

Павел Леонидович БЕЛОУСОВ —  
доцент кафедры информационных  
систем, к. т. н.

УДК 622.276.6

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УДАЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА ОТ ОБСАДНОЙ КОЛОННЫ

**АННОТАЦИЯ.** Дается определение оптимального удаления электрода от обсадной колонны, при котором обсадные колонны слабо влияют на растекание тока между электродами, что необходимо для сосредоточения максимального количества электроэнергии в зоне продуктивного пласта. Оптимальное удаление определяется на модели электротехнического комплекса, основой которой является электрический диполь, образованный электродами.

*The author offers a definition for the optimum removal of an electrode from the casing at that the casings do not effect sufficiently upon current spreading between electrodes which is necessary for concentration of maximum amount of electric power in a producing formation zone. The optimum removal is determined upon a model of an electrotechnical complex and the basis of this model is an electric dipole formed by electrodes.*

В статье [1] рассматривались теоретические основы метода электровоздействия на продуктивный нефтяной пласт электрическим полем нулевой частоты, а в статье [2] — электротехнический комплекс, осуществляющий этот метод. В статье [3] был проведен анализ работы электротехнического комплекса на модели. Естественно желание повысить эффективность работы описанного электротехнического комплекса, для чего необходимо сосредоточить максимальное количество электрической энергии в зоне продуктивного пласта.

Для проведения анализа распределения электрической энергии была составлена эквивалентная электрическая схема подземной части установки [3]. После проведения анализа и преобразований исходная схема была сведена к результирующей, которая изображена на рис. 1.

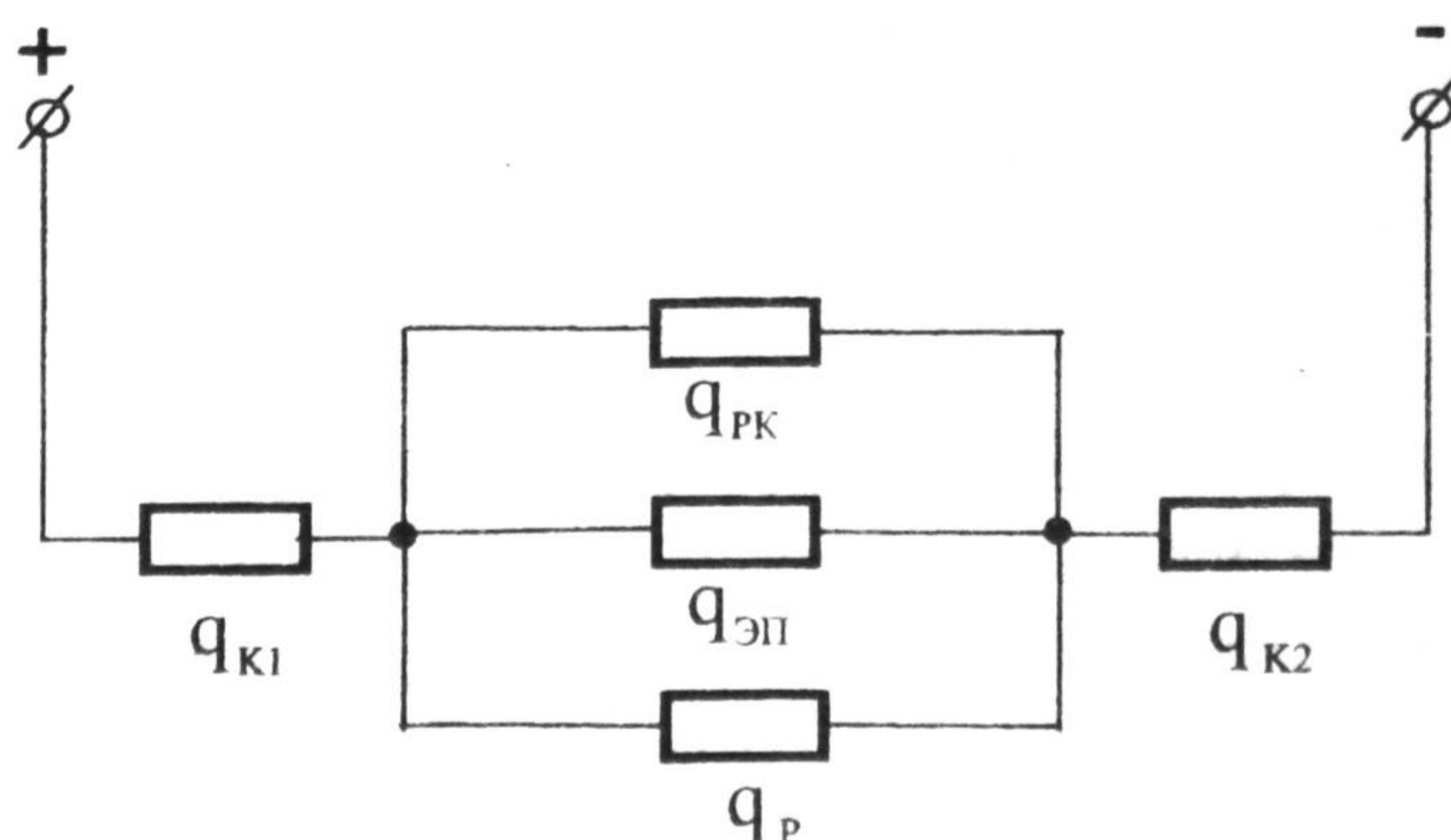


Рис. 1. Результирующая электрическая схема

На этой схеме символами  $q_{к1}$  и  $q_{к2}$  представлены проводимости электрических кабелей, подающих электрическую энергию от источника, находящегося-



ся на поверхности, к электродам установки, находящимся на забоях двух скважин, причем одна скважина продуктивная, а другая — нагнетательная. Символами  $q_{PK}$ ,  $q_{ЭП}$ ,  $q_P$  обозначены проводимости, характеризующие растекание тока между электродами. Через проводимость протекает  $q_{PK}$  часть тока электродов, которая замыкается на металлические обсадные колонны скважин. Проводимость продуктивного пласта —  $q_{ЭП}$ . Через проводимость  $q_P$  протекает часть тока электродов, рассеиваемая через кровлю и подошву пласта, минуя обсадные колонны скважин.

Общая проводимость между электродами выражается известной формулой для параллельного соединения проводимостей

$$q_{Э} = q_{PK} + q_{ЭП} + q_P.$$

Приведенное выражение показывает, что при уменьшении составляющих  $q_{PK}$  и  $q_P$  эффективность использования электрической энергии возрастает. Значит, увеличивается и эффективность электровоздействия.

При уменьшении расстояния между электродом и обсадной колонной возрастает  $q_{PK}$ , что в пределе (при касании обсадных колонн и электродов) дает равенство  $q_{PK} = q_K$  (здесь  $q_K$  — проводимость обсадных колонн скважин). А это значит (т. к.  $q_K$  очень велико [3]), что по продуктивному пласту ток практически не потечет и электровоздействие будет мизерным.

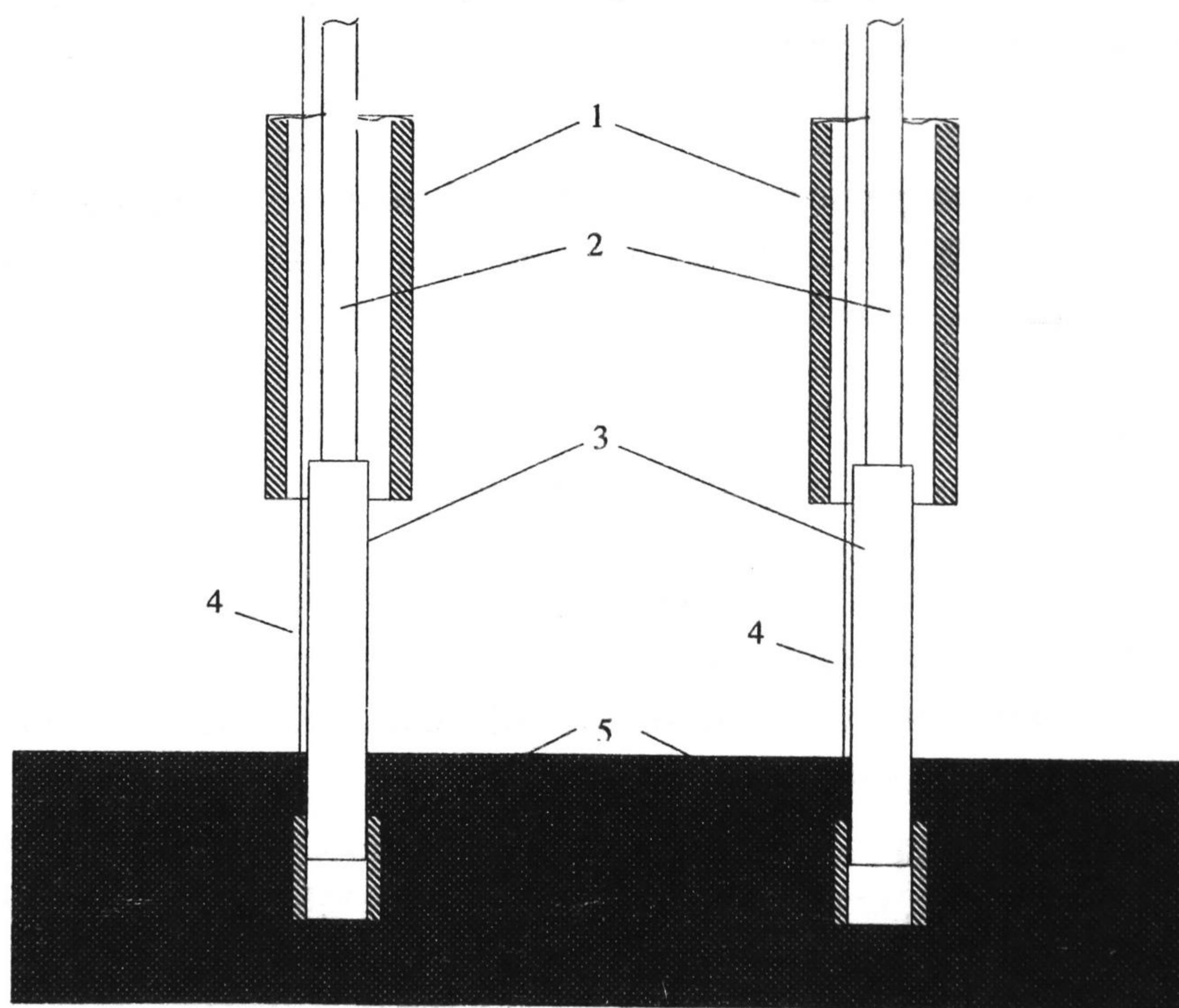


Рис. 2. Схема электровоздействия на продуктивный пласт

Отсюда вытекает, что для осуществления метода электровоздействия необходимо изолировать электроды продуктивной и нагнетательной скважин от обсадных колонн и колонн насосно-компрессорных труб. Поэтому забой скважины не обсаживается, производится вначале цементирование забоя, затем бурение бетона в зоне забоя. На рис. 2 зона забоя обозначена пунктирными линиями. Задача изоляции обсадной колонны 1 и колонны насосно-компрессорных труб 2 от продуктивного пласта решается не только применением необсаженного забоя, но также применением изоляционных труб 3, соединяющих электрод 5 с насосно-компрессорными трубами.



Зона изоляции определяется от обсадной колонны скважины до электрода. Причем чем больше длина этой зоны, тем меньшая составляющая тока электрода замыкается на обсадную колонну. С другой стороны, приходится удлинять зону цементирования и удлинять изоляционные трубы, что нежелательно по причине снижения надежности крепления электрода к колонне насосно-компрессорных труб и механической прочности призабойной зоны продуктивного пласта.

Замыкание тока на колонну происходит по причине низкого электрического сопротивления материала обсадных колонн (сталь). В табл. 1 для сопоставления приведены значения удельного сопротивления пород продуктивного пласта, а также материалов кровли и подошвы пласта по скважинам Усть-Балыкского месторождения (Пласт БС 10) где проводились испытания электротехнического комплекса. Удельное сопротивление стали  $\rho = (1 \div 1,37) \cdot \text{Ом}\cdot\text{м}$ .

Таблица 1

Обработка промыслово-геофизических данных по скважинам Усть-Балыкского месторождения. Пласт БС 10.

№ скв.	Интервал	H (м)	$\rho$ (Ом·м)	Характер насыщения
81	2325,2 — 2334	8,8	4,7	Глина
81	2334 — 2338	4	11,2	Плотный
81	2341,2 — 2343,2	2	11	Нефть
83	2322 — 2333,2	11,2	4,3	Глина
83	2336 — 2337,2	1,2	12	Нефть
83	2339,2 — 2345,2	6	6,31	Вода
79	2341 — 2360	19	5,8	Глина
79	2361,2 — 2364,8	3,6	21,6	Нефть
79	2371,2 — 2375,8	4,6	4,6	Вода

При применении метода электровоздействия необходимо сосредоточить (канализировать) электрический ток между электродами в зоне продуктивного пласта. Руководствуясь вышеописанными соображениями, ставится задача определения оптимальной длины изоляционной зоны или, другими словами, оптимального удаления электродов от обсадных колонн скважин, при котором обсадные колонны слабо влияют на растекание тока между электродами.

Для построения модели подземной части электротехнического комплекса воспользуемся аналогией между полем в проводящей среде и электростатическим полем [4]. При этом задача определения оптимального удаления электродов от обсадных колонн сводится к определению потенциала в поле заданных зарядов, сосредоточенных на электродах.

Модель подземной части электротехнического комплекса представлена на рис. 3. При наличии одного электрода [4]

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_s} \cdot \int \frac{\sigma dS}{m} \quad (1)$$



Здесь  $U$  — потенциал результирующего поля в рассматриваемой точке,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость окружающей среды,  $\sigma$  — поверхностная плотность заряда,  $dS$  — элемент поверхности электрода,  $m$  — расстояние рассматриваемой точки поля до  $dS$ . Интегрирование распространяется по всей заряженной поверхности электрода.

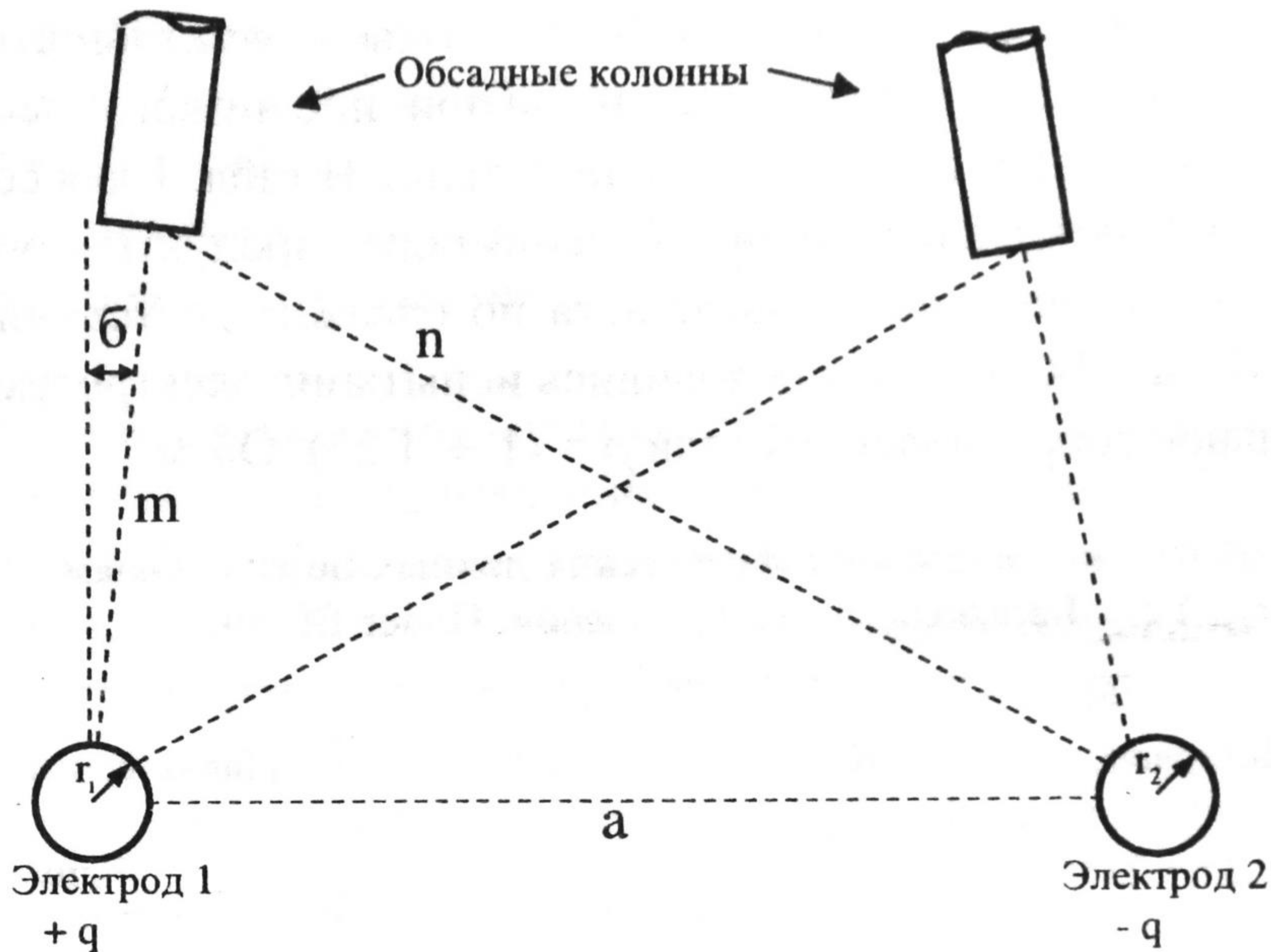


Рис. 3. Модель подземной части электротехнического комплекса

Так как имеется два электрода с зарядами различных знаков, то, согласно принципу наложения электрических полей,

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \left( \int_S \frac{\sigma_1 dS_1}{m_1} - \int_S \frac{\sigma_2 dS_2}{m_2} \right). \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_1, dS_1, \sigma_2, dS_2$  — поверхностные плотности зарядов, элементы поверхности соответственно первого и второго электродов.

Как показывает выражение (2), для определения в общем виде потенциала поля необходимо знать изменение плотности зарядов по поверхности электродов. Для упрощения задачи представим стержневые электроды эквивалентными шаровыми, что правомерно при большом удалении рассматриваемой точки поля от электродов. Условием для преобразования является равенство токов растекания исходного и эквивалентного шарового электродов.

Сосредоточив заряды шаров — электродов в двух точках, совпадающих с центрами шаров, получим электрический диполь, потенциал в некоторой точке поля которого есть [4]

$$U = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \left( \frac{n - m}{n \cdot m} \right), \quad (3)$$

где  $m$  — расстояние точки поля до ближайшего заряда;  $n$  — расстояние точки поля до удаленного заряда. Рассматриваем в качестве ближайшего заряда положительный (рис. 3).

Пусть рассматриваемая точка поля имеет те же координаты, что и точка, находящаяся на конце (металлическом) одной из обсадных колонн (рис. 3).

Обозначим  $U_0$  — напряжение поверхности электрода. Определим соотношение  $U/U_0 = k$ , подставив



$$U_3 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon \cdot r},$$

при  $r_1 = r_2 = r$ , получим следующее выражение

$$k = \left( \frac{n - m}{n \cdot m} \right) \cdot r \quad (4)$$

По рис. 3 определяем

$$n^2 = (a - m \cdot \text{Sin}\alpha)^2 + m^2 \cdot \text{Cos}^2\alpha \quad (5)$$

Здесь  $a$  — расстояние между зарядами,  $\alpha$  — угол отклонения обсадной колонны от вертикали.

После подстановки (4) в (5) и преобразований получим

$$m^4 + bm^3 + cm^2 + pm + e = 0, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} b &= -2a \cdot \text{Sin}\alpha - 2\frac{r}{k}; \\ c &= a^2 + 4a\frac{r}{k} \cdot \text{Sin}\alpha; \\ p &= -2\frac{a^2r}{k} - 2\frac{a \cdot r^2}{k^2} \cdot \text{Sin}\alpha; \\ e &= \frac{a^2 \cdot r^2}{k^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Решение уравнения четвертой степени (6) при подстановке исходных значений дает искомое значение  $m$  — минимального расстояния от электрода до обсадной колонны, при котором  $q_B \gg q_{PK}$ . Решение уравнения проводилось методом касательных (метод Ньютона) [5] по формуле

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (8)$$

Здесь  $x_i$  — предыдущее приближенное значение корня уравнения,  $x_{i+1}$  — последующее приближенное значение корня уравнения,  $f(x_i)$  — значение исходной функции от  $x_i$ ,  $f'(x_i)$  — значение производной функции  $f(x_i)$  от  $x_i$ .

Для уравнения (6)

$$m_{i+1} = m_i - \frac{m_i^4 + bm_i^3 + cm_i^2 + pm_i + e}{4m_i^3 + 3bm_i^2 + 2cm_i + p} \quad (9)$$

Вычисления проводились на персональном компьютере, в среде Excel. Результаты вычислений представлены на рис. 4, 5 и табл. 2.

Величина оптимального удаления электрода от конца обсадной колонны показана на рис. 4 в зависимости от размеров электрода, на рисунке 5 — от удаления электродов друг от друга, в табл. 2 — от угла наклона скважины.

Так как наклон скважины при достаточном удалении электродов друг от друга слабо влияет на величину  $m$ , что показывает табл. 2, то при подавляю-



щем большинстве практических ситуаций с достаточной степенью точности можно принимать  $\alpha = 0$ .

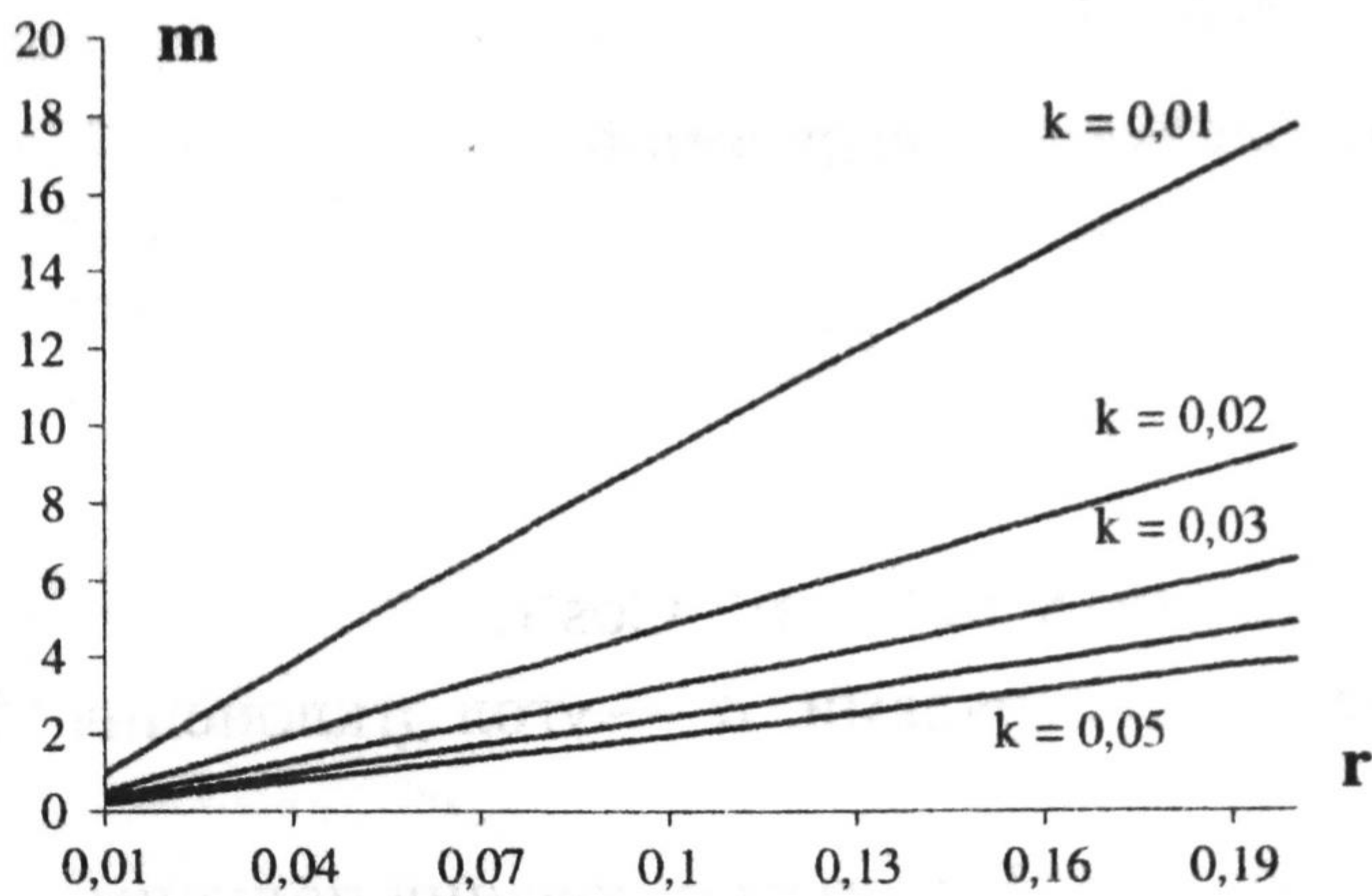


Рис. 4. Влияние размеров электродов

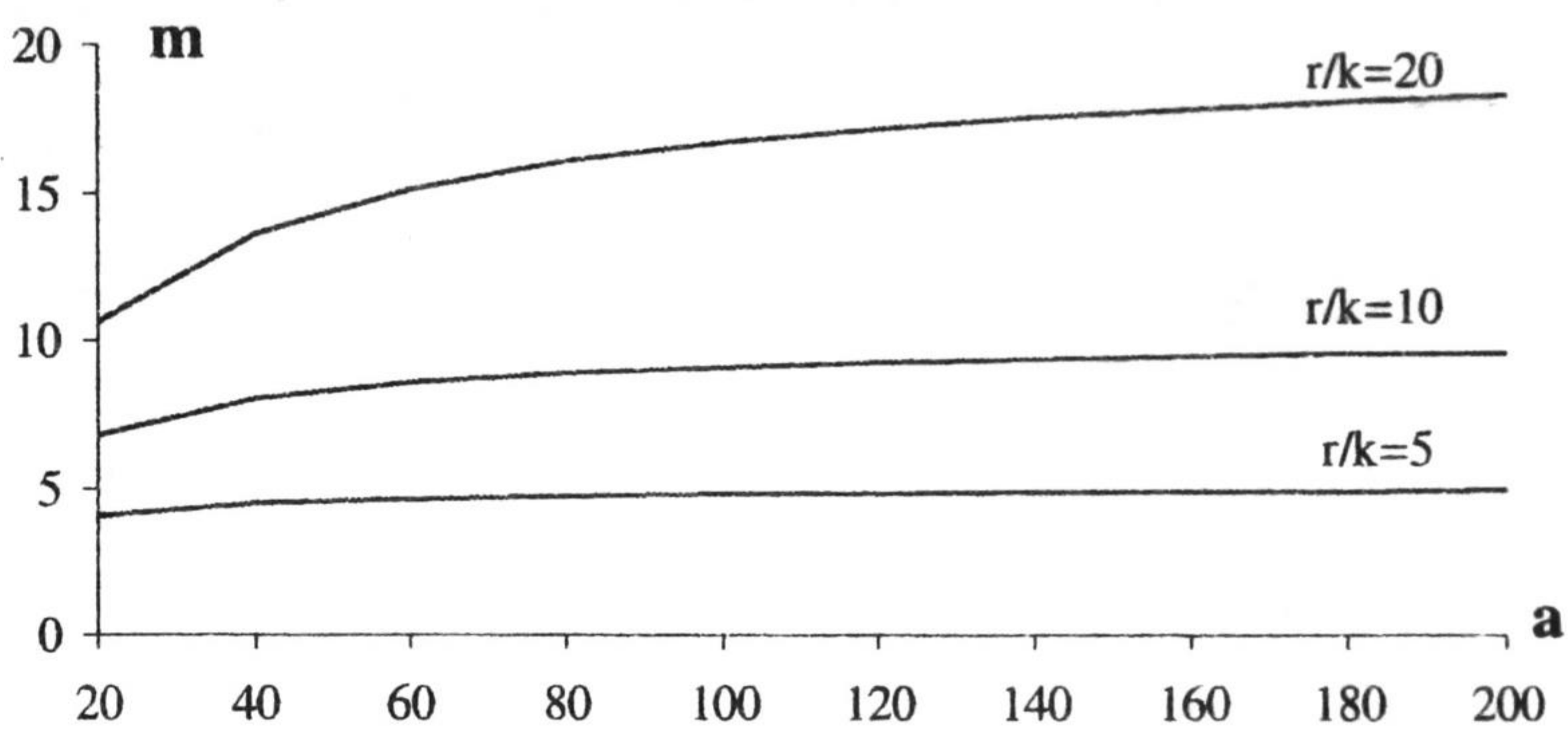


Рис. 5. Влияние расстояния между электродами

Таблица 2

Зависимость  $m$  от угла наклона скважины в зоне забоя

$\alpha$	$a = 150$			$a = 100$			$a = 50$		
	$r/k$	1	10	20	1	10	20	1	10
0	0,993	9,376	17,661	0,99	9,094	16,705	0,98	8,352	14,448
15	0,993	9,366	17,6	0,99	9,074	16,582	0,98	8,291	14,144
30	0,993	9,357	17,532	0,99	9,055	16,456	0,98	8,228	13,82
45	0,993	9,349	17,472	0,99	9,037	16,337	0,98	8,168	13,503
60	0,993	9,342	17,423	0,99	9,022	16,238	0,98	8,119	13,232

При этом формулы для вычисления коэффициентов уравнения (6) упрощаются

$$\begin{aligned}
 b &= -2\ell; \\
 c &= a^2; \\
 p &= -2a^2\ell; \\
 e &= a^2\ell^2.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Здесь  $\ell = r/k$ .

Подставив значения коэффициентов в уравнение (6) и разделив все члены на  $a^2\ell^2$ , получим

$$\frac{m^4}{a^2\ell^2} - \frac{2m^3}{a^2\ell} + \frac{m^2}{\ell^2} - \frac{2m}{\ell} + 1 = 0.
 \tag{11}$$



Для большинства практических ситуаций при  $a \gg m$ ,  $\ell \leq 15$ ,  $a \geq 100\text{м}$  первыми членами уравнения (11) можно пренебречь, тогда

$$\frac{m^2}{\ell^2} - \frac{2m}{\ell} + 1 = 0, \quad (12)$$

откуда  $m = \ell$ . При  $k = 0,01$   $U$  составляет от  $U_0$  1% и можно считать, что искажение электрического поля электродов обсадными колоннами незначительно. При  $k = 0,01$   $m \approx 100$  г.

При испытании электротехнического комплекса на Усть-Балыкском месторождении на скважинах № 3047 и № 7022 принимали  $m \geq 20\text{м}$ .

### Выводы

1. Для увеличения эффективности электровоздействия на продуктивный пласт необходима изоляция электродов от обсадной колонны.

2. На величину оптимального удаления электрода от обсадной колонны наибольшее влияние оказывают размеры электрода и практически не влияет угол наклона скважины в зоне забоя.

3. В большинстве практических ситуаций можно принимать величину оптимального удаления электрода от обсадной колонны равной радиусу эквивалентного шарового электрода, увеличенному в 100 раз.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов П. Л. Метод интенсификации притоков малодебитных скважин путем воздействия постоянным электрическим током / Математическое и информационное моделирование: Сб. науч. тр. Вып. 5. Тюмень: Издательство «Вектор Бук», 2003. С. 111-118.

2. Белоусов П. Л. Технический комплекс для электровоздействия на продуктивный нефтяной пласт / Математическое и информационное моделирование: Сб. науч. тр. Вып. 5. Тюмень: Издательство «Вектор Бук», 2003. С. 102-111.

3. Белоусов П. Л. Электротехническая модель установки для повышения дебита скважин / Математическое и информационное моделирование: Сб. науч. тр. Вып. 6. Тюмень: Издательство «Вектор Бук», 2004. С. 111 - 117.

4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М.: ВШ, 1973. 752 с.

5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука. 1997. 832 с.

*Галина Борисовна БАРСКАЯ —  
доцент кафедры информационных  
систем, к. т. н.*

УДК 622.691

## **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕМНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОСНОВАНИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ**

*АННОТАЦИЯ.* Фундамент под резервуары большой емкости состоит из трех элементов: сваи, ростверк и плиты перекрытия. Расходы на перекрытие составляют 50-52% от общего расхода железобетона. С целью снижения стоимости фундамента были разработаны объемные же-