало координат. (Ось абсцисс X направлена вдоль трубы.) Тогда в трубопроводе возникнут меняющиеся с расстоянием ток $I(\omega, x)$ и напряжение $V(\omega, x)$ (рис. 1, а). Принимая во внимание высокую проводимость металлической трубы и присутствие слоя изоляции высокого сопротивления, уменьшение напряжения $dV(\omega, x)$ на интервале dx может быть представлено в виде

$$-dV(\omega, x) = Z dx I(\omega, x)$$

или

$$dV(\omega, x)/dx = -ZI(\omega, x), \quad (1)$$

где Z [Ом/м] - погонное комплексное сопротивление трубопровода на интервале 1 м.

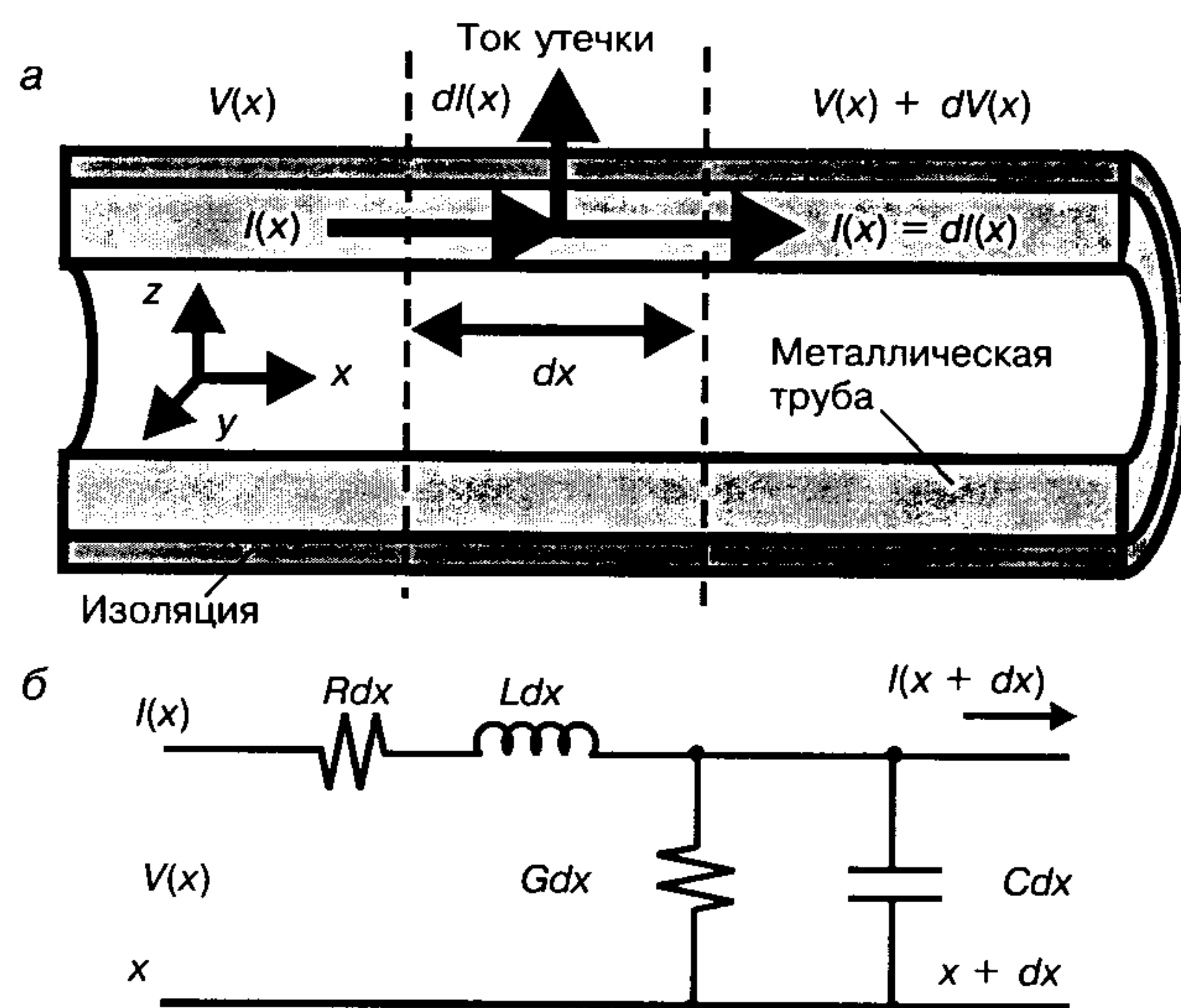


Рис. 1. Изменение потенциала и тока в продольном сечении трубопровода (а) и эквивалентная электрическая схема участка трубопровода длиной dx как элемент длинной линии (б)

Изменение тока $dI(x)$ вдоль трубопровода, связанное с его утечкой через изоляцию в среду, определяется выражением

$$-dI(\omega, x) = Y dx V(\omega, x)$$

или

$$dI(\omega, x)/dx = -YV(\omega, x), \quad (2)$$

где Y [1/Ом · м] - погонная комплексная проводимость утечки на единице длины.

Эквивалентная электрическая схема трубопровода, введенная как длинная линия с распределенными параметрами, показана на рис. 1, б. В теории длинных линий при выводе уравнений (1) и (2) используются закон Кирхгофа для токов и напряжений и их представление в виде ряда Тейлора с точностью до третьего члена (Chirpan, 1968). Данные уравнения записаны в виде обыкновенных дифференциальных уравнений, так как комплексные амплитуды тока и напряжения являются фактически функциями одной переменной x .

Комплексная проводимость утечки (поперечное сопротивление линии) Y и сопротивление трубопровода Z (продольное сопротивление линии) определяются омическим сопротивлением R [Ом/м], индуктивностью L [Гн/м], проводимостью утечки G [1/Ом · м] и емкостью C [Ом/м] отрезка линии (трубопровода) единичной длины:

$$Y = G + j\omega C; \quad (3)$$

$$Z = R + j\omega L. \quad (4)$$

Из выражений (1) и (2) для комплексных амплитуд тока и напряжения получаются следующие дифференциальные уравнения

$$\frac{d^2 V(\omega, x)}{dx^2} - \gamma V(\omega, x) = 0; \quad (5)$$

$$\frac{d^2 I(\omega, x)}{dx^2} - \gamma I(\omega, x) = 0, \quad (6)$$

где $\gamma = \sqrt{ZY}$ - коэффициент распространения.

Решение уравнений (5) и (6) может быть записано в виде:

$$V(\omega, x) = Ae^{-\gamma x} + Be^{\gamma x}; \quad (7)$$

$$I(\omega, x) = Ce^{-\gamma x} + De^{\gamma x}, \quad (8)$$

где коэффициенты A, B, C, D определяют из граничных и начальных условий. Члены с положительными и отрицательными показателями степени соответствуют прямой и отраженной компонентам напряжения и тока. Коэффициенты для тока C, D могут быть выражены через коэффициенты для напряжения A, B с помощью уравнения (1), и решение (8) примет вид

$$I(\omega, x) = \frac{\gamma}{Z} (-Ae^{-\gamma x} + Be^{\gamma x}). \quad (9)$$

Вводя характеристическую электропроводность длинной линии $Z_0 = \frac{Z}{\gamma} = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$, получаем

$$I(\omega, x) = -\frac{A}{Z_0} e^{-\gamma x} + \frac{B}{Z_0} e^{\gamma x}. \quad (10)$$

В случае бесконечной линии ток и потенциал не имеют отраженных компонент, и коэффициент A равен значению потенциала в начале линии:

$$V(\omega, x) = V(\omega) e^{-\gamma x}; \quad (11)$$

$$I(\omega, x) = \frac{V(\omega)}{Z_0} e^{-\gamma x}. \quad (12)$$

При проведении измерений на постоянном токе или в области инфранизких частот, таких, что $\omega L \ll R$, $\omega C \ll G$ (приближение постоянного тока), значения C и L можно не учитывать для расчета напряженности $V(x)$ и тока $I(x)$ в трубопроводе. В данном частотном диапазоне напряжение на трубопроводе соответствует понятию потенциала на постоянном токе. Коэффициент распространения и характеристическое сопротивление при указанном приближении равны

$$\gamma = \sqrt{RG}; \quad (13)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R}{G}}. \quad (14)$$

Сопротивление трубы на единице длины R определяется ее удельной проводимостью σ_p , толщиной стенки Δd и внутренним диаметром d_0 :

$$R = \frac{1}{\sigma_p 2\pi d_0 \Delta d}. \quad (15)$$

Сопротивление утечки на единице длины $T = 1/G$ может быть оценено, принимая во внимание, что ток утечки направлен радиально и трубопровод достаточно глубоко погружен, т. е. отражение от земной поверхности не учитывается. Цилиндрический слой изоляции с удельным сопротивлением ρ_{is} включен последовательно со слоем окружающей трубу среды с удельным сопротивлением ρ_m [4, 7, 9]:

$$T = \frac{\rho_{is}}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{\rho_m}{2\pi} \ln \frac{d_3}{d_2}, \quad (16)$$

где: d_1, d_2 - внутренний и наружный диаметры слоя изоляции; d_3 - диаметр цилиндрического слоя окружающей среды, на котором значение потенциала может быть принято равным нулю, в соответствии с заданной точностью (рис. 2).

Следует отметить, что при снижении сопротивления изоляционного слоя за счет его повреждения возрастает влияние удельного сопротивления среды на сопротивление утечки. Для ее оценки в зонах повреждения целесообразно проводить прямые измерения удельного сопротивления окружающих трубопровод пород.

Реальный трубопровод может быть аппроксимирован бесконечной линией, если его длина в несколько раз превышает коэффициент распространения γ и на этом участке нет других источников тока, работающих на одной и той же частоте. Это условие легко выполняется при использовании внешнего генератора переменного тока инфранизкой частоты. При измерениях на постоянном токе следует учитывать влияние всех не-

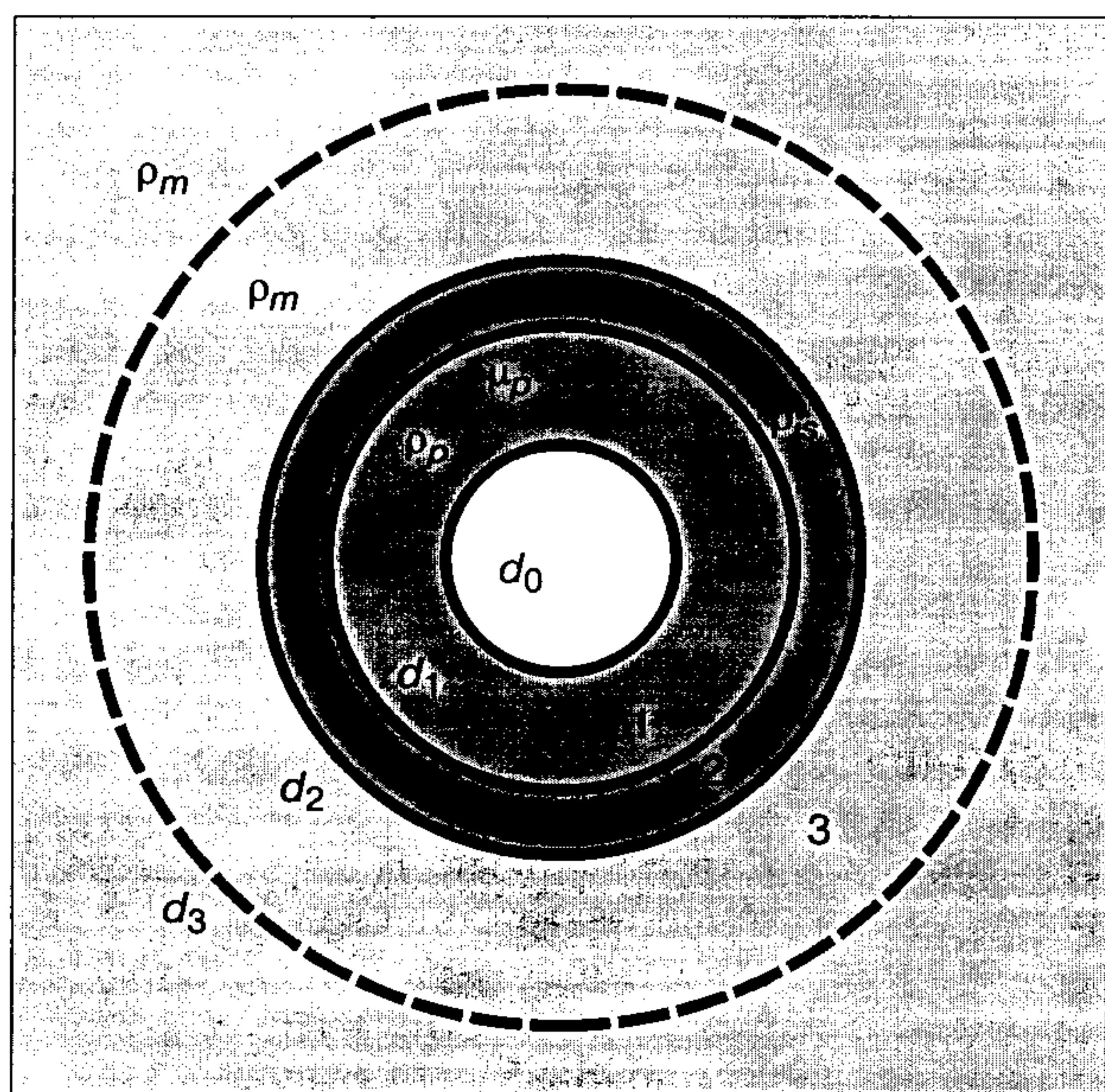


Рис. 2. Параметры трубопровода для аппроксимации длинной линией

отключенных станций катодной защиты. Для поддержания потенциала трубопровода в пределах, требуемых катодной защитой, источники постоянного напряжения должны быть размещены вдоль трубопровода с некоторым шагом. В результате ток будет иметь нулевые значения в некоторых точках ($x = L$) между станциями катодной защиты. Трубопровод на таком интервале L может рассматриваться как длинная линия конечной длины с полным отражением тока от конца ($x = L$). Используя граничные условия для потенциала $V(L)$ и тока $I(L)$ на конце линии

$$Ae^{-\gamma L} + Be^{\gamma L} = V(L); \quad (17)$$

$$Ae^{-\gamma L} + Be^{\gamma L} = 0, \quad (18)$$

выражения (7), (10) можно переписать в следующей форме

$$V(x) = \frac{1}{2} V(L) (e^{\gamma(L-x)} + e^{-\gamma(L-x)}); \quad (19)$$

$$I(x) = \frac{1}{2} \frac{V(L)}{Z_0} (-e^{\gamma(L-x)} + e^{-\gamma(L-x)}). \quad (20)$$

Реальный трубопровод характеризуется параметрами, зависящими от координаты x . Изменения продольного сопротивления связаны с маркой металла, типом труб, их коррозией и уменьшением толщины стенок за счет абразивного действия транспортируемых флюидов. Значения сопротивления утечки варьируют особенно заметно в связи с повреждениями изолирующего слоя в процессе эксплуатации трубопровода. Для расчета распределения напряжения и тока вдоль трубопровода с переменными параметрами использовалась модель неоднородной длинной линии, состоящей из кусочно-однородных интервалов. В пределах каждого интервала i , на котором значения продольного сопротивления R_i и поперечной проводимости G_i предполагаются постоянными,

должны выполняться уравнения (5, 6). Решения данных уравнений для интервала i можно записать в следующем виде

$$V_i(x) = Ae^{-\gamma_i x} + Be^{\gamma_i x}; \quad (21)$$

$$I_i(x) = \frac{\gamma_i}{Z_i} (-A_i e^{-\gamma_i x} + B_i e^{\gamma_i x}), \quad (22)$$

где $\gamma_i = \sqrt{R_i G_i}$ - коэффициент распространения на интервале i .

Неизвестные коэффициенты A_i и B_i находятся из системы уравнений, получаемой на основе условий на границах d_i однородных интервалов i :

$$V_i(d_i) = V_{i+1}(d_{i+1}); \quad (23)$$

$$I_i(d_i) = I_{i+1}(d_{i+1}), \quad (24)$$

на источнике (соответственно для генератора напряжения или тока):

$$V_i(0) = V_0; \quad (25)$$

$$I_i(0) = I_0, \quad (26)$$

на последнем интервале n для конечной или бесконечно длинной линии:

$$V_n(L) = V_L; \quad (27)$$

$$I_n(L) = I_L; \quad (28)$$

$$V_n(x) \rightarrow 0, x \rightarrow \infty; \quad (29)$$

$$I_n(x) \rightarrow 0, x \rightarrow \infty. \quad (30)$$

Расчет магнитного поля над трубопроводом

Магнитное поле, создаваемое током, текущим в трубопроводе, может быть рассчитано на основе закона Био-Савара в предположении, что трубопровод находится в немагнитной среде высокого сопротивления. Если вдоль трубопровода течет меняющийся с расстоянием ток $I(x_p)$, то горизонтальная составляющая магнитного поля H_y , перпендикулярная к оси трубопровода, на земной поверхности в точке $y = 0$, определяется интегралом

$$H_y(x, 0, h) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(x_p) h dx_p}{[h^2 + (x - x_p)^2]^{3/2}}, \quad (31)$$

где h - расстояние от оси трубопровода до земной поверхности; x - пункт измерения магнитного поля.

Используя замену переменных $x - x_p = \tau$, выражение (31) можно переписать как

$$H_y(x, 0, h) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(x - \tau) h d\tau}{(h^2 + \tau^2)^{3/2}}. \quad (32)$$

В случае, когда ток вдоль линии не изменяется и равен I_0 , выражение (32) упрощается и соответствует

широко используемой формуле определения магнитного поля от бесконечно длинного линейного тока:

$$H_y(x, 0, h) = \frac{I_0}{2\pi h}. \quad (33)$$

Для оценки интервал $(-a, a)$, на котором значение магнитной составляющей $H_y(x, 0, h)$ может быть определено с заданной точностью по формуле (33), перейдем к конечным пределам в интеграле (32)

$$H_y(x, 0, h) = \frac{I_0}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{h d\tau}{(h^2 + \tau^2)^{3/2}}, \quad (34)$$

который равен

$$H_y(x, 0, h) = \frac{I_0}{2\pi h} \frac{1}{\sqrt{1 + h^2/a^2}}. \quad (35)$$

Когда отношение $h/a > 1/5$, ошибка вычисления магнитной составляющей $H_y(x, 0, h)$ не превышает 2%.

Приближенное вычисление магнитной составляющей $H_y(x, 0, h)$, созданной постоянным током в бесконечно длинной линии, может быть получено путем преобразования интеграла (32) к конечным пределам и использования для тока выражение (12) при $\omega = 0$:

$$H_y(x, 0, h) = \frac{1}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{V(0) e^{-\gamma(x-\tau)} h d\tau}{R(h^2 + \tau^2)^{3/2}}. \quad (36)$$

Выражение (36) может быть переписано в форме:

$$H_y(x, 0, h) = \frac{1}{4\pi} \frac{V(0)}{R} e^{-\gamma x} \int_{-a}^a \frac{e^{\gamma \tau} h d\tau}{(h^2 + \tau^2)^{3/2}}. \quad (37)$$

Принимая во внимание, что параметр $\gamma a \ll 1$, функция $e^{\gamma \tau}$ может быть записана как $e^{\gamma \tau} = 1 + \gamma \tau$ с точностью до третьего члена ряда Тейлора. В этом случае, преобразовывая (37), получаем:

$$H_y(x, 0, h) = \frac{I(x)}{4\pi} \left(\frac{2}{h} + \int_{-a}^a \frac{\gamma \tau h d\tau}{(h^2 + \tau^2)^{3/2}} \right). \quad (38)$$

Интеграл в выражении (38) равен нулю, и поэтому амплитуда магнитной составляющей $H_y(x, 0, h)$ определяется значением среднего тока на этом интервале. Для линейного изменения тока на интервале интегрирования среднее значение равно току в точке измерения.

$$H_y(x, 0, h) = I(x)/2\pi h. \quad (39)$$

Таким образом, в качестве первого приближения для расчета магнитного поля от изменяющегося вдоль трубопровода тока может быть использовано выражение (33), в котором I_0 заменяется на значение тока $I(x)$ в точке измерения. Однако при значительных вариациях тока на границах кусочно-однородных интервалов, длина которых соответствует нескольким глубинам погружения, а также в точках, близких к началу или концу линии, погрешность в определении магнитного поля на основе (33) может быть довольно значительной. Для точного расчета магнитного поля следует использовать формулу (32).

Моделирование трубопровода с поврежденной изоляцией

На основе приведенного метода решения было проведено моделирование распределений напряжения, тока и магнитного поля для трубопровода с различной степенью повреждения изоляции. Модель трубопровода, состоящего из трех зон с разными сопротивлениями утечки, приведена на рис. 3. В первой зоне предполагается наличие неповрежденной изоляции с сопротивлением утечки $T = 10^4$ Ом·м. Вторая зона представляет часть трубы с сильным разрушением изоляции и характеризуется низким сопротивлением утечки $T = 10^2$ Ом·м. Центр зоны сильного разрушения изоляции находится в точке 250 м, а ширина этой зоны меняется и равна 10, 30 и 100 м. В третьей зоне сопротивление изоляции равно $T = 10^3$ Ом·м и соответствует средней степени повреждения изоляции. Продольное сопротивление трубопровода принималось при расчетах равным $R = 10^{-4}$ Ом/м. В качестве источника постоянного тока использован генератор напряжения, подключенный в точке $X = 0$. Магнитное поле рассчитано на высоте 1 м над осью трубопровода.

Поведение потенциала и тока на всем интервале моделирования (0 - 600 м) в полулогарифмическом масштабе показано на рис. 4. Обращает на себя внимание, что потенциал и ток на данном интервале имеют сходную тенденцию к убыванию.

Кривые потенциала для трех моделей практически совпадают, что говорит об интегральном характере связи потенциала с параметрами утечки. Присутствие зоны сильного повреждения изоляции влияет на абсолютную величину потенциала, который изменяется в пределах 10% при вариации длины второй зоны на порядок. Это объясняется тем, что сопротивление утечки входит лишь в показатель экспоненты через коэффициент распространения (формула 21). В связи с чем изменение сопротивления утечки в аномальной зоне конечной длины слабо влияет на общий характер затухания потенциала.

Распределение тока в отличие от потенциала сильнее отражает изменение параметров зоны сильного нарушения изоляции. На рис. 5, б приведены детальные токовые кривые (для интервала 150 - 350 м). Точки из-

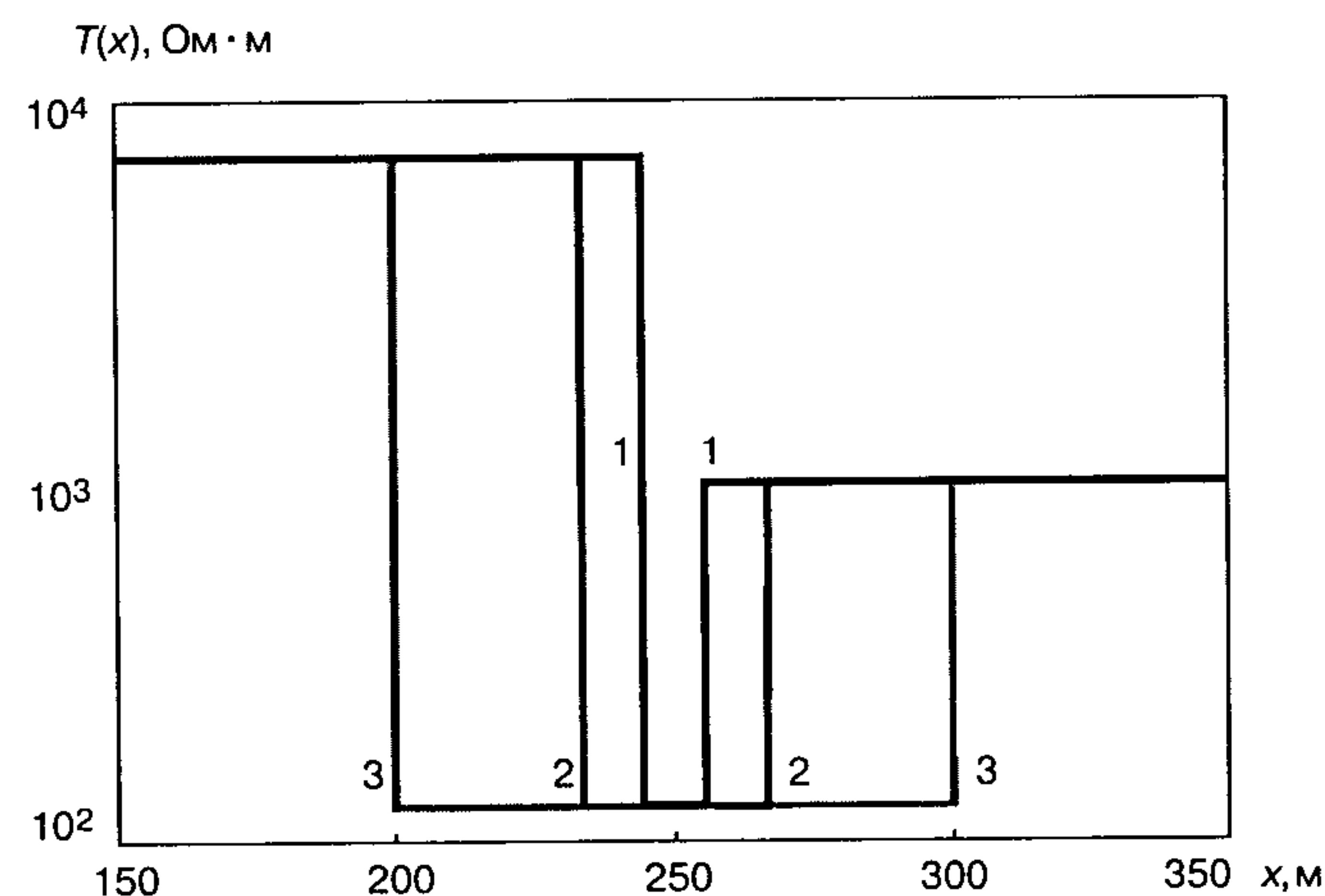


Рис. 3. Модель распределения сопротивления утечки для зоны сильного разрушения изоляции различной длины:

1 - 100 м; 2 - 30 м; 3 - 10 м; центр зоны в точке $X = 250$ м

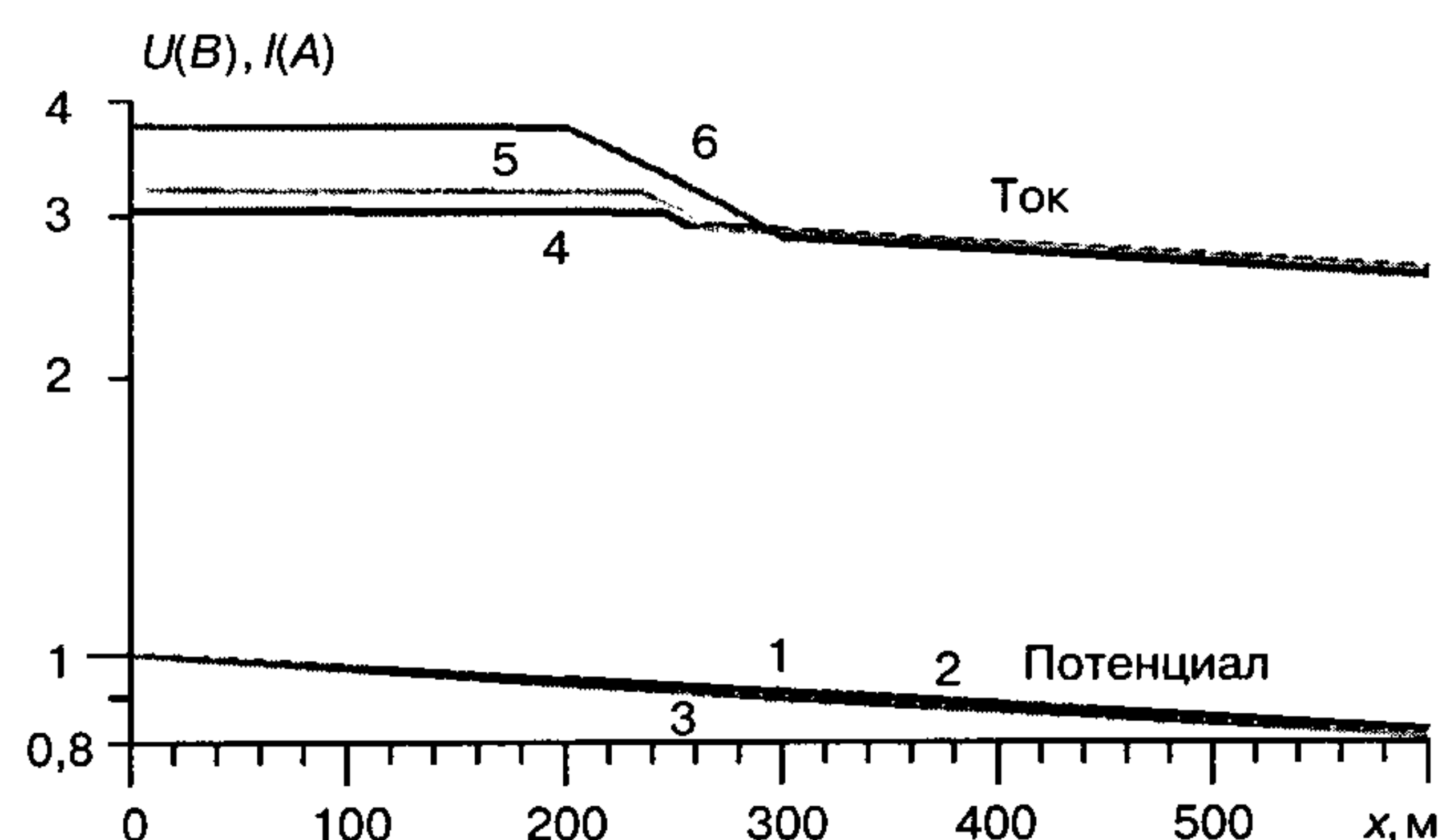


Рис. 4. Распределение потенциала (графики 1, 2, 3) и тока (графики 4, 5, 6) на интервале 0 - 600 м для модели с рис. 3

лома на кривых тока хорошо отражают контакты трех зон с различными сопротивлениями утечки. Аналогичные кривые для потенциала (рис. 5, а) указывают на его слабую чувствительность к локальным изменениям параметров трубопровода.

Ток в неоднородном трубопроводе практически линейно связан с локальными коэффициентами распространения (см. формулу 22) и поэтому при переходе от одной зоны к другой меняется скорость убывания тока (см. рис. 5, б).

Расчет магнитного поля от тока, протекающего в неоднородном трубопроводе (см. рис. 3), был проведен по формуле (32). Поведение горизонтальной компоненты магнитного поля вдоль оси трубопровода подобно распределению тока (см. рис. 5, в).

Ток утечки (рис. 6) является кусочно-непрерывной функцией, разрывы которой определяются изменениями сопротивления утечки T и представляются нам наиболее адекватной характеристикой для выделения зон и оценки относительного изменения сопротивления утечки.

Ток утечки $\Delta I_i(x)$ для однородной линии, согласно формуле (22),

$$\Delta I_i(x) = \frac{\gamma_i^2}{Z_i} (A_i e^{-\gamma_i x} + B_i e^{\gamma_i x}), \quad (40)$$

где $\gamma_i^2/Z_i = 1/T_i$.

Для неоднородного трубопровода с переменными параметрами отношение потенциала (21) к току утечки (40) (на основании уравнения 3) соответствует сопротивлению утечки на интервале определения разности токов

$$T_i(x) = V_i(x)/\Delta I_i(x). \quad (41)$$

Отсюда следует, что можно получить высокое разрешение в определении сопротивления утечки, которое фактически ограничивается точностью определения разности токов по магнитному полю. Необходимо отметить, что измеряемое магнитное поле сглаживает изменения тока в зависимости от глубины.

Распределение относительного тока утечки, определяемого по результатам измерений как отношение тока утечки к току, в некоторых случаях может быть использовано как интерпретационный параметр, содержащий

информацию о сопротивлении утечки. Однако относительный ток утечки является функцией коэффициентов A_i , B_i на границах однородных участков (коэффициентов отражений) и расстояния x :

$$\frac{\Delta I_i(x)}{I_i(x)} = \gamma_i \frac{A_i e^{-\gamma_i x} + B_i e^{\gamma_i x}}{-A_i e^{-\gamma_i x} + B_i e^{\gamma_i x}}. \quad (42)$$

Даже в случае, когда трубопровод может быть аппроксимирован однородной линией, это отношение, характеризующееся коэффициентом распространения, имеет меньшую чувствительность к сопротивлению утечки, т. к. зависит от сопротивления утечки как квадратный корень, и, кроме того, связано с продольным сопротивлением трубопровода.

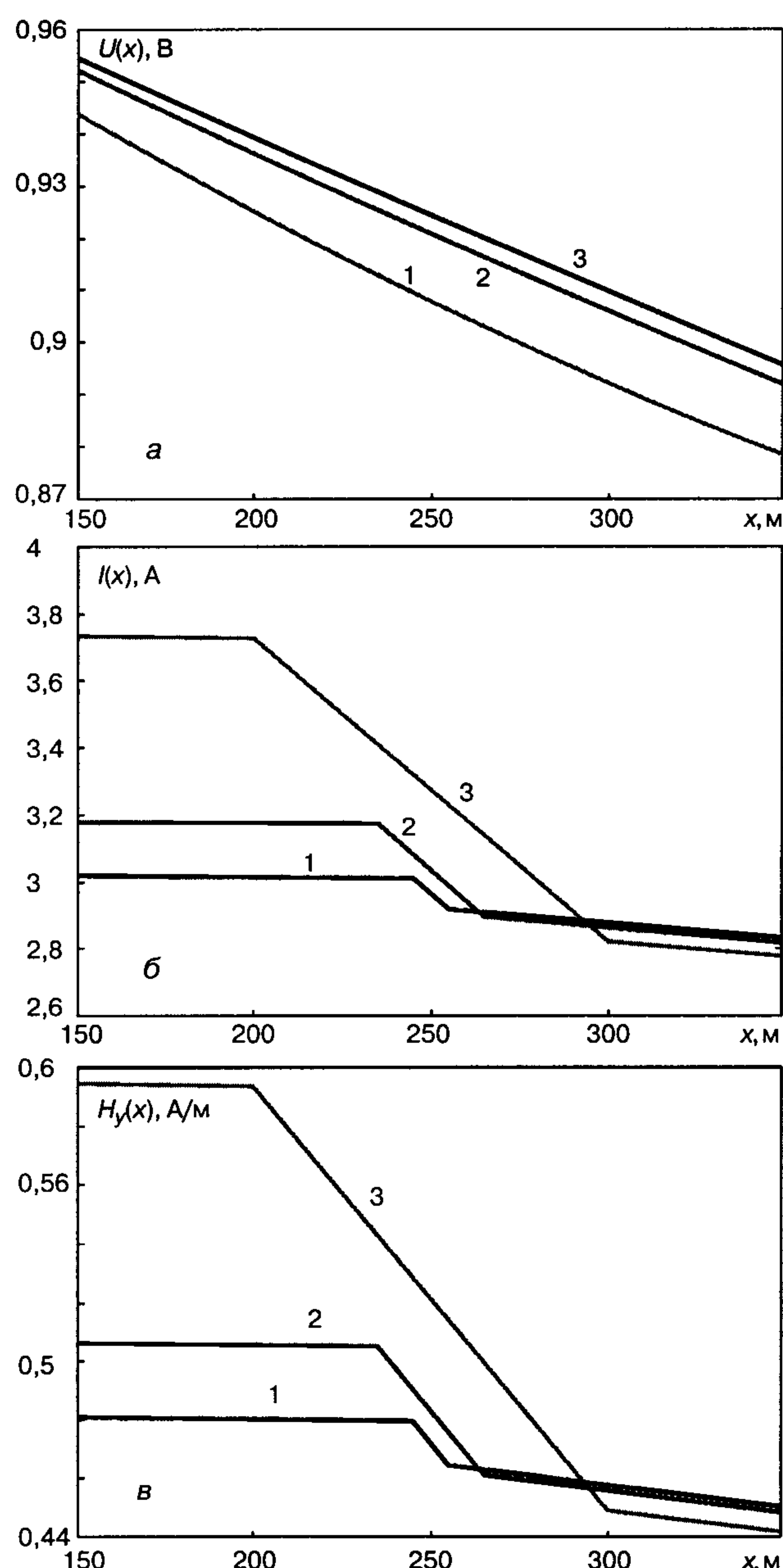


Рис. 5. Распределение потенциала (а), тока (б) и магнитного поля (в) для модели с рис. 3 на участке 150 - 350 м

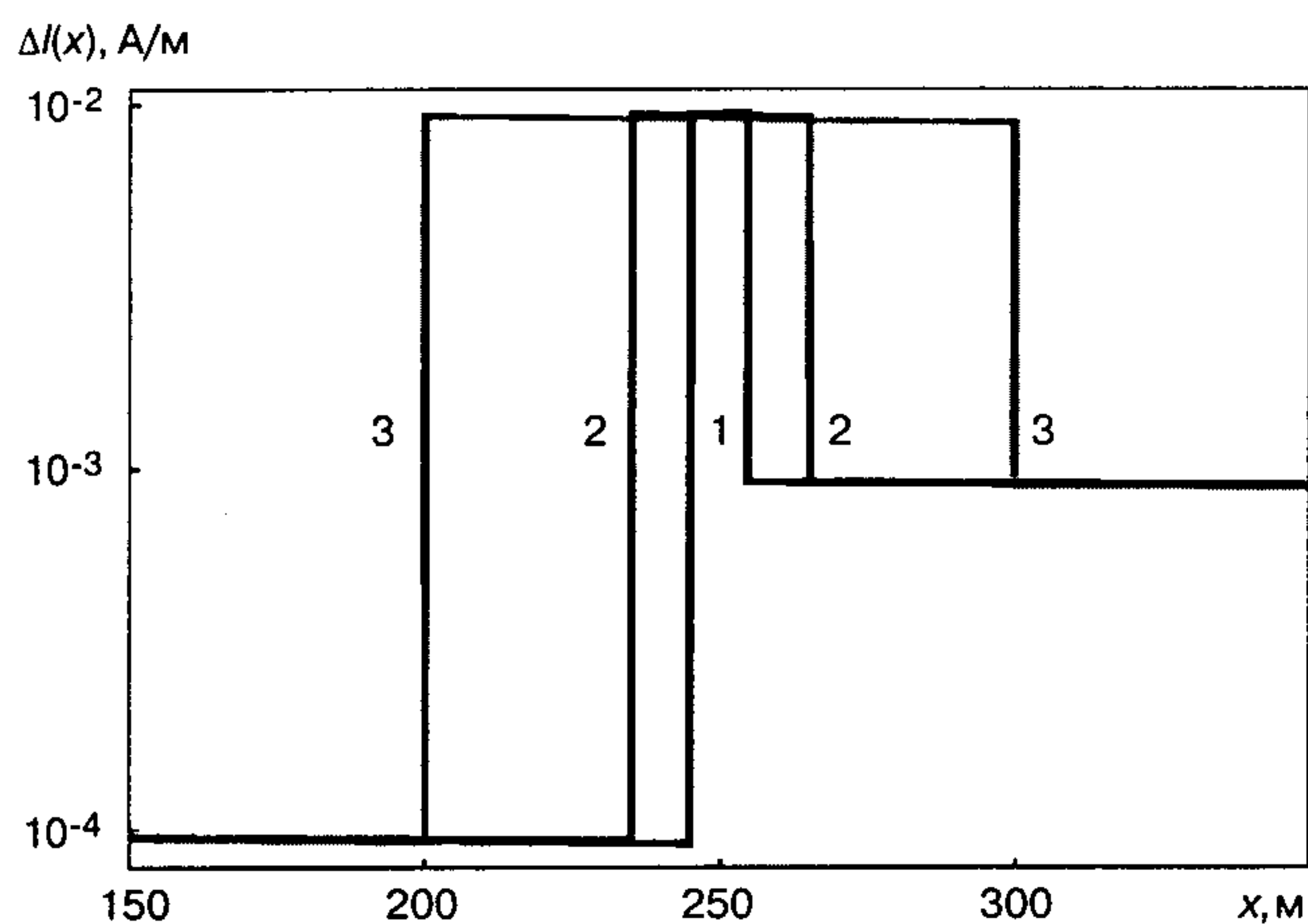


Рис. 6. Графики тока утечки для модели с рис. 3

Фактически отсюда вытекают требования дополнить измерения тока измерениями потенциала, т. к. только в этом случае достигается количественная оценка сопротивления утечки (формула 41) при одновременно высокой локальности.

Распределение потенциала, учитывая его интегральный характер изменения вдоль трубопровода, может быть найдено по его измерениям в 1 - 2 точках. На рис. 7 (см. цвет. вкл.) приведен пример восстановления потенциала по его значению в точке $x = 500$ и использования эффективного значения коэффициента распространения. Эффективный коэффициент распространения определяется на заданном интервале по кривой тока и равен истинному коэффициенту распространения для однородного трубопровода. Восстановленные значения потенциала (кривые 4 - 6) отличаются от истинных (кривые 1 - 3) даже в самом плохом случае не более чем на 18,5%. С нашей точки зрения, такая точность определения потенциала, а следовательно, и сопротивления утечки удовлетворяет техническим требованиям к определению степени нарушения изоляции трубопровода.

Полученные основные закономерности в приближении постоянного тока остаются справедливыми и при использовании переменного тока в низкочастотном диапазоне, в котором измерения магнитного поля могут проводиться индукционными антеннами. Если для рабочей частоты ω выполняются условия $\omega L \gg R$ и $\omega C \ll G$ (т. е. емкостной частью комплексной проводимости утечки можно пренебречь), то следует учесть влияние индуктивности (магнитной проницаемости) трубопровода и изменение его активного сопротивления, связанное с появлением скин-эффекта [12]. Учет этих параметров отражается на продольной проводимости трубопровода и коэффициенте распространения. Это, в свою очередь, приводит к увеличению затухания напряжения, тока и магнитного поля вдоль трубопровода и не отражается на оценке сопротивления утечки - формула (41).

Экспериментальные исследования

Полевые наблюдения на трубопроводе проводились с аппаратурой ЭРА, предназначенной для исследований геоэлектрическими методами и измерений магнитного поля. Для возбуждения магнитного поля применялся внешний генератор тока, который подключался между контрольным выводом катодной защиты и элек-

тродом, заземленным на расстоянии 5 м от трубы. Рабочий ток генератора - 100 мА, частота - 625 Гц. Горизонтальная компонента переменного магнитного поля, перпендикулярная к оси трубопровода, измерялась с помощью индукционной магнитной антенны с чувствительностью 10 мВ/(мА/м).

Измерения проводились на профилях, перпендикулярных к оси трубопровода, с шагом 0,5 м. Расстояние между профилями - 25 м.

Полученные данные обрабатывались по следующей методике:

- 1) построение и анализ карт горизонтальной компоненты магнитного поля;
- 2) корреляция аномалий и определение оси трубопровода (группы трубопроводов);
- 3) определение глубины трубопровода и протекающего в нем тока;
- 4) оценка кажущегося коэффициента распространения γ_a и восстановление распределения потенциала;
- 5) вычисление тока утечки (разности тока вдоль оси трубопровода) и оценка сопротивления утечки;
- 6) выделение участков трубопроводов с различной степенью повреждения изоляции.

Обработка данных магнитных измерений для оценки степени нарушения изоляции на основе определения токов и сопротивления утечки иллюстрируется на рис. 8 (см. цвет. вкл.).

Траектория оси группы трубопроводов (красная пунктирная линия на рис. 8, а) прослеживается по карте горизонтальной магнитной компоненты, полученной при подсоединении генератора к контрольному выводу, находящемуся в точке $X = 0$. На интервале пикетов -25...-100 отмечаются осложнения в распределении магнитного поля, которые связаны с пересечением изучаемой группы трубопроводов с другим протяженным проводящим объектом (черная пунктирная линия на рис. 8, а).

По профилям горизонтальной магнитной компоненты определялись глубина трубопровода и протекающий в нем ток. Глубины оси группы трубопроводов слева и справа от источника тока (рис. 8, в) существенно различаются, что объясняется конструктивными особенностями и качеством подсоединения трубопроводов к общей системе катодной защиты.

Значения магнитного поля (рис. 8, б), измеряемые вблизи источника (пункты (-5) и 20), понижены за счет того, что токи из точки подключения генератора растекаются в противоположных направлениях. Восстановленные значения тока указаны пунктиром на рис. 8, г. Сумма растекающихся токов практически равна току возбуждения (100 мА). С использованием распределения токов вдоль трубопроводов были получены значения кажущегося коэффициента распространения γ_a , которые соответствуют истинным, если импеданс проводимости и сопротивление утечки вдоль трубопровода постоянны. Для токов, распространяющихся в сторону положительных и отрицательных пикетов, кажущиеся коэффициенты распространения соответствуют: $\gamma_a = 1,7 \cdot 10^{-3}$ и $\gamma_a = 1,1 \cdot 10^{-3}$. Разность токов вдоль трубопровода, являющаяся током утечки в окружающую среду, приведена на рис. 8, д.

С использованием измеренного значения напряжения $V(\omega, x)$ на ближайших контрольных пунктах катодной защиты ($V(-500) = 5,4$ мВ, $V(500) = 3,3$ мВ) и

кажущихся коэффициентов распространения восстановлено распределение напряжения вдоль трубопровода. На основе восстановленного напряжения и полученного тока утечки мы рассчитали сопротивление утечки вдоль трубопровода (рис. 8, е).

Значения сопротивления утечки, превышающие $0,8 - 1 \text{ кОм} \cdot \text{м}$, соответствуют удовлетворительному состоянию изоляции, учитывая, что несколько трубопроводов в группе соединены параллельно. Интервалы трубопроводов с пониженными значениями сопротивления утечки - от $800 \text{ до } 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - характеризуются поврежденной в разной степени изоляцией. Значения сопротивлений менее $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ означают высокую степень повреждения изоляции. В таких зонах с большой вероятностью возможно развитие коррозионных процессов. Интервалы трубопроводов с разрушенной изоляцией выделяются как наиболее опасные участки с точки зрения утечек транспортируемых нефтепродуктов. Следует отметить, что полученные оценки сопротивления утечки являются усредненными на интервале 25 м между профилями наблюдения.

Заключение

Предложена аппроксимация металлического трубопровода с изменяющейся по качеству изоляцией длинной неоднородной линией с переменными параметрами, которая позволяет получить аналитическое решение для расчета распределения напряжения и тока вдоль трубопровода.

Приведены примеры моделирования магнитного поля с учетом изменения тока вдоль неоднородной линии над трубопроводами с участками различной степени повреждения изоляции.

На основе разработанного подхода усовершенствована технология полевых наблюдений и разработана методика интерпретации данных магнитного поля над трубопроводами. Предложенный алгоритм интерпретации обеспечивает количественное определение сопротивления утечки вдоль трубопровода и выделение зон различной степени нарушения изоляции.

Результаты экспериментального изучения состояния трубопроводов в пределах урбанизированной зоны города Мехико позволили получить ряд практически важных выводов об участках нарушения изоляции. Приведенные результаты являются подтверждением работоспособности и эффективности предложенных теоретических и методических разработок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альпин Л. М., 1939, Способ электрического каротажа обсаженных скважин: А. с. N 56026, 30.11.1939, приоритет от 20.02.1937.
2. Альпин Л. М., 1962, Дивергентный каротаж: Прикладная геофизика, **32**, 192 - 212.
3. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности, 1999, под ред. Шевнина В. А. и Модина И. Н.: Изд. РУССО.
4. Дахнов В. Н., 1981, Электрические и магнитные методы исследования скважин: М., Недра.
5. Заборовский А. И., 1963, Электроразведка: М., Гостоптехиздат.
6. Иванов В. Т., Спиридонов А. В., 1982, Решение задачи о распределении тока на трубопроводе с неоднородной изоляцией. Известия вузов, Электромеханика, **2**, 151 - 157.

7. Gorbachev Y. I., 1995, Well Logging. Fundamentals of methods: John Wiley and sons.

8. Kaufman A. A. and Wightman W. E., 1993, A transmission - line model for electrical logging through casing: Geophysics, **58**, **12**, 1739 - 1747.

9. Kaufman A. A., 1990, The electrical field in a borehole with a casing: Geophysics, **55**, **1**, 29 - 38.

10. Morgan J., 1993, Cathodic Protection: NACE publication.

11. Mousatov A., Nakamura E., 2001, Transmission-line approximation of pipelines with cathodic protection: SAGEEP-2001 Proceedings, Denver, Co. 7 p.

12. Mousatov A., Nakamura E., Shevnin V., Delgado O., 2002, Application of electromagnetic methods for estimation of technical conditions of oil and gas pipelines in Mexico: SAGEEP-2002 Proceedings, Las Vegas, 9 p.

13. Pipeline Current Mapper. User Guide. Radiodetection Ltd. www.radiodetection.com.

ОБ АВТОРАХ



**Александр Андрианович
МУСАТОВ**

Окончил МГУ им. Ломоносова в 1973 г. Научный сотрудник Мексиканского нефтяного института, кандидат геол.-мин. наук. Область научных интересов - теория, методика и техника электромагнитных методов каротажа нефтяных скважин и инженерно-геофизических исследований.



**Лабастида Эдгар Киеши
НАКАМУРА**

Сотрудник Мексиканского нефтяного института. В 1997 г. окончил Национальный мексиканский политехнический институт. Занимается разработкой высокоточной мультисканальной аппаратуры для геофизических исследований в скважинах, инспекции трубопроводов и выделения зон нефтяного загрязнения.



**Владимир Алексеевич
ШЕВНИН**

Окончил геологический факультет МГУ в 1970 г., доктор физ.-мат. наук, профессор геологического факультета МГУ. Область научных интересов - теория, программное обеспечение, методика и интерпретация данных метода сопротивлений, применение электроразведки для решения малоуглубинных задач. Автор 140 публикаций.

К статье "Выделение слабоконсолидированных терригенных коллекторов и определение фильтрационно-емкостных свойств по их акустическому импедансу"

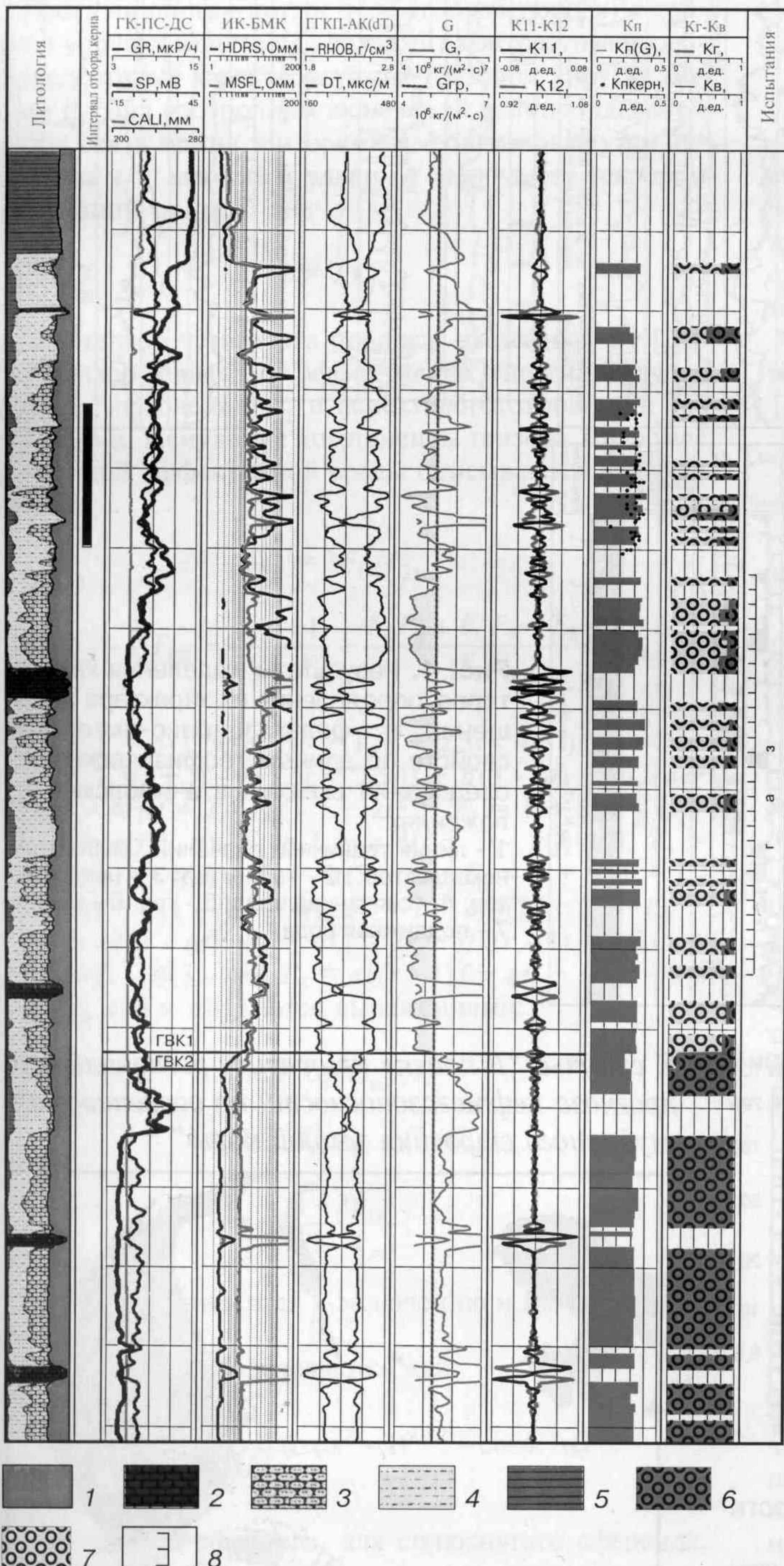


Рис. 2. Геолого-геофизическая характеристика терригенных слабоконсолидированных отложений:

1 - K_p ; 2 - известняки; 3 - песчаники; 4 - алевролиты; 5 - глины; 6 - вода; 7 - газ; 8 - интервал перфорации

К статье "Аппроксимация трубопровода длинной линией для оценки его технического состояния"

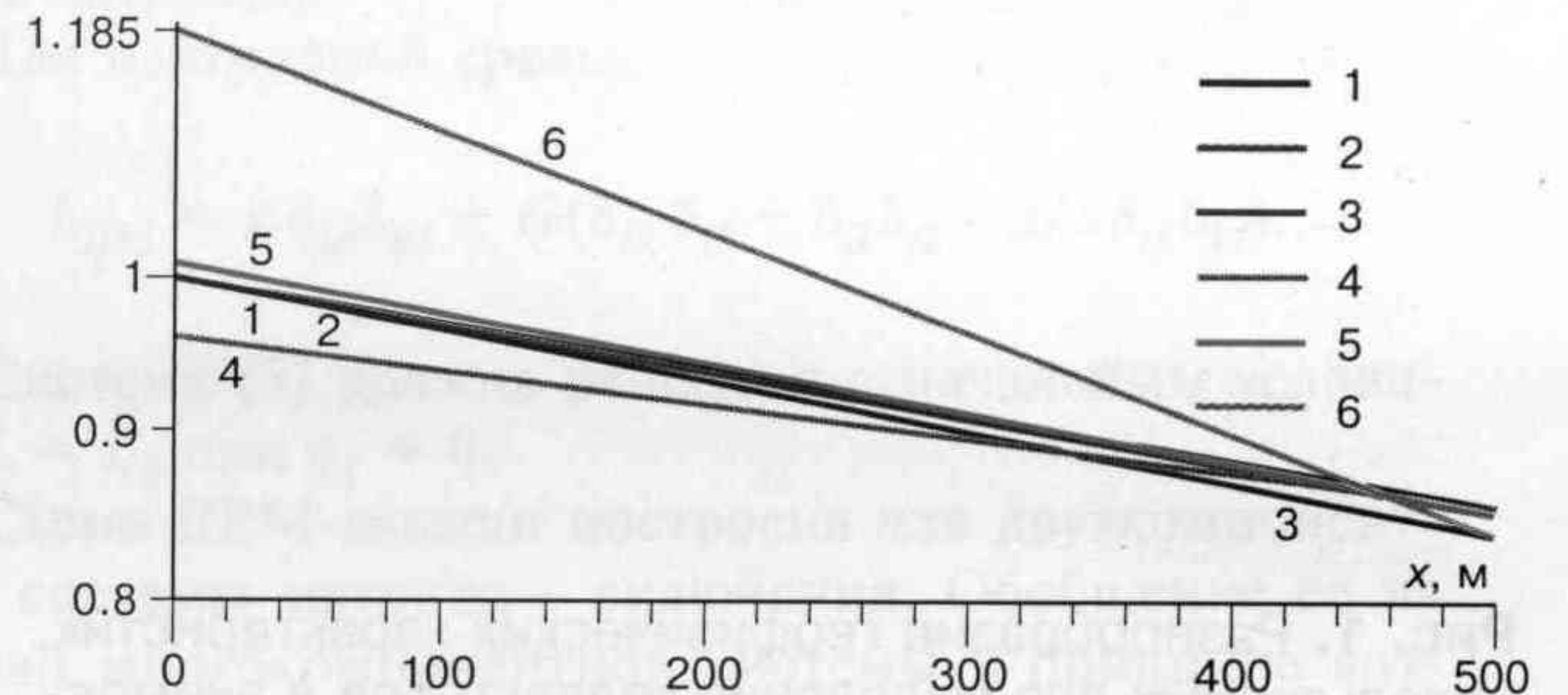


Рис. 7. Графики потенциала, восстановленного по значению в точке 500 м с использованием коэффициента гамма от тока (для модели с рис. 3): см. пояснения в тексте

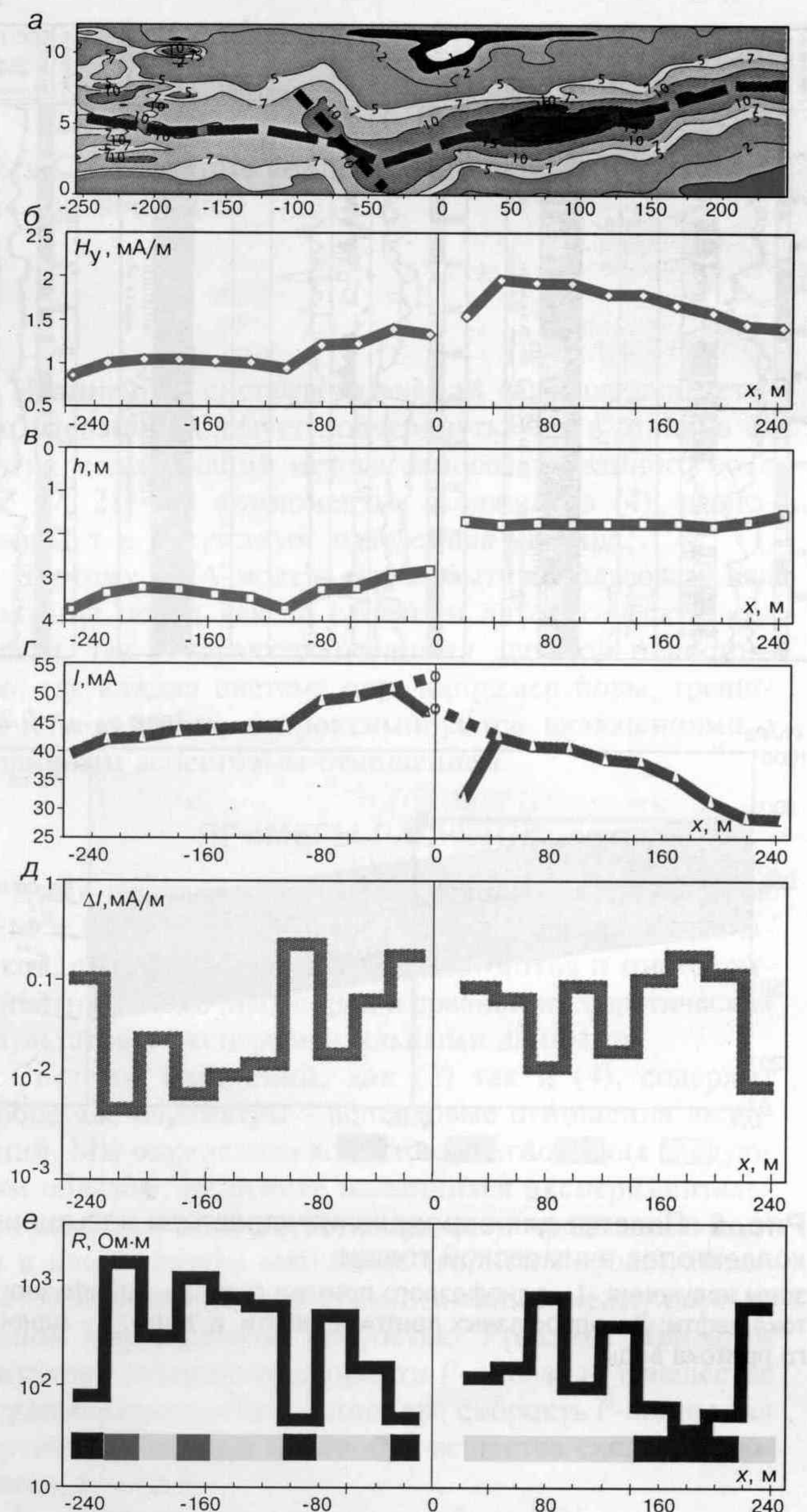


Рис. 8. Оценка сопротивления утечки по распределению магнитного поля:

а - карта наблюденного магнитного поля; б - профиль магнитного поля вдоль оси трубопровода; в - глубина трубопровода; г - ток в трубопроводе; д - ток утечки; е - сопротивление утечки