

МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО  
ПО ДИАГНОСТИРОВАНИЮ И РЕГУЛИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ, А ТАКЖЕ УСТАНОВЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ  
РАБОТЫ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ИНФОРМАЦИОННОГО  
ПРОМЫСЛОВОГО МАТЕРИАЛА

*РД-39-3-756-82*

МИНИСТЕРСТВО НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УТВЕРЖДАЮ

Зам.министра

Валиханов А.Э.

" 14 " марта

1982г.

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО  
ПО ДИАГНОСТИКОВАНИЮ И РЕГУЛИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ, А ТАКЖЕ УСТАНОВЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ  
РАБОТЫ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ИНФОРМАЦИОННОГО  
ПРОМЫСЛОВОГО МАТЕРИАЛА

РД- 39-3-У56-82

Настоящий документ разработал:

Всесоюзный нефтегазовый научно-исследовательский институт  
(ВНИИ) *Вахитов* Г.Г. Вахитов

Составители:

руководитель лаборатории *Алиев* А.Х. Мирзаджанзаде

зам. директора ВНИИ *Валиханов* В.П. Максимов

начальник ОТ и ТДН *Гусев* В.И. Гусев

с.н.с. *Басович* И.Б. Басович

с.н.с. *Мамедов* А.В. Мамедов

с.н.с. *Байрамов* И.М. Байрамов

Принимали участие:

с.н.с. *Бакарджиева* В.И. Бакарджиева

с.н.с. *Крикунов* Н.В. Крикунов

с.н.с. *Мамедов* Б.А. Мамедов

м.н.с. *Капранов* Б.С. Капранов

Согласовано:

начальник Технического  
управления *Байджов* Д.Н. Байджов

## А Н Н О Т А Ц И Я

В методическом руководстве рассмотрен ряд методов прогнозирования пластового давления по данным кратковременных исследований скважин. Предложен диагностический критерий выбора фильтрационной модели и способ оценки фильтрационных параметров пласта на основании обработки кривых восстановления давления методом детерминированных моментов. Рассмотрены статистические методы ретроспективного анализа промысловых данных с целью оценки коэффициента продуктивности скважины, пластового давления и диагностирования неьютоновских свойств пластовых систем без проведения специальных гидродинамических исследований. Предложен комплексный подход к анализу и установлению оптимальных режимов работы компрессорных скважин.

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

## Методическое руководство

по диагностированию и регулированию технологических процессов, а также установлению оптимальных режимов работы скважин на основе существующего информационного промышленного материала

Приказом Министерства нефтяной промышленности  
от 12.10.1982 № 756 Срок введения установлен с 1.1.1983  
Срок действия до 31.12.1987

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для осуществления постоянного анализа, контроля и управления как процессом разработки в целом, так и отдельными технологическими процессами по воздействию на пласт и призабойную зону скважин необходимы данные об изменении пластового давления, коэффициентов продуктивности скважин, состоянии призабойной зоны пласта и др.

В первом разделе руководства рассмотрены различные способы прогнозирования пластового давления по неполным КВД, что особенно важно для некоторых месторождений высоковязких нефтей, когда полное время восстановления велико.

С целью повышения эффективности геолого-технических мероприятий по воздействию на призабойную зону пласта наложена методика оценки состояния призабойной зоны (однородный пласт, ухудшенная проницаемость в окрестности скважины или трещиновато-пористый коллектор) и выбора соответствующей фильтрационной модели.

Диагностирование проводится по некоторому безразмерному признаку, полученному на основе детерминированных моментов КВД, и предусматривает как качественное различие указанных выше вариантов, так количественную оценку фильтрационных параметров для каждого случая. Методика уточнения интервалов диагностирования приспособлена на основе обработки КВД, снятых на скважинах Федоровского месторождения. Пятый и шестой разделы посвящены оценке изменения пластового давления, продуктивности скважины при проведении воздействия на призабойную зону и диагностирования проявлений неьютоновских свойств пластовых систем по данным текущей промысловой информации.

Коэффициент продуктивности определяется на основе корреляционного анализа данных об изменении дебита и забойного давления скважины в процессе безостановочной эксплуатации, а именно по отношению ковариации дебита и давления к дисперсии давления. Если нет возможности организовать непрерывные замеры соответствующих параметров в течение некоторого промежутка времени, можно воспользоваться осредненными данными ежемесячных или квартальных замеров. При этом на основе интегральных методов осреднения (статистическое дифференцирование) могут быть получены изменения во времени средних значений пластового давления и коэффициента продуктивности скважины.

В основе методики диагностирования неьютоновских свойств пластовой жидкости лежит известный факт о запаздывании реагирования добычи нефти на темп нагнетания воды. Оценка времени запаздывания проводится на основе анализа взаимно-корреляционных функций "дебит нефти-объем закачки". Если полученное таким образом время запаздывания значительно превышает гидродинамическое время распространения возмущения в пласте, то можно с определен-

ной степенью достоверности считать, что на данном участке залежи пластовой системы обладают неьютоновскими свойствами.

В заключительной части предложен комплексный подход к задачам оптимизации работы компрессорных скважин.

Общепринятым в нефтепромысловой практике методом установления оптимального режима работы компрессорных скважин является построение зависимости объема добываемой жидкости от расхода газа с последующим выбором точки, соответствующей минимальному удельному расходу газа. Такой подход требует исследования скважин на различных режимах, что в случае высокодебитных скважин связано со значительными потерями в добыче нефти. В настоящем разделе предлагается методика расчета оптимального режима работы по сокращенной программе исследований скважин. Следует выделить 4 основных этапа такого подхода :

I. Сбор и подготовка промысловых данных.

II. Объединение анализируемых скважин в группы по признаку близости их дебитов, объемов закачиваемого газа и характерным особенностям технологических режимов. В ряде случаев это позволяет распространять результаты анализа режимов работы одной или нескольких скважин на группу в целом.

III. Установление необходимого времени исследования работы скважины на каждом режиме, при котором погрешность замеренных значений технологических параметров (дебит жидкости, рабочее давление, расход газа и др.) по сравнению со среднесуточными значениями не превышает требуемой величины.

IV. Определение по данным сокращенных исследований расчетной формулы для оценки дебита жидкости в процессе обучения и проверка возможности использования ее при сравнении со среднесуточными показателями.

Последовательное применение сформулированных принципов анализа различных технологических режимов позволяет ускорить вывод скважины на оптимальный режим работы, а также сократить объем проводимых исследований, потери добычи нефти и непроизводительный расход газа.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН.

### 2.1. Оценка пластового давления по невосстановленной КВД на основе метода самоорганизующихся моделей.

При оценке фильтрационных характеристик и технологических параметров разработки гидродинамическими методами полное время восстановления давления на скважинах ряда месторождений весьма велико (до 2-3 сут.), что приводит к большим потерям в добыче нефти и вынужденному сокращению объема проводимых исследований. В связи с этим возникает необходимость в разработке методов прогнозирования пластового давления по неполным кривым. Предлагаемый подход основан на использовании самоорганизующихся моделей и предусматривает два этапа - обучение по группе полных кривых восстановления давления и прогноз по невосстановленной части КВД.

Целью этапа обучения является выбор опорных функций для построения прогнозирующего уравнения оптимальной сложности. Обработка объема данных промышленных исследований показала, что наиболее качественный прогноз получается при использовании функций вида :  $t, e^{-\alpha t}, e^{-\alpha t} \sin \beta t$

Конкретные значения параметров  $\alpha, \beta$  определяются на основании обучающей группы скважин, а структура прогнозирующего уравнения и значение пластового давления непосредственно в процессе экзамена, т.е. по данным неполного гидродинамического исследования.

Предлагаемая методика была опробована на ряде скважин объединения "Менгшлакнефть". При этом в обучающую и экзаменационную



группу вошли соответственно 5 и 10 скважин. Средние значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , полученные в процессе обучения, составили  $\alpha = 0,67$  (час<sup>-1</sup>),  $\beta = 2,09$  (час<sup>-1</sup>).

Прогнозирование пластового давления на остальных скважинах осуществлялось по замерам КВД за интервал времени 1,5 часа, в то время как стабилизация наступала в среднем через 7-10 часов.

В таблице 2.1. приведены вид прогнозирующего уравнения, полученного на основе метода самоорганизующихся моделей, расчетное и замеренное значение пластового давления, а также относительная погрешность замера в %.

Программа для получения уравнений прогноза приведена в приложении.

Таблица 2.1.

| № № СКВ. | Модель (обучение по всей КВД)   | Δ P <sub>ПЛ</sub> |                   | %   |
|----------|---|-------------------|-------------------|-----|
|          |   | по модели         | по данным замеров |     |
| 1        | 2   | 3                 | 4                 | 5   |
| 20       | $\Delta P_{ПЛ} = 17,53 - 11,873 (e^{-dt})^2 + 0,213 (e^{-dt})^3 (0,25 + e^{-dt} \sin pt) -$ $- 5,914 e^{-dt} + 6,502 (e^{-dt})^3 (0,25 + e^{-dt} \sin pt)^2$                                  | 17,3              | 17,5              | 1,0 |
| 198      | $\Delta P_{ПЛ} = 10,71 - 8,819 (e^{-dt})^3 - 2,330 e^{-dt} + 1,359 (e^{-dt})^3 \times$ $\times (0,25 + e^{-dt} \sin pt) + 0,591 + (0,25 + e^{-dt} \sin pt)$                                   | 10,8              | 10,5              | 2,8 |
| 157      | $\Delta P_{ПЛ} = 31,00 - 13,93 (e^{-dt})^2 - 16,76 (e^{-dt}) - 3,624 (e^{-dt})^4 \times$ $\times (0,25 + e^{-dt} \sin pt) - 0,140 (e^{-dt})^4 (0,25 + e^{-dt} \sin pt)^2$                     | 31,0              | 31,0              | 0,0 |
| 47       | $\Delta P_{ПЛ} = 34,79 - 17,20 (e^{-dt}) - 16,773 (e^{-dt})^2 - 2,328 (e^{-dt})^2 \times$ $\times (0,25 + e^{-dt} \sin pt) - 0,952 (e^{-dt})^2 (0,25 + e^{-dt} \sin pt)$                      | 34,8              | 34,0              | 2,3 |
| 161      | $\Delta P_{ПЛ} = 35,56 - 34,42 e^{-dt} - 2,78 (0,25 + e^{-dt} \sin pt) -$ $- 0,385 (e^{-dt})^2 + 0,936 (e^{-dt})^2 (0,25 + e^{-dt} \sin pt) -$ $- 1,214 (e^{-dt})^3 (0,25 + e^{-dt} \sin pt)$ | 34,9              | 36,0              | 3,1 |

Продолжение таблицы 2.1.

| I    | 2   | 3    | 4    | 5   |
|------|---|------|------|-----|
| 2I   | $\Delta P_{III} = 36,114 - 35,864 X + 4,241 y^5 - 4,065 y^2$                          | 36,1 | 34,0 | 5,8 |
| I6II | $\Delta P_{III} = 35,232 + 5,714 X^4 y - 36,665 X - 0,0187 X^4 y^2$                   | 35,2 | 32,6 | 7,4 |
| I80  | $\Delta P_{III} = 33,6 - 32,937 X - 1,473 XY - 0,737 X^4 y - 0,6 X^8 y - 0,127 X^5 y$ | 33,6 | 32,6 | 3,0 |
| I9I  | $\Delta P_{III} = 21,52 - 8,821 X^2 - 12,707 X + 0,003 Y$                             | 21,5 | 20,0 | 7,0 |
| II76 | $\Delta P_{III} = 20,314 - 8,133 X - 35,826 X^5 y + 0,071 XY - 3,412 X^2 - 0,242 Y$   | 20,2 | 20,4 | 1,0 |

## 2.2. Прогнозирование технологических показателей разработки на основе моделей авторегрессии и интегрированного скользящего среднего.

### 2.2.1. Основные понятия о процессе АРСС.

Задачи прогнозирования временных рядов в нефтепромышленной практике имеют важное значение и охватывают широкий круг проблем, связанных с анализом, контролем и регулированием процесса разработки, а также оценкой эффективности различных мероприятий по воздействию на пласты и призабойную зону скважин.

Основным этапом прогнозирования является построение и идентификация прогнозирующего уравнения по конечной выборке временного ряда. Если уравнение прогноза задается в виде явной функции времени, задача сводится к оценке неизвестных констант, что в большинстве практически важных случаев приводит к проблеме минимизации нелинейной целевой функции. Чтобы избежать вычислительных трудностей, связанных с указанным обстоятельством, в данном разделе предложен метод составления прогноза, основанный на использовании процессов авторегрессии интегрированного скользящего среднего (АРСС).

Обозначим через  $x(t)$  текущие значения временного ряда,  $a(t)$  — последовательность случайных независимых величин с одинаковым законом распределения.

Уравнение процесса АРСС имеет вид

$$x(t) = \alpha_1 x_{t-1} + \dots + \alpha_n x_{t-n} + a_t - \beta_1 x_{t-1} - \dots - \beta_m x_{t-m} \quad (2.1)$$

Если через  $B$  обозначить оператор сдвига  $Bx_t = x_{t-1}$ , то можно переписать в виде

$$\Phi_n(B)x_t = F_m(B)a_t \quad (2.2)$$

где 
$$\Phi_n(B) = 1 - \alpha_1 B - \dots - \alpha_n B^n \quad (2.3)$$

$$F_m(B) = 1 - \beta_1 B - \dots - \beta_m B^m \quad (2.4)$$

Для прогноза широкого класса процессов нефтедобычи, выходящих со временем на некоторый постоянный уровень (изменение накопленной добычи по месторождению, дополнительный прирост добычи по скважине после проведения ГТМ, кривые восстановления давления и т.д.) модель (2.2) должна удовлетворять условиям

1. Корни уравнения  $F_m(B) = 0$  меньше единицы
2. Корни уравнения  $\Phi_n(B) = 0$  за исключением быть может одного меньше единицы ;
3. Если по фактическому смыслу  $X_t \rightarrow X_{стау.} + 0$  то один корень уравнения  $\Phi_n(B) = 0$  равен единице.

Рассмотрим способы составления прогноза для трех практически важных случаев :

1)  $\Phi_n(B) = (1 - \Phi_1 \cdot B) \cdot (1 - B)$  ,  $F_m(B) = 1$

Уравнение авторегрессии имеет вид

$$\Phi_n(B) X_t = a_t$$

или

$$X_t = (1 + \Phi_1) X_{t-1} - \Phi_1 X_{t-2} + a_t \quad (2.5)$$

где  $a_t$  - случайные возмущения.

Неизвестную константу  $\Phi_1$  можно определить по  $N$  начальным замерам ряда  $X_t$  , минимизировав целевую функцию

$$C_1(\Phi_1) = \sum_{i=1}^{N-2} (X_{i+2} - (1 + \Phi_1) X_{i+1} + \Phi_1 X_i)^2$$

Откуда следует

$$\Phi_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N-2} (X_{i+2} - X_{i+1})(X_{i+1} - X_i)}{\sum_{i=1}^{N-2} (X_{i+1} - X_i)^2} \quad (2.6)$$

Выведем теперь соотношение для оценки прогнозируемой величины  $X_{\text{стац}}$ . Запишем уравнение (2.5) для последующих значений ряда  $X_{N+1}, X_{N+2}, \dots$

$$\begin{aligned} X_{N+1} &= (1 + \varphi_1) X_N - \varphi_2 X_{N-1} + a_{N+1}, \\ X_{N+2} &= (1 + \varphi_1) X_{N+1} - \varphi_2 X_N + a_{N+2}, \\ \dots & \quad \dots \quad \dots \quad \dots \end{aligned} \quad (2.7)$$

$X_{N+l} = (1 + \varphi_1) X_{N+l-1} - \varphi_2 X_{N+l-2} + a_{N+l}$   
 Просуммируем почленно равенства (2.7), обозначив

$$\begin{aligned} S &= X_{N+1} + X_{N+2} + \dots + X_{N+l-2}, \\ S + X_{N+l-1} + X_{N+l} &= (1 + \varphi_1)(X_N + X_{N+l-1}) + (1 + \varphi_1)S - \\ &- \varphi_2(X_{N-1} + X_N) - \varphi_2 S + \sum_{i=1}^l a_{N+i} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Поскольку случайные величины  $a_i$  - независимы, одинаково распределены и имеют нулевые матожидания,

$$M\left(\sum_{i=1}^l a_{N+i}\right) = 0 \quad \text{и} \quad D\left(\sum_{i=1}^l a_{N+i}\right) \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad l \rightarrow \infty$$

где  $M$  и  $D$  обозначают матожидание и дисперсию. В силу этого можно положить  $\sum_{i=1}^l a_{N+i} = 0$

Заметим кроме того, что при достаточно большом  $l$ :  $X_{N+l} \approx X_{\text{стац}}$ . тогда равенство (2.8) перепишется следующим образом

$$S + 2X_{\text{стац}} = (1 + \varphi_1)(X_N + X_{\text{стац}}) + (1 + \varphi_1)S - \varphi_2(X_{N-1} + X_N) - \varphi_2 S$$

Откуда окончательно получим

$$X_{\text{стац}} = \frac{X_N - \varphi_2 X_{N-1}}{1 - \varphi_2} \quad (2.9)$$

В заключение отметим, что явное выражение прогнозирующей функции при этом имеет вид

$$X_t = X_{стац.} + c_1 e^{-\lambda t}$$

$$2) \Phi_{11}(B) = (1 - \Phi_1 B) (1 - \Phi_2 B) (1 - B), \quad F_m(B) = 1$$

Уравнение авторегрессии имеет вид

$$\Psi(B)(1 - B)X_t = a_t \quad (2.10)$$

$$\text{где } \Psi(B) = (1 - \Phi_1 B) (1 - \Phi_2 B).$$

Для определения констант удобнее обрабатывать преобразованный временной ряд  $Z_t$

$$Z_t = (1 - B)X_t = X_t - X_{t-1} \quad (2.11)$$

Уравнение (2.10) можно переписать в виде

$$Z_t - A Z_{t-1} - B Z_{t-2} = a_t \quad (2.12)$$

$$\text{где } A = \Phi_1 + \Phi_2, \quad B = -\Phi_1 \Phi_2. \quad (2.13)$$

Выписывая (2.12) для  $t = 3, 4, \dots, N$ , на основании метода наименьших квадратов получим систему линейных уравнений

$$\begin{aligned} C_1 &= C_{11} A + C_{12} B \\ C_2 &= C_{21} A + C_{22} B \end{aligned} \quad (2.14)$$

где

$$\begin{aligned} C_1 &= \sum_{i=3}^N z_i z_{i-1}, \quad C_2 = \sum_{i=3}^N z_i z_{i-2}, \\ C_{11} &= \sum_{i=3}^N z_{i-1}^2, \quad C_{21} = C_{12} = \sum_{i=3}^N z_{i-1} z_{i-2}, \\ C_{22} &= \sum_{i=3}^N z_{i-2}^2. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Определив  $A$  и  $B$  из уравнения (2.14), воспользуемся соотношением (2.13) и определим корни регрессионного полинома

$$\phi_1 = \frac{A}{2} + \sqrt{\frac{A^2}{4} - B}; \quad \phi_2 = \frac{A}{2} - \sqrt{\frac{A^2}{4} - B} \quad (2.16)$$

модель 2) будет иметь смысл, если  $|\phi_1|, |\phi_2| < 1$

Так же, как и для I-ой модели получим прогнозирующее уравнение

$$X_{стат.} = \frac{X_t - (\phi_1 + \phi_2 + \phi_1 \phi_2) X_{t-1} + \phi_1 \phi_2 X_{t-2}}{1 - \phi_1 - \phi_2 + \phi_1 \phi_2}$$

Прогнозирующая функция этой модели имеет вид

$$X_t = X_{стат.} + C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t}$$

$$3) \phi_1 = (1 - \phi_0 b)^2 \cdot (1 - B), \quad F_m(B) = 1$$

Очевидно, что эта модель является частным случаем предыдущей,

когда  $\phi_1 = \phi_2 = \phi_0$

Однако ее целесообразно рассматривать отдельно, поскольку прогнозирующая функция при кратных корнях качественно иная

$$X_t = X_{стат.} + (C_1 + C_2 t) e^{-\lambda t}$$

Для ряда первых разностей  $Z_t$  получим

$$Z_t - 2\phi_0 Z_{t-1} + \phi_0^2 Z_{t-2} = 0,$$

Метод наименьших квадратов в данном случае приводит к одному кубическому уравнению относительно  $\phi_0$ ,

$$A \phi_0^3 + B \phi_0^2 + C \phi_0 + D = 0,$$

где

$$A = \sum_{t=3}^N Z_{t-2}^2, \quad B = -3 \sum_{t=3}^N Z_{t-1} Z_{t-2}, \quad C = 2 \sum_{t=3}^N Z_{t-1}^2 + \sum_{t=3}^N Z_t Z_{t-2},$$

$$D = - \sum_{t=3}^N Z_t \cdot Z_{t-1}.$$



Уравнение решается графически. Если условию  $|\beta_0| < 1$  удовлетворяют больше, чем один корень уравнения из найденных корней выбирается тот, который дает лучшую аппроксимацию последней точки  $Z_N$  по начальным  $Z_1, Z_2$ .

Прогнозирующее уравнение для модели Э), которое можно получить таким же как и в случае I) методом, имеет вид :

$$X_{\text{стац.}} = \frac{X_t - 2\beta X_{t-1} + \beta^2 X_{t-2}}{(1 - \beta)^2}.$$

Указанием к выбору конкретной модели может служить вид нормированной автокорреляционной функции  $\rho_k$ , которая вычисляется по формуле

$$\rho_k = \frac{1}{N-k} \sum_{t=1}^{N-k} (X_t - \bar{X})(X_{t+k} - \bar{X}) / \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (X_t - \bar{X})^2 \quad (2.17)$$

В работе [ 1 ] отмечено, что вычисленная на основании значений  $\rho_k$  так называемая функция частной автокорреляции  $q_k$  становится равной нулю при задержке "к" равной степени регрессионного полинома. Способ расчета частных автокорреляций для всех задержек дан в [ 1 ] .

Здесь достаточно ограничиться первыми тремя значениями

$$q_1 = \rho_1; \quad q_2 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & \rho_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 \end{vmatrix}} = \frac{\rho_2 - \rho_1^2}{1 - \rho_1^2}; \quad q = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_1 & 1 & \rho_2 \\ \rho_2 & \rho_1 & \rho_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_1 & 1 & \rho_2 \\ \rho_2 & \rho_1 & 1 \end{vmatrix}} \quad (2.18)$$

Так, например, если  $q_1 \neq 0$ , а  $q_2 \approx 0$ , то следует остановиться на модели I), в противном случае ( $q_1, q_2 \neq 0$ ;  $q_3 \approx 0$ ) на модели Э) или З).

Неравенство нулю всех трех значений функции частной автокорреляции указывает на более сложный характер временного ряда, для описания которого следует использовать уравнения АРСС высших порядков или принципиально иной подход, например, метод самоорганизующихся моделей.

### 2.2.2. Пример расчета пластового давления на основе использования моделей АРСС .

В таблице 2.2. в графе 2 приведена кривая восстановления давления скважины № 137 пл.Федоровская. Показания снимаются с интервалом времени  $\Delta t = 30$  мин. в течение 14 часов.

Обработка полученного временного ряда проводилась по следующей схеме.

I. По формуле (2.17) вычисляются значения нормированной корреляционной функции для первых трех сдвигов.

Необходимые промежуточные расчеты сведены в табл.2.2.

II. По формулам (2.18) рассчитываются первые три значения функции частной автокорреляции ( $g_j$ )

$$g_1 = \rho_1 = 0,87$$

$$g_2 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 \\ \rho_2 & \rho_1 & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 \end{vmatrix}} = \frac{\rho_2 - \rho_1^2}{1 - \rho_1^2} = \frac{0,69 - 0,689}{1 - 0,689} = 0,003$$

$$g_3 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 \\ \rho_2 & \rho_1 & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 \\ \rho_2 & \rho_1 & 1 \end{vmatrix}} = \frac{0,57 + 0,572 + 0,395 - 0,573 - 0,395 - 0,573}{1 + 0,475 + 0,475 - 0,476 - 0,689 - 0,689} = \frac{-0,004}{0,096} = -0,041$$

Поскольку  $g_1 \neq 0$ ,  $g_2 \approx g_3 \approx 0$  принимается модель авторегрессии виде

$$(1 - \phi_1 B)(1 - B)X_t = a_t \quad (2.19)$$

Таблица 2.2.

Скважина № 137 пл. Федоровская  
(  $X_{ор} = 33,2$  атм )

| № №<br>ПШ              | $\Delta p =$<br>$= X_L$ | $\Delta P - \Delta P_{эф.} =$<br>$= X_L - X_{ор}$ | $(X_L - X_{ор})$ | $(X_L - X_{ор})x$<br>$(X_{L1} - X_{ор})$ | $(X_L - X_{ор})x$<br>$(X_{L2} - X_{ор})$ | $(X_L - X_{ор})$<br>$(X_{L3} - X_{ор})$ |
|------------------------|-------------------------|---|------------------|--|--|---|
| I                      | 2                       | 3   | 4                | 5  | 6  | 7                                       |
| 1                      | 7,2                     | -26   | 676              |  |  |   |
| 2                      | 13,0                    | -20,2   | 408,04           | 525,2                                    |  |   |
| 3                      | 17,2                    | -16   | 256              | 323,2                                    | 416,0                                    |   |
| 4                      | 20,4                    | -12,8   | 163,84           | 204,8                                    | 258,6                                    | 332,8                                   |
| 5                      | 23,2                    | -10   | 100              | 128                                      | 160,0                                    | 202,0                                   |
| 6                      | 25,4                    | -7,8  | 60,84            | 78                                       | 99,8                                     | 124,8                                   |
| 7                      | 27                      | -6,2  | 38,44            | 48,4                                     | 62,0                                     | 79,4                                    |
| 8                      | 28,6                    | -4,6  | 21,16            | 28,5                                     | 35,9                                     | 46,0                                    |
| 9                      | 30,1                    | -3,1  | 9,61             | 14,3                                     | 19,2                                     | 24,2                                    |
| 10                     | 31,2                    | -2  | 4                | 6,2                                      | 9,2                                      | 12,4                                    |
| 11                     | 32,3                    | -0,8  | 0,64             | 1,6                                      | 2,5                                      | 3,7                                     |
| 12                     | 33,3                    | +0,1  | 0,01             | -0,08                                    | -0,2                                     | -0,3                                    |
| 13                     | 34,1                    | 0,9   | 0,81             | 0,1                                      | -0,7                                     | -1,8                                    |
| 14                     | 34,8                    | 1,6   | 2,56             | 1,4                                      | 0,2                                      | -1,3                                    |
| 15                     | 35,4                    | 2,3   | 5,29             | 3,7                                      | 2,1                                      | 0,2                                     |
| 16                     | 36,0                    | 2,8   | 7,84             | 6,4                                      | 4,5                                      | 2,5                                     |
| 17                     | 36,6                    | 3,4   | 11,56            | 9,5                                      | 7,8                                      | 5,4                                     |
| 18                     | 37,0                    | 3,7   | 13,69            | 12,6                                     | 10,4                                     | 8,5                                     |
| 19                     | 37,4                    | 4,2   | 17,64            | 15,5                                     | 14,3                                     | 11,8                                    |
| 20                     | 37,8                    | 4,6   | 21,16            | 19,3                                     | 17,0                                     | 15,6                                    |
| 21                     | 38,2                    | 5   | 25               | 23                                       | 21,0                                     | 18,5                                    |
| 22                     | 38,6                    | 5,4   | 29,16            | 27                                       | 24,8                                     | 22,7                                    |
| 23                     | 38,9                    | 5,7   | 32,49            | 30,8                                     | 28,5                                     | 26,2                                    |
| 24                     | 39,2                    | 6,0   | 36               | 34,2                                     | 32,4                                     | 30,0                                    |
| 25                     | 39,5                    | 6,3   | 39,69            | 37,8                                     | 35,9                                     | 34,0                                    |
| $\Sigma$               | =                       |   | 1981,4           | 1579,4                                   | 1261,2                                   | 997,3                                   |
| $n$                    | =                       |   | 25               | 24                                       | 23                                       | 22                                      |
| $R = \frac{\Sigma}{n}$ | =                       |   | 79,25            | 65,8                                     | 54,8                                     | 45,3                                    |
| $R_{норм.}$            | =                       |   | 1                | 0,83                                     | 0,69                                     | 0,57                                    |
|                        |                         |   | $\rho_0$         | $\rho_1$                                 | $\rho_2$                                 | $\rho_3$                                |

III На основании метода наименьших квадратов определяется константа

При обработке данных методом наименьших квадратов целесообразно использовать последние 10-15 точек, не включая в анализ начальные замеры, поскольку они могут быть искажены продолжающимся притоком жидкости в скважину после остановки.  $\beta_0$  рассчитывается по формуле (2,6) (см. таблицу 2.8).

Таблица 2.8

| № п/п | $X_{i+1} - X_i$ | $(X_{i+1} - X_i)^2$ | $(X_{i+2} - X_i) \cdot$<br>$(X_{i+2} - X_{i+1})$ |  |
|-------|-----------------|---------------------|--|--|
| 11    | 4               | 16                  |  |  |
| 12    | 0,8             | 0,64                | 0,8  | $\sum_{i=11}^{25} (X_{i+1} - X_i)^2 = 4,37$                              |
| 13    | 0,7             | 0,49                | 0,56   |  |
| 14    | 0,6             | 0,36                | 0,42   | $\sum_{i=12}^{25} (X_{i+1} - X_i) \cdot$<br>$(X_{i+2} - X_{i+1}) = 3,77$ |
| 15    | 0,5             | 0,25                | 0,36   |  |
| 16    | 0,6             | 0,36                | 0,36   | $\beta_0 = \frac{3,77}{4,37} = 0,863$                                    |
| 17    | 0,4             | 0,16                | 0,24   |  |
| 18    | 0,4             | 0,16                | 0,16   |  |
| 19    | 0,4             | 0,16                | 0,16   |  |
| 20    | 0,4             | 0,16                | 0,16   |  |
| 21    | 0,4             | 0,16                | 0,16   |  |
| 22    | 0,3             | 0,09                | 0,12   |  |
| 23    | 0,3             | 0,09                | 0,09   |  |
| 24    | 0,3             | 0,09                | 0,09   |  |
| 25    | 0,3             | 0,09                | 0,09   |  |

IV По формуле (2,9) оценивается величина пластового давления

$$\tilde{P}_{пл} = X_{стац} = \frac{39,5 - 0,863 \cdot 39,2}{1 - 0,863} = 41,4$$

Замеренное пластовое давление (по КВД, снятой в течение 14 часов) равно  $P_{пл} = 42,1$  атм

Следовательно относительная ошибка прогноза составляет

$$\frac{|P_{пл} - \tilde{P}_{пл}|}{P_{пл}} \approx \frac{|42,1 - 41,4|}{42,1} = 0,017 \quad ,$$

что составляет  $\approx 1,7\%$

Следует отметить, что использование более сложных моделей 2) и 3) не улучшает прогноза пластового давления, что подтверждает правильность выводов пункта II.

### 3. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА И ВЫБОР ФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ .

#### 3.1. Теоретические основы диагностического принципа выбора фильтрационной модели по данным гидродинамических исследований скважин.

Интерпретация гидродинамических исследований скважин имеет важное значение при контроле и управлении различными технологическими процессами нефтедобычи, а также при планировании и проведении геолого-технических мероприятий по воздействию на призабойную зону пласта.

Одним из наиболее распространенных в нефтепромышленной практике способов исследования является снятие кривых восстановления давления (КВД). Определение фильтрационных характеристик пласта по КВД позволяет более обоснованно выбирать скважины под воздействие, метод воздействия на призабойную зону пласта, оптимальные технологические характеристики операций, а также оценивать эффективность проведенного геолого-технического мероприятия.

Далеко не всегда существует достаточная априорная информация для выбора модели фильтрации, учитывающей степень однородности пласта, трещиновато-пористые свойства коллектора и т.д. В этом случае как выбор фильтрационных моделей пористой среды, так и оценку соответствующих параметров приходится проводить только на основе данных гидродинамических исследований. В то же время, как показывает практика КВД на различных месторождениях, даже при ошибочном выборе модели фильтрации полученные фильтрационные характеристики могут принимать вполне допустимые, с физической точки зрения, значения, что, естественно, может привести к заранее ошибочным выводам и рекомендациям.

В силу этого особое значение приобретает задача построения диагностической процедуры, позволяющей с определенной степенью достоверности выбрать математическую модель для интерпретации КВД непосредственно по данным проведенного гидродинамического исследования.

Для построения единого диагностического признака использовался метод детерминированных моментов давления.

Детерминированным моментом давления  $p(t)$   $n$ -ного порядка называется выражение

$$M_n = \int_0^{\infty} [P_{n+1} - P(t)] t^n dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Для получения аналитической зависимости детерминированных моментов КВД от фильтрационных характеристик пласта, решалась задача об остановке скважины, работающей с постоянным дебитом в пласте с контуром питания.

При фильтрации невязкой нефти в однородном по проницаемости коллекторе получены следующие выражения для первых трех детерминированных моментов давления

$$\begin{aligned} M_0 &= \frac{q}{8\pi} \cdot \left( \frac{kh}{M} \right)^{-1} \gamma, \\ M_1 &= \frac{5q}{256\pi} \cdot \left( \frac{kh}{M} \right)^{-1} \gamma^2, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $\frac{kh}{M}$  — коэффициент гидропроводности,  $\alpha$  — коэффициент проницаемости пласта,  $\gamma = R^2/\alpha$  — характерное время протекания переходных процессов в исследуемой системе.

Исключая из приведенных соотношений параметры  $q$ ,  $\frac{kh}{M}$  и  $\gamma$ , получим универсальное соотношение для первых трех детерминированных моментов давления

$$d = M_0 M_2 / M_1^2 = 2,18 \quad (3.2)$$

Из последнего соотношения следует, что величина  $d$  в данном случае всегда сохраняет постоянное значение независимо от фильтрационных свойств коллектора, свойств пластовой нефти, мощности пласта, радиусов скважины и контура питания, а также от дебита скважины до остановки.

Указанное обстоятельство позволяет принять в качестве диагностического признака при интерпретации КВД приведенную комбинацию детерминированных моментов (3.2).

В том случае, когда проницаемость призабойной зоны и удаленной части пласта существенно различны, а также для трещиновато-пористого коллектора величина признака  $d$  будет иной. Так для зонально-неоднородного пласта можно получить

$$d = 2,18 \Phi(\alpha, h) \quad (3.5)$$

где  $\alpha$  - отношение коэффициента проницаемости удаленной части пласта к коэффициенту проницаемости в призабойной зоне;  $h = r_0/R$  где  $r_0$  - радиус призабойной зоны с ухудшенной проницаемостью.

Таким образом, для зонально неоднородного пласта диагностический критерий  $d$  зависит как от относительных размеров зоны неоднородности  $h$ , так и от отношения соответствующих этим зонам проницаемостей  $\alpha$ . На рис. 3.1а приведены расчетные значения функции  $\Phi(\alpha, h)$  для различных величин параметров  $\alpha$  и  $h$ . Как видно из этого графика функция  $\Phi(\alpha, h)$  всегда больше 1 и, следовательно, диагностический признак  $d$  больше соответствующего значения для случая однородного пласта.

Для КВД в трещиновато-пористых средах диагностическое соотношение имеет вид

$$d = 2,18 \bar{\Phi}_1(\bar{\gamma}) \quad (3.4)$$

где  $\bar{\gamma} = \tau/\gamma$  - отношение времени перетоков между трещинами и блоками к времени переходных процессов  $\gamma$ .



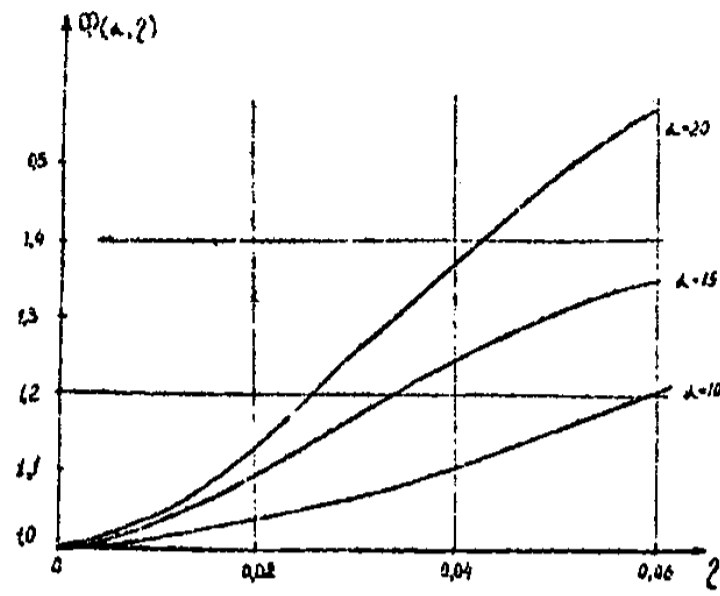


Рис. 3.1а

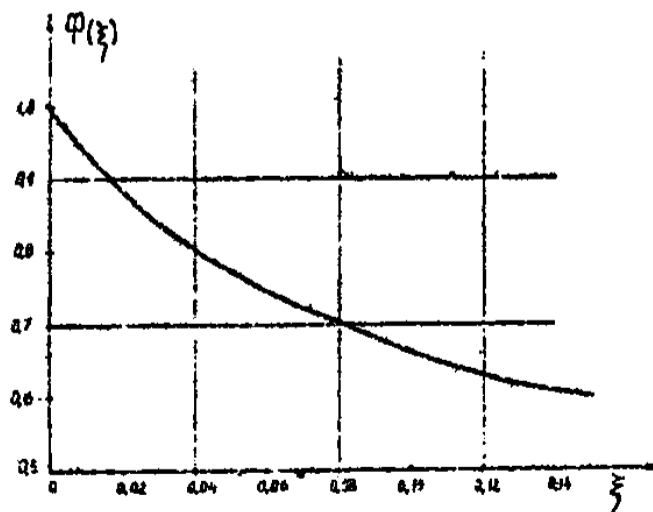


Рис. 3.1б

Как следует из рис. 3.16 для трещиновато-пористого коллектора диагностический признак  $d$  всегда меньше соответствующей величины для однородного пласта.

Благодаря интегральному характеру обработки промышленных данных при вычислении детерминированных моментов давления и структуре диагностического критерия  $d$ , последний вычисляется достаточно устойчиво для всех трех рассмотренных моделей.

### 3.2. Методика вычисления детерминированных моментов давления

Представим детерминированный момент  $n$ -ого порядка в виде суммы двух интегралов

$$M_n = \int_0^T [\Delta p_{пл.} - \Delta p(t)] t^n dt + \int_T^\infty [\Delta p_{пл.} - \Delta p(t)] t^n dt, \quad (3.5)$$

$n = 0, 1, 2, \dots$

где  $T$  - время снятия кривой восстановления давления;  $\Delta p = p(t) - p(0)$ ,  $\Delta p_{пл.} = p_{пл.} - p(0)$ .

Первые интегралы, входящие в соотношение (3.5) можно вычислить используя численный метод трапеций. При одинаковых интервалах  $\Delta t$  между дискретными замерами давления на КВД имеем

$$\int_0^T [\Delta p_{пл.} - \Delta p(t)] t^n dt = \Delta p_{пл.} \cdot T^{n+1} / (n+1) -$$

$$- \left[ \sum_{i=1}^N \Delta p(t_i) t_i^n + \Delta p(T) \cdot T^n / 2 \right] \Delta t, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.6)$$

где  $t_i$  - времена дискретных замеров давления,  $T = (N+1) \Delta t$

Для вычисления вторых интегралов, входящих в соотношение (3.5) аппроксимируем невосстановленную часть КВД экспонентой вида

$$\Delta p(t) = \Delta p_{пл.} - p_0 e^{-\alpha t}$$

Для определения констант воспользуемся тем очевидным обстоятельством, что производная и значение функций в точке для данной зависимости связаны линейным соотношением, т.е.

$$\alpha \frac{d \Delta P(t)}{dt} + \Delta P(t) = \Delta P_{пл} \quad (3.7)$$

Производную функции давления по времени в выражении (3.7) можно вычислить методом конечных разностей по формуле

$$\left. \frac{d \Delta P(t)}{dt} \right|_{t_i} = \frac{\Delta P(t_i + \Delta t) - \Delta P(t_i - \Delta t)}{2 \Delta t} \quad (3.8)$$

Выписывая уравнение (3.8) для двух временных точек  $T$  и  $T - \Delta t$  получим систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных параметров  $\alpha$  и  $\Delta P_{пл}$ .

Для первых трех детерминированных моментов давления имеем

$$\begin{aligned} M_0 &= \int_0^T [\Delta P_{пл} - \Delta P(t)] dt + P_0 \alpha, \\ M_1 &= \int_0^T [\Delta P_{пл} - \Delta P(t)] t dt + P_0 \alpha^2 (1 + T/\alpha), \\ M_2 &= \int_0^T [\Delta P_{пл} - \Delta P(t)] t^2 dt + P_0 \alpha^3 [2 + 2T/\alpha + (T/\alpha)^2], \quad (3.9) \end{aligned}$$

где  $P_0 = \Delta P_{пл} - \Delta P(T)$

Проиллюстрируем последовательность обработки КВД методом детерминированных моментов на примере КВД в скважине № 138 Федоровского месторождения (таблица 3.1).

По имеющимся замерам изменения давления вычисляются значения произведений  $\Delta P(t_i) t_i$ ;  $\Delta P(t_i) t_i^2$  (таблица 3.1).

1. В соответствии с формулой (3.8) выписываются первые производные давления по времени для последних точек на КВД.

Таблица 3.1.

| №<br>п/п | сек<br>$t \cdot 10^{-4}$ | кгс/см <sup>2</sup><br>$\Delta p(t)$ | $\Delta P(t) \cdot t \cdot 10^{-4}$<br>(кгс/см <sup>2</sup> ·сек) | $\Delta P(t) t^2 \cdot 10^{-8}$<br>$\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \cdot \text{сек}^2$ |
|----------|--------------------------|--------------------------------------|---|--|
| 1        | 0                        | 0                                    | 0   | 0  |
| 2        | 0,56                     | 15,2                                 | 5,47  | 16,27  |
| 3        | 0,72                     | 22,6                                 | 16,27   | 11,72  |
| 4        | 1,08                     | 27,0                                 | 29,16   | 31,49  |
| 5        | 1,44                     | 30,3                                 | 43,62   | 62,83  |
| 6        | 1,80                     | 33,2                                 | 59,76   | 107,57   |
| 7        | 2,16                     | 35,5                                 | 76,68   | 165,63   |
| 8        | 2,52                     | 37,6                                 | 94,75   | 238,78   |
| 9        | 2,88                     | 39,6                                 | 114,05  | 328,46   |
| 10       | 3,24                     | 41,2                                 | 133,49  | 432,50   |
| 11       | 3,60                     | 42,7                                 | 153,72  | 553,39   |
| 12       | 3,96                     | 44,2                                 | 175,03  | 693,13   |
| 13       | 4,32                     | 45,4                                 | 196,13  | 847,27   |
| 14       | 4,68                     | 46,7                                 | 218,56  | 1022,84  |
| 15       | 5,04                     | 47,8                                 | 240,91  | 1214,20  |
| 16       | 5,40                     | 48,8                                 | 263,52  | 1423,01  |
| 17       | 5,76                     | 49,8                                 | 286,85  | 1652,24  |
| 18       | 6,12                     | 50,6                                 | 309,67  | 1895,19  |
| 19       | 6,48                     | 51,4                                 | 333,07  | 2158,31  |
|          | 6,84                     | 52,1                                 |   |  |

В данном случае для точек  $T = t_1 = 6,48 \cdot 10^4$  (сек) и  $t_2 = 6,12 \cdot 10^4$  (сек)

$$\left. \frac{d\Delta P}{dt} \right|_{t=t_1} = \frac{50,1 - 50,6}{(6,84 - 6,12) \cdot 10^4} = \frac{1,5}{0,72 \cdot 10^4} = 2,08 \cdot 10^{-4}$$

$$\left. \frac{d\Delta P}{dt} \right|_{t=t_2} = \frac{51,4 - 49,8}{(6,48 - 5,76) \cdot 10^4} = \frac{1,6}{0,72 \cdot 10^4} = 2,22 \cdot 10^{-4}$$

2. Затем из решения системы двух алгебраических уравнений (3.7) определяются значения неизвестных параметров  $\alpha$ ,  $\Delta P_{пл}$  и  $P_0$ .

Для обрабатываемой КВД имеем

$$\frac{1,5}{0,72} \cdot 10^{-4} + 51,4 = \Delta P_{пл}$$

$$\frac{1,6}{0,72} \cdot 10^{-4} + 50,6 = \Delta P_{пл}$$

Выражая из первого уравнения последней системы параметр  $\Delta P_{пл}$  через  $\alpha$  и подставляя во второе уравнение, получим соотношение для определения неизвестной величины  $\alpha$

$$\alpha \cdot \frac{1,6 - 1,5}{0,72} \cdot 51,4 - 50,6$$

Отсюда имеем

$$\alpha = \frac{0,8 \cdot 0,72}{0,1} \cdot 10^4 = 5,76 \cdot 10^4 \text{ (сек)}$$

$$\Delta P_{пл} = 51,4 + 5,76 \cdot \frac{1,5}{0,72} = 63,4 \text{ (кгс/см}^2\text{)}$$

$$P_0 = \Delta P_{пл} - P(T) = 63,4 - 51,4 = 12,0 \text{ (кгс/см}^2\text{)}$$

3. По имеющимся замерам изменения давления вычисляются значения произведений  $\Delta P(t_i) \cdot t_i$  и  $\Delta P(t_i) \cdot t_i^2$  (табл.4.1)

4. После вычисления значений  $\Delta p(t_i) \cdot t_i$  и  $\Delta p(t_i) \cdot t_i^2$  переходим к определению величин интегралов, входящих в формулы (3.5). Складываются все значения в соответствующих столбцах таблицы (3.1) (причем последнее число делится пополам) и полученная сумма умножается на величину  $\Delta t = 0,76 \cdot 10^4$  (сек). После этого вычисляются площади  $\frac{\Delta p_{n+1} \cdot \tau^{n+1}}{n+1}$ ,  $n=0, 1, 2$ . Разница между полученными значениями соответствующих площадей и принимается за оценку определяемых интегралов

$$\int_0^T [\Delta p_{n+1} - \Delta p(t)] dt = \frac{63,4 \cdot 6,48 \cdot 10^4}{1} - 246,20 \cdot 10^4 = 164,63 \cdot 10^4 \text{ (кгс/см}^2 \text{ сек)}$$

$$\int_0^T [\Delta p_{n+1} - \Delta p(t)] t dt = \frac{63,4 \cdot (6,48 \cdot 10^4)^2}{2} - 930,31 \cdot 10^8 = 400,78 \cdot 10^8 \left( \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \cdot \text{сек}^2 \right)$$

$$\int_0^T [\Delta p_{n+1} - \Delta p(t)] t^2 dt = \frac{63,4 \cdot (6,48 \cdot 10^4)^3}{3} - 4233,97 \cdot 10^8 = 1516,36 \cdot 10^{12} \left( \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \cdot \text{сек}^3 \right)$$

5. После вычисления этих интегралов переходим к определению значений первых трех детерминированных моментов

$$M_0 = 164,63 \cdot 10^4 + 12,0 \cdot 5,76 \cdot 10^4 = 233,75 \cdot 10^4 \left( \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \cdot \text{сек} \right)$$

$$M_1 = 400,78 \cdot 10^8 + 12,0 \cdot (5,76 \cdot 10^4)^2 \left( 1 + \frac{6,48}{5,76} \right) = 1246,82 \cdot 10^8 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \cdot \text{сек}^2$$

$$M_2 = 1516,36 \cdot 10^{12} + 12,0 \cdot (5,76 \cdot 10^4)^3 \left[ 2 + 2 \cdot \frac{6,48}{5,76} + \left( \frac{6,48}{5,76} \right)^2 \right] =$$

$$= 14165,0 \cdot 10^{12} \left( \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \cdot \text{сек}^3 \right)$$

6. По формуле  $d = \frac{M_0 M_2}{M_1^2}$  определяется величина диагностического признака

$$d = \frac{233,75 \cdot 14165,0}{(1246,82)^2} = 2,13$$

### 3.3. Уточнение интервалов диагностирования

Следует отметить, что в силу недостаточно высокой точности и ограниченности времени замеров текущего забойного давления, а так же возможного искажения КВД за счет неучтенного притока жидкости в скважину после остановки для однородных пластов существует определенный разброс в значении диагностического признака. Границы такого интервала вариации диагностического критерия для однородных пластов должны быть получены, в частности, на основе обучения по некоторой группе скважин исследуемого месторождения. Для обучения рекомендуется использовать 20-30 имеющихся КВД, к которым в дальнейшем для уточнения границ интервалов могут добавляться новые обрабатываемые КВД.

Так методом детерминированных моментов было обработано 29 кривых восстановления давления в однородных по проницаемости пластах на скважинах Федоровского месторождения. На рис. 3.2 приведена гистограмма распределения диагностических признаков  $d$  для этих КВД. С этой целью кривые восстановления давления разбивались на группы по интервалам изменения диагностического критерия  $d$ . Ширина интервалов принималась равной 0,1. Затем по оси ординат откладывались относительные частоты попадания КВД по диагностическому параметру  $d$  в соответствующий интервал вариации. Как видно из приведенного рисунка 3.3, для Федоровского месторождения можно принять диагностический интервал  $1,9 < d < 2,5$  соответствующим фильтрации жидкости в однородном пласте. Отклонение диагностического признака за границы указанного интервала  $d > 2,5$  свидетельствует о наличии в окрестности скважины призабойной зоны с ухудшенной проницаемостью. В частности, для КВД, рассмотренной в предыдущем параграфе  $d = 2,13$ , принимается гипотеза об однородности продуктивного пласта.

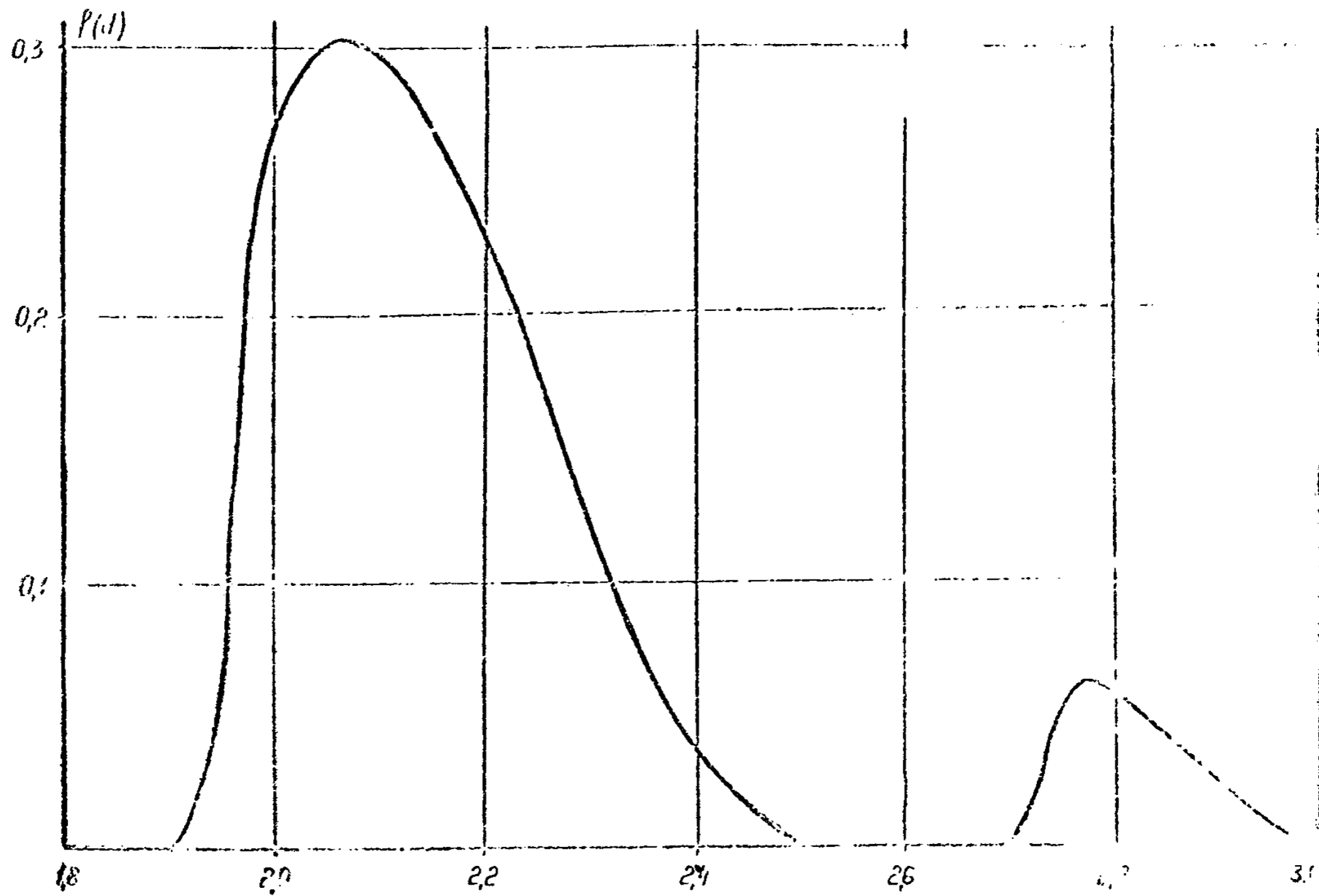
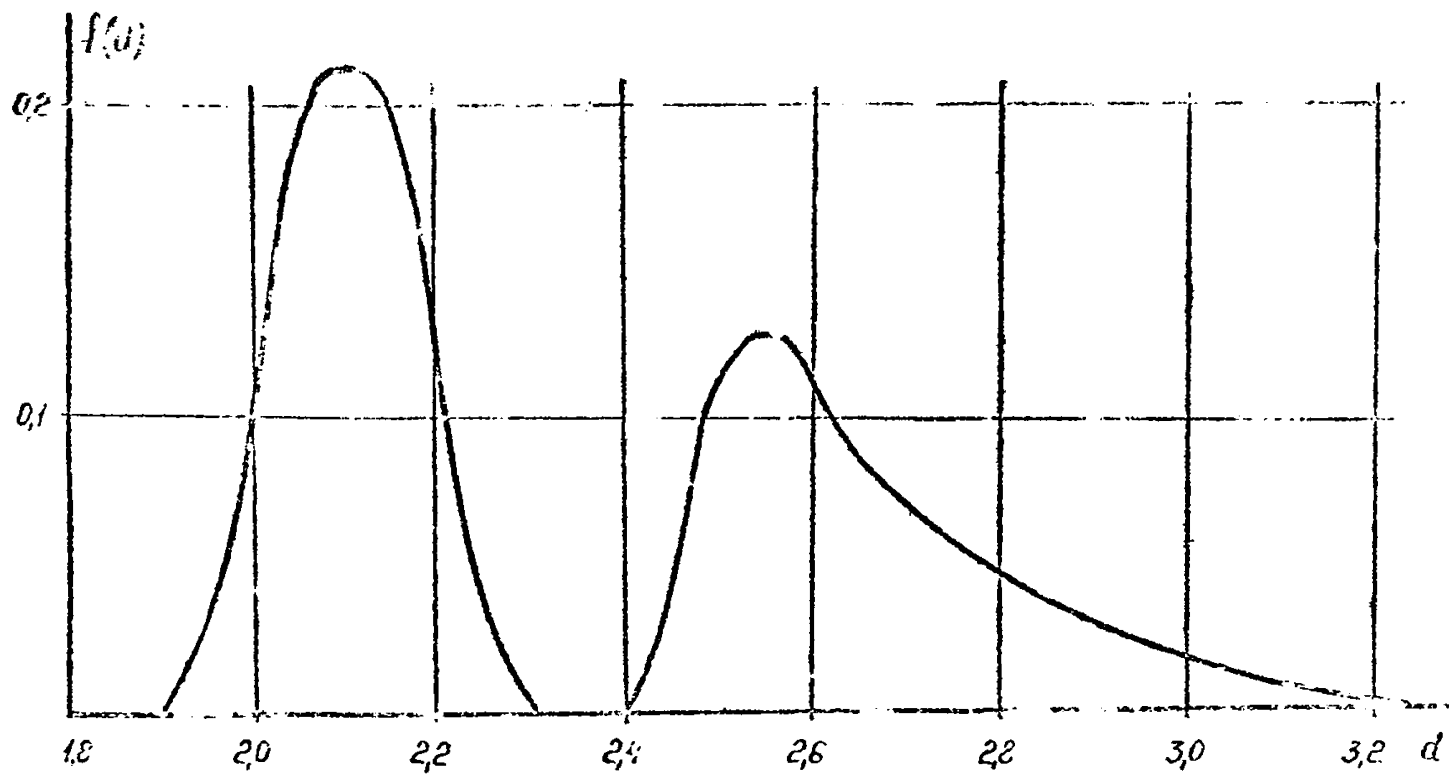


рис. 3.2





pue. 3.3

#### 4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ СКВАЖИН И ПЛАСТОВ БЕЗ ПРОВЕДЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

##### 4.1. Определение коэффициента продуктивности скважины по результатам корреляционного анализа временных колебаний дебита и давления .

Как показывают промышленные замеры, дебит и забойное давление ряда скважин в процессе эксплуатации испытывают колебания даже в течение сравнительно небольших отрезков времени (суток, а иногда и часов). Подобные отклонения технологических показателей работы скважин от средних значений могут быть информативными с точки зрения оценки таких параметров системы, как коэффициент продуктивности и пластовое давление.

Для описания динамики изменения расхода жидкости  $q(t)$  в зависимости от забойного давления  $p(t)$  воспользуемся простейшим идентификационным уравнением вида

$$T \frac{dq(t)}{dt} + p(t) = q(t) / c, \quad (4.1)$$

где  $c$  — коэффициент продуктивности скважины.

Как показала практика обработки результатов гидродинамических исследований скважин, такое упрощенное описание динамического процесса дает вполне удовлетворительные результаты.

Исходя из последнего равенства, можно получить дифференциальное уравнение для корреляционных функций процесса. Умножив обе части (4.1) на  $p(t+\tau)$  и применяя операцию математического ожидания, получим:

$$T \frac{dR_{pp}(\tau)}{d\tau} + R_{pp}(\tau) = R_{qp}(\tau) / c, \quad (4.2)$$

где  $R_{pp}(\tau)$  - автокорреляционная функция давления,  $R_{qp}(\tau)$  - мюкорреляционная функция дебита и давления.

Можно показать, что если автокорреляционная функция входного сигнала (дебита) непрерывна, то автокорреляционная функция давления дифференцируема и в силу симметрии

$$d \frac{R_{pp}(\tau)}{d\tau} \Big|_{\tau=0} = 0$$

из (4.2) имеем

$$C = -R_{qp}(0) / R_{pp}(0) = -\tau_{pq} / \sigma_p^2, \quad (4.3)$$

где  $\tau_{pq}$  - коэффициент ковариации дебита и давления,  $\sigma_p^2$  - дисперсия колебаний давления.

Таким образом, величину коэффициента продуктивности скважин можно оценить как отношение коэффициента ковариации давления и дебита исследуемой скважины к дисперсии давления, взятому с противоположным знаком.

Проиллюстрируем методику определения коэффициента продуктивности по формуле (4.3) на примере обработки текущих технологических параметров скв. № 3187 НГДУ "Лениннефть".

В таблице 4.1 приведены данные о изменении ежесуточных замеров дебита скважины и забойного давления.

I. В соответствии с методикой, изложенной в [4] производится тройное последовательное сглаживание экспериментальных функций и вычисляются случайные стационарные колебания дебита и давления  $q - \bar{q}$  и  $p - \bar{p}$  (таблица 4.1).

Таблица 4.1.

| $\frac{m^3}{сут}$<br>$q$ | $\frac{m^3}{сут}$<br>$q$ | $\frac{m^3}{сут}$<br>$\bar{q}$ | $\frac{m^3}{сут}$<br>$\bar{q}$ | $\frac{m^3}{сут}$<br>$q - \bar{q}$ | $\rho, \frac{кгс}{см^2}$ | $\bar{\rho}, \frac{кгс}{см^2}$ | $\bar{\rho}, \frac{кгс}{см^2}$ | $\bar{\rho}, \frac{кгс}{см^2}$ | $\rho - \bar{\rho}, \frac{кгс}{см^2}$ |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| I                        | 2                        | 3                              | 4                              | 5                                  | 6                        | 7                              | 8                              | 9                              | 10                                    |
| 48,6                     |                          |                                |                                |                                    | 49,0                     |                                |                                |                                |                                       |
| 36,2                     | 36,5                     |                                |                                |                                    | 49,0                     | 49,0                           |                                |                                |                                       |
| 24,8                     | 32,3                     | 33,2                           |                                |                                    | 49,0                     | 49,0                           | 49,0                           |                                |                                       |
| 35,8                     | 30,9                     | 32,8                           | 31,6                           | 4,6                                | 49,0                     | 49,0                           | 48,9                           | 48,9                           | 0,1                                   |
| 32,1                     | 35,1                     | 33,6                           | 33,6                           | -1,5                               | 49,0                     | 48,7                           | 48,7                           | 48,6                           | 0,4                                   |
| 37,5                     | 34,7                     | 34,3                           | 33,8                           | 3,7                                | 48,0                     | 48,3                           | 48,3                           | 48,3                           | -0,4                                  |
| 34,5                     | 33,2                     | 33,5                           | 33,9                           | 0,6                                | 48,0                     | 48,0                           | 48,2                           | 48,2                           | -0,2                                  |
| 27,6                     | 32,7                     | 34,0                           | 34,7                           | -7,1                               | 48,0                     | 48,3                           | 48,2                           | 48,2                           | -0,2                                  |
| 31,1                     | 36,2                     | 36,6                           | 37,0                           | -0,9                               | 49,0                     | 48,3                           | 48,3                           | 48,3                           | 0,7                                   |
| 45,0                     | 41,0                     | 40,3                           | 39,7                           | 5,3                                | 48,0                     | 48,3                           | 48,3                           | 48,3                           | -0,3                                  |
| 41,9                     | 43,7                     | 42,2                           | 41,8                           | 0,1                                | 48,0                     | 48,3                           | 48,3                           | 48,3                           | -0,3                                  |
| 44,3                     | 42,0                     | 42,9                           | 42,6                           | 1,7                                | 49,0                     | 48,3                           | 48,3                           | 48,3                           | 0,7                                   |
| 39,0                     | 42,9                     | 42,7                           | 42,7                           | -2,9                               | 48,0                     | 48,3                           | 48,3                           | 48,3                           | -0,3                                  |
| 44,6                     | 43,2                     | 42,6                           | 42,5                           | 2,1                                | 48,0                     | 48,3                           | 48,3                           | 48,3                           | -0,3                                  |
| 45,1                     | 41,7                     | 42,3                           | 42,1                           | 3,0                                | 49,0                     | 48,3                           | 48,4                           | 48,5                           | 0,5                                   |
| 35,5                     | 42,0                     | 41,5                           | 42,5                           | -7                                 | 48,0                     | 48,7                           | 48,7                           | 48,7                           | -0,7                                  |
| 45,4                     | 40,7                     | 43,3                           | 44,1                           | 1,3                                | 49,0                     | 49,0                           | 48,9                           | 48,8                           | 0,2                                   |
| 41,3                     | 48,7                     | 47,1                           | 47,7                           | -6,4                               | 50,0                     | 49,0                           | 48,9                           | 48,8                           | 1,2                                   |

Продолжение таблицы 4.1

| 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 59,3 | 52,0 | 52,1 | 50,7 | 8,6  | 48,0 | 48,7 | 48,5 | 48,4 | -0,4 |
| 55,4 | 55,5 | 52,8 | 52,0 | 3,4  | 48,0 | 47,7 | 47,9 | 47,9 | 0,1  |
| 51,9 | 51,0 | 51,2 | 50,4 | 1,5  | 47,0 | 47,3 | 47,2 | 47,3 | -0,3 |
| 45,7 | 47,0 | 47,3 | 47,6 | -1,9 | 47,0 | 46,7 | 46,8 | 46,7 | 0,5  |
| 43,3 | 43,9 | 44,4 | 44,7 | -1,4 | 46,0 | 46,3 | 48,2 | 46,3 | -0,3 |
| 42,8 | 42,4 | 42,3 | 42,5 | 0,3  | 46,0 | 45,7 | 45,9 | 45,0 | 0    |
| 41,0 | 40,7 | 40,7 |      |      | 45,0 | 45,7 | 45,8 |      |      |
| 38,2 | 38,9 |      |      |      | 46,0 | 46,0 |      |      |      |
| 37,5 |      |      |      |      | 47,0 |      |      |      |      |

2. Вычисляется коэффициент ковариации дебита и давления

$$r_{qp} = \frac{\sum_{i=1}^N (q_i - \bar{q})(p_i - \bar{p})}{(N-1)}$$

и дисперсия давления

$$\sigma_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2}{(N-1)}$$

Суммирование в последних формулах производится по всем точкам имеющихся выборок.

В рассматриваемом случае имеем

$$\begin{aligned} r_{qp} &= (0,46 - 0,6 - 1,48 + \dots - 0,57 + 0,42 + 0) / 21 = \\ &= -0,28 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{сут}} \cdot \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \right), \quad \sigma_p^2 = (0,01 + 0,16 + 0,16 + \dots \\ &+ \dots + 0,09 + 0,09 + 0) / 21 = 0,21 \left( \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \right)^2 \end{aligned}$$

3. Используя формулу (4.3) оцениваем величину коэффициента продуктивности скважины

$$C = \frac{0,28}{0,21} = 1,33 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{сут.} \cdot \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}} \right).$$

#### 4.2. Метод оценки величины текущего пластового давления и коэффициента продуктивности по данным эксплуатации скважин.

Обычно пластовое давление измеряют в остановленной скважине, а коэффициент продуктивности определяют в результате гидродинамических исследований методом установившихся отборов.

Предлагается методика оценки величины текущего пластового давления и продуктивности скважины по данным замеров установившихся дебитов и забойного давления через равные промежутки времени в работающей скважине. Методика основана на применении метода статистического дифференцирования для обработки данных замеров дебитов и забойных давлений. Предполагается, что эти величины являются функциями времени, представляющими собой совокупность случайных и неслучайных составляющих. Статистическое дифференцирование выполняется интегральными методами (в промышленной практике приемлемые результаты дает численное интегрирование), что позволяет уменьшить ошибку при определении искомых параметров. Предполагается также, что пластовое давление изменяется во времени по закону, близкому к линейному, при незначительном колебании коэффициента продуктивности.

Основные исходные уравнения

$$\gamma [P_1(t) - P_2(t)] = Q(t), \quad (a)$$

$$P_2(t) = P_0 - \alpha t, \quad (b) \quad (4.4)$$

$$\Delta P(t) = P_0 - P_2(t), \quad (v)$$

где  $h$  и  $P_1(t)$  - соответственно коэффициент продуктивности и текущая величина пластового давления, подлежащие определению;  $P_0$  - известная величина пластового давления при  $t = 0$ ;  $P_2(t)$  и  $Q(t)$  - забойное давление и соответствующий ему установившийся дебит, измеряемые через равные промежутки времени;  $\alpha$  - коэффициент изменения пластового давления, также подлежащий определению.

Три уравнения (4.4) сводятся к одному

$$\Delta P(t) - \alpha t = \frac{1}{h} Q(t) \quad (4.5)$$

Затем уравнение (4.5) статистически дифференцируется 2 раза. В результате получается система двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными, решив которую, имеем основные формулы для определения значений  $\alpha$  и  $h$ .

$$\alpha = \frac{Q_{\varphi} \left( \frac{d\Delta P}{dt} \right)_{\varphi} - \Delta P_{\varphi} \left( \frac{dQ}{dt} \right)_{\varphi}}{Q_{\varphi} - t_{\varphi} \left( \frac{dQ}{dt} \right)_{\varphi}} \quad (a)$$

$$h = \frac{Q_{\varphi} - t_{\varphi} \left( \frac{dQ}{dt} \right)_{\varphi}}{\Delta P_{\varphi} - t_{\varphi} \left( \frac{d\Delta P}{dt} \right)_{\varphi}} \quad (б)$$

где величины с индексом  $\varphi$  - нулевые и первые статистические производные от  $Q$ ,  $\Delta P$ ,  $t$ .

После определения параметра " $\alpha$ " по формуле (4.4 б) находится величина текущего пластового давления.

Значения статистических производных зависят от промежутка времени, прошедшего после определения  $P_0$  и  $h$  обычными методами. Порядок вычисления статистических производных, а также численное проведение всех необходимых расчетов показано в практическом примере.



Практический пример определения величины текущего пластового давления и коэффициента продуктивности .

Требуется найти величины текущего пластового давления  $P_T(t)$  и коэффициент продуктивности через  $T = 5$  месяцев после их определения обычными методами.

Разбиваем данный промежуток времени, называемый интервалом памяти на 5 равных частей  $\Delta t_i$ , каждая из которых равна 1 месяцу.

Для решения поставленной задачи необходимо сделать 5 замеров забойного давления  $P_{2i}$  и соответствующих установившихся дебитов  $Q_i$  в середине каждого из 5 месяцев. Иными словами, нужно делать 5 замеров названных выше параметров через 0,5 ; 1,5 ; 2,5 ; 3,5 ; 4,5 месяца после определения  $P_0$  и  $\eta$ . Индекс  $i$  меняется от 1 до 5 и обозначает порядковый номер рассматриваемой величины.

Обработка данных замеров производится в следующем порядке.

Предварительно вычисляются 5 значений  $\Delta P_i = P_0 - P_{2i}$  и по 5 значений каждой весовой функции  $K_{0i}$  и  $K_{1i}$  в соответствии с формулами

$$K_{0i} = \frac{4}{T} - \frac{6}{T^2} t_{1i} \quad (a)$$

$$K_{1i} = \frac{6}{T^2} - \frac{12}{T^3} t_{1i} \quad (б)$$

Заметим, что  $t_{1i} = 4,5 ; 3,5 ; 2,5 ; 1,5 ; 0,5$  месяца.

Так, для одной из скважин Речицкого месторождения БССР  $P_0 = 242$  ат,  $P_{21} = 199$  ат, следовательно

$$P_1 = 242 \text{ ат} - 199 \text{ ат} = 43 \text{ ат}$$

$$K_{0I} = \frac{4}{5} - \frac{6}{25} \cdot 4,5 = 0,28 \left( \frac{I}{\text{мес}} \right)$$

$$K_{II} = \frac{6}{25} - \frac{12}{125} \cdot 4,5 = -0,192 \frac{I}{\text{мес}^2}$$

Последовательность остальных расчетов показана в таблице 4.2. Текущее пластовое давление  $P_I$  и продуктивность  $\bar{q}$  определялись через 5 месяцев после определения  $P_0$  и  $\bar{q}$  общими методами.

Таблица 4.2.

| № п/п | Параметры                               |                     | Месяцы |        |       |       |       | Примечание   |
|-------|---|---------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--|
|       |   |                     | I      | 2      | 3     | 4     | 5     |  |
| 1     | $Q_{\perp}$                             | т/сут               | 225    | 158,6  | 172,1 | 181   | 150,3 |  |
| 2     | $P_{2i}$                                | кгс/см <sup>2</sup> | 199    | 209    | 200   | 192   | 191   |  |
| 3     | $\Delta P_i$                            | кгс/см <sup>2</sup> | 43     | 33     | 42    | 50    | 51    |  |
| 4     | $K_{0i}$                                | I/мес               | -0,28  | -0,04  | 0,2   | 0,44  | 0,68  |  |
| 5     | $K_{1i}$                                | I/мес <sup>2</sup>  | -0,192 | -0,096 | 0     | 0,096 | 0,192 | $\Sigma$   |
| 6     | $Q K_{0i} \Delta t_{\perp}$             |                     | -63    | -6,34  | 34,42 | 79,64 | 102,2 | $Q_{\varphi} = 146,92$                               |
| 7     | $Q K_{1i} \Delta t_{\perp}$             |                     | -43,2  | -15,23 | 0     | 17,36 | 28,86 | $\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\varphi} = 12,10$       |
| 8     | $\Delta P K_{0i} \Delta t_{\perp}$      |                     | -12,04 | -1,32  | 8,4   | 22,0  | 34,68 | $\Delta P_{\varphi} = 51,72$                         |
| 9     | $\Delta P K_{1i} \Delta t_{\perp}$      |                     | -3,26  | -3,17  | 0     | 4,8   | 9,79  | $\left(\frac{d\Delta P}{dt}\right)_{\varphi} = 3,16$ |
| 10    | $(T-t_{\perp}) K_{0i} \Delta t_{\perp}$ |                     | -0,14  | -0,06  | 0,5   | 1,54  | 3,06  | $t_{\varphi} = 4,9$                                  |

Суммируя результаты вычислений по горизонтальным строкам (6, 7, 8, 9, 10), находим значения соответствующих статистических производных  $Q_{\varphi}$ ,  $\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{\varphi}$ ,  $\Delta P_{\varphi}$ ,  $\left(\frac{d\Delta P}{dt}\right)_{\varphi}$ ,  $t_{\varphi}$ .  
по формулам (4.6) находим  $a$  и  $\eta$ .

$$a = \frac{146,92 \cdot 3,16 + 51,72 \cdot 12,19}{146,92 + 4,9 \cdot 12,19} \approx 5,29 \quad \text{ат/мес};$$

$$b = \frac{146,92 + 4,9 \cdot 12,19}{51,72 - 4,9 \cdot 3,16} \approx 5,7 \quad \frac{\text{т}}{\text{ат} \cdot \text{сут}};$$

а затем  $P_1(t) = 242 - 5,29 \cdot 5 = 215,6$  (ат)

Замер пластового давления, произведенный примерно в то же время, показал 214 ат. Отклонение величины коэффициента продуктивности не превышало 3-4 % от значения его, определяемого методом установившихся отборов.

Упрощенный метод оценки  $P_2(t)$  и  $b$

Уравнение (4,5) можно представить в виде

$$\frac{\Delta P(t)}{Q} = a \frac{t}{Q} + \frac{1}{b}. \quad (4.8)$$

Отсюда видно, что  $\frac{\Delta P(t)}{Q}$  и  $\frac{t}{Q}$  связаны между собой линейно. Поэтому, если будет установлена линейная зависимость между этими параметрами для какойнибудь скважины, то в этом случае определение величины текущего пластового давления и продуктивности упростится.

Графоаналитическим способом определяются параметры  $a$  и  $b$  а затем по формуле (4.4б) находится  $P_2(t)$ .

Порядок расчета показан в числовом примере.

1) На основании имеющихся замеров среднесуточных дебитов и соответствующих забойных давлений строятся графики их изменения, представленные на рис. 4.1.

2) Вычисляются несколько значений  $\frac{\Delta P}{Q}$  и соответствующих им  $\frac{t}{Q}$ . В нашем примере  $P_0 = 507$  ат.

Соответствующее  $\Delta p_i$  находим по формуле (4.43). Значения  $P_{2i}$  и  $Q_i$  снимались с соответствующих кривых рис. 4.1.

Все необходимые вычисления приводятся в таблице 4.3.

Таблица 4.3

| $\frac{\Delta p}{Q} = \frac{P_0 - P_2}{Q}$ | $\frac{\Delta T}{T/\text{сут.}}$ | $\frac{t}{Q}$             | $\frac{\text{мсс}}{T/\text{сут}}$ |
|--|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| $\frac{307 - 258}{169} = 0,29$             |                                  | $\frac{0,5}{169} = 0,003$ |                                   |
| $\frac{307 - 243}{167} = 0,38$             |                                  | $\frac{1,5}{167} = 0,009$ |                                   |
| $\frac{307 - 230}{164} = 0,47$             |                                  | $\frac{2,5}{164} = 0,015$ |                                   |
| $\frac{307 - 221}{162} = 0,53$             |                                  | $\frac{3,5}{162} = 0,22$  |                                   |

3) Строится график зависимости  $\frac{\Delta p_i}{Q}$  от  $\frac{t_i}{Q}$  и по нему графически определяются  $\frac{1}{h}$  и  $a$ . На рис. 5.2  $a = \text{tg } \alpha$  - угол наклона прямой к оси  $\frac{t}{Q}$ ,

$\frac{1}{h}$  - отрезок АВ оси  $\frac{\Delta p}{Q}$ .

$$a = \frac{0,58 - 0,25}{0,025} = 13,2; \quad \frac{1}{h} = 0,25$$

4) Определяется по формуле (4.45)  $P_2(t)$ , текущее пластовое давление

$$P_2(t) = 307 - 4 \times 13,2 = 254 \text{ (ат)}$$

$$h = 4 \frac{T}{\Delta T \cdot \text{сут}}$$

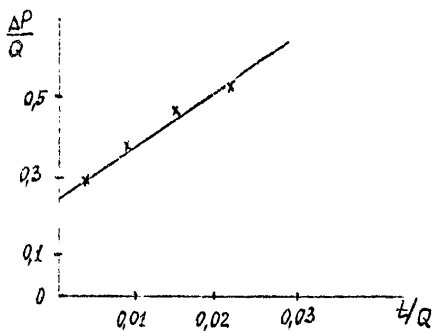
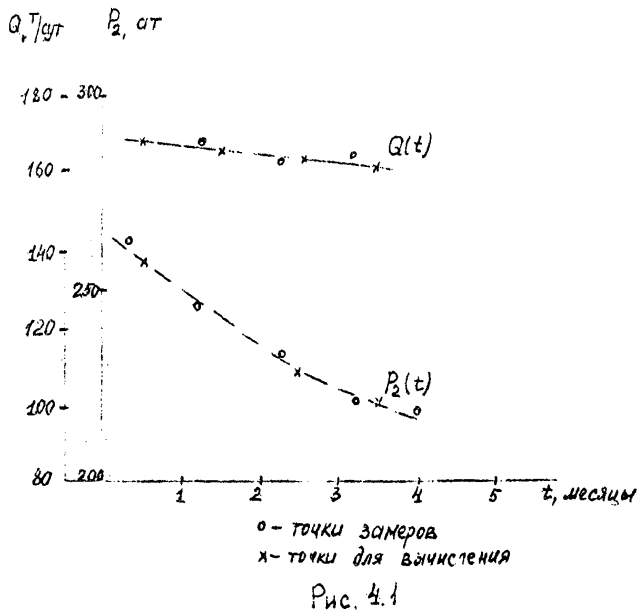


Рис. 4.2

## 5. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ НЕПЬЗОНОВСКИХ СВОЙСТВ ПЛАСТОВЫМИ СИСТЕМАМИ ПО ДАННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СКВАЖИН.

### 5.1. Краткие теоретические основы метода.

Причиной, обуславливающей аномально длительное запаздывание реагирования эксплуатационных скважин на закачку воды, в частности, может быть проявление в пластовых условиях начального градиента давления (НГД). В этом случае реагирование эксплуатационных скважин на закачку воды начнется лишь тогда, когда давление на линии нагнетания повысится до такой величины, при которой депрессия между линиями нагнетательных и эксплуатационных скважин станет достаточной для преодоления НГД. Зная величину этой депрессии и расстояния между скважинами, можно оценить величину НГД, характерного для рассматриваемого участка залежи. С этой целью сопоставляют расчетные (вычисленные по формулам упругого режима) и фактические значения величин времени запаздывания реагирования эксплуатационных скважин на закачку воды на различных участках залежи.

Если действительные значения времени запаздывания реагирования значительно превышают вычисленные времена, то можно предположить, что на рассматриваемых участках залежи проявляется начальный градиент давления.

Таким образом, изучаемую залежь можно дифференцировать на участки, на которых проявляется начальный градиент давления и не проявляется, а также оценить его величину.

Отметим, что сама по себе величина времени запаздывания не является универсальным признаком диагностирования наличия начального градиента давления и может быть использована лишь в комплексе с

результатами других лабораторных и промышленных исследований, которые позволили бы однозначно объяснить причину аномального запаздывания реагирования эксплуатационных скважин на закачку только проявлением структурно-механических свойств в рассматриваемой пластовой системе, т.е. наличием начального градиента давления.

Приближенно оценить теоретические времена запаздывания можно по формуле

$$t = \frac{L^2}{2,25 \kappa} \quad (5.1)$$

где  $t$  - теоретическое время запаздывания,  $L$  - расстояние между нагнетательной и эксплуатационной скважинами,  $\kappa$  - коэффициент проницаемости изучаемого участка залежи.

Для оценки фактического времени запаздывания необходимо зафиксировать момент начала реагирования эксплуатационных скважин на закачку воды. Это можно сделать различными способами, например, по кривым изменения пластового давления во времени, построенным на основании имеющихся замеров в нагнетательных и эксплуатационных скважинах, ближайших к нагнетательным.

Однако для этого необходимо измерять пластовое давление достаточно часто в большом количестве скважин в течение длительного периода времени как до, так и после начала нагнетания воды в пласт, что не всегда возможно осуществить по техническим, экономическим, климатическим и другим причинам. Поэтому оценивать фактическое время запаздывания целесообразней по данным изменения во времени темпа нагнетания воды и отбора жидкости, воспользовавшись для этой цели аппаратом взаимнокорреляционных функций. При этом изменение во времени расхода закачиваемой в пласт воды  $x(t)$  и дебита добываемой нефти  $y(t)$  рассматриваются как

случайные функции, представленные временными рядами, полученными в результате дискретных замеров соответствующих величин. Взаимокорреляционная функция  $R_{xy}$  характеризует степень коррелированности ординаты функции  $x(t)$  в момент времени  $t_1$  с ординатой функции  $y(t)$ , взятой в момент времени  $t_2$ . Поэтому по значению максимума  $R_{xy}$  можно зафиксировать момент начала реагирования, а, следовательно, определить время запаздывания.

Значения  $R_{xy}$  вычисляются по формуле

$$R_{xy} = \frac{1}{\sigma_{xy}(N-l+1)} \sum_{j=1}^{N-l+1} [x(t_j) - \bar{x}(t_j)] [y(t_{j+l-1}) - \bar{y}(t_{j+l-1})] \quad (5.2)$$

где  $R_{xy}$  - значения взаимокорреляционной функции;  $x_t$  - значения функции изменения расхода закачиваемой в пласт воды во времени;  $y(t)$  - значение функции изменения дебита добываемой нефти;  $\bar{x}_t$  и  $\bar{y}_t$  - сглаженные значения соответствующих величин.

Следя [4] значения  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  получают методом тройного сглаживания имеющейся выборки данных. Однократное сглаживание осуществляется по формуле

$$\bar{x}(t_j) = \frac{x(t_{j-1}) + x(t_j) + x(t_{j+1}))}{3}; \quad (5.3)$$

$N$  - число полученных значений стационарных случайных величин после тройного сглаживания существующих промышленных данных

$$\sigma_{xy}^2 = \sqrt{\sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2},$$

где

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [x(t_j) - \bar{x}(t_j)]^2$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [y(t_j) - \bar{y}(t_j)]^2.$$



### 5.2. Практический пример расчета теоретического и фактического времени запаздывания.

В качестве примера изучим характер взаимодействия эксплуатационных и нагнетательных скважин ХП горизонта месторождения Узень.

Требуется рассчитать теоретическое и фактическое время запаздывания реагирования добывающей скважины 229 на закачку воды в нагнетательную скважину 260.

Нагнетательная скважина 260 и эксплуатационная скважина первого ряда 229 расположены в приконтурной зоне, расстояние между ними 700 м, коэффициент пьезопроводности по данным гидродинамических исследований  $\mathcal{K} = 250 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$ .

Вычисляем по формуле (5.1) теоретическое время запаздывания реагирования

$$t = \frac{700^2 \cdot 100^2}{2,25 \cdot 250} = 87 \cdot 10^5 \text{ сек} = 3,4 \text{ мес.}$$

Фактическое время запаздывания оценим по формуле (5.2).

Данные об изменении во времени темпа нагнетания воды  $x(t)$  в скважину 260 и дебита добываемой нефти из скважины 229  $y(t)$  приведены на рис.5.1.

В таблице 5.1 показан порядок вычисления сглаженных значений величины  $x(t)$

Таблица 5.1.

Вычисление сглаженных значений величины  $x(t)$

| Месяцы | Темп нагнетания воды<br>$x(t)$ , м <sup>3</sup> /сут | Сглаженные значения |           |           |
|--------|--|---------------------|-----------|-----------|
|        |  | $\bar{x}$           | $\bar{y}$ | $\bar{x}$ |
| 1      | 132,7  |                     |           |           |
| 2      | 278,1  | 236,9               |           |           |
| 3      | 300  | 303,2               | 289,3     |           |
| 4      | 328,4  | 328,7               | 317,6     | 311       |
| 5      | 357,7  | 322                 | 326       |           |
| 6      | 280  | 327,2               |           |           |
| 7      | 344  |                     |           |           |

$$\bar{x}_1 = \frac{132,7 + 278,1 + 300}{3} = 236,9$$

.. .. .. .. ..

$$\bar{x}_2 = \frac{236,9 + 302,2 + 328,7}{3} = 289,3$$

.. .. .. .. ..

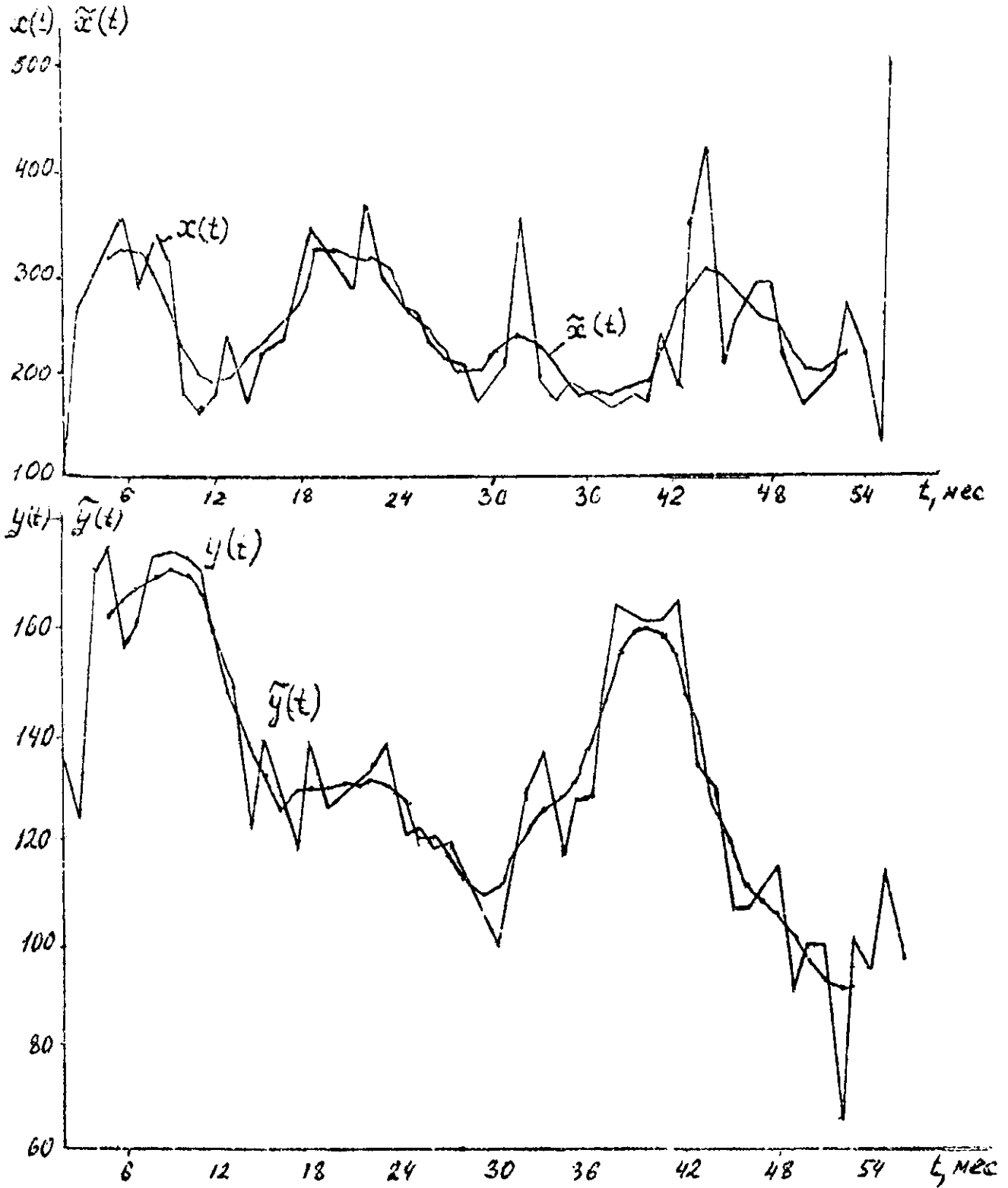
$$\bar{x}_3 = \frac{289,3 + 317,6 + 326}{3} = 311$$

Аналогично вычисляются и smoothed значения величин:  $y(t)$  стационарные составляющие случайных величин  $x(t)$  и  $y(t)$  приведены на рис. 5.1.

Взаимнокорреляционная функция  $R_{xy}$  показана на рис.5.2. Она имеет максимум через время сдвига равное 10 месяцам.

Таким образом фактическое время запаздывания начала реагирования скважины 260 на закачку воды равно 10 месяцам, что значительно превышает его теоретическую величину. Следовательно на данном участке залежи могут проявляться структурно-механические свойства пластовой системы (начальный градиент давлений).

48 a.



PNC. 5.1

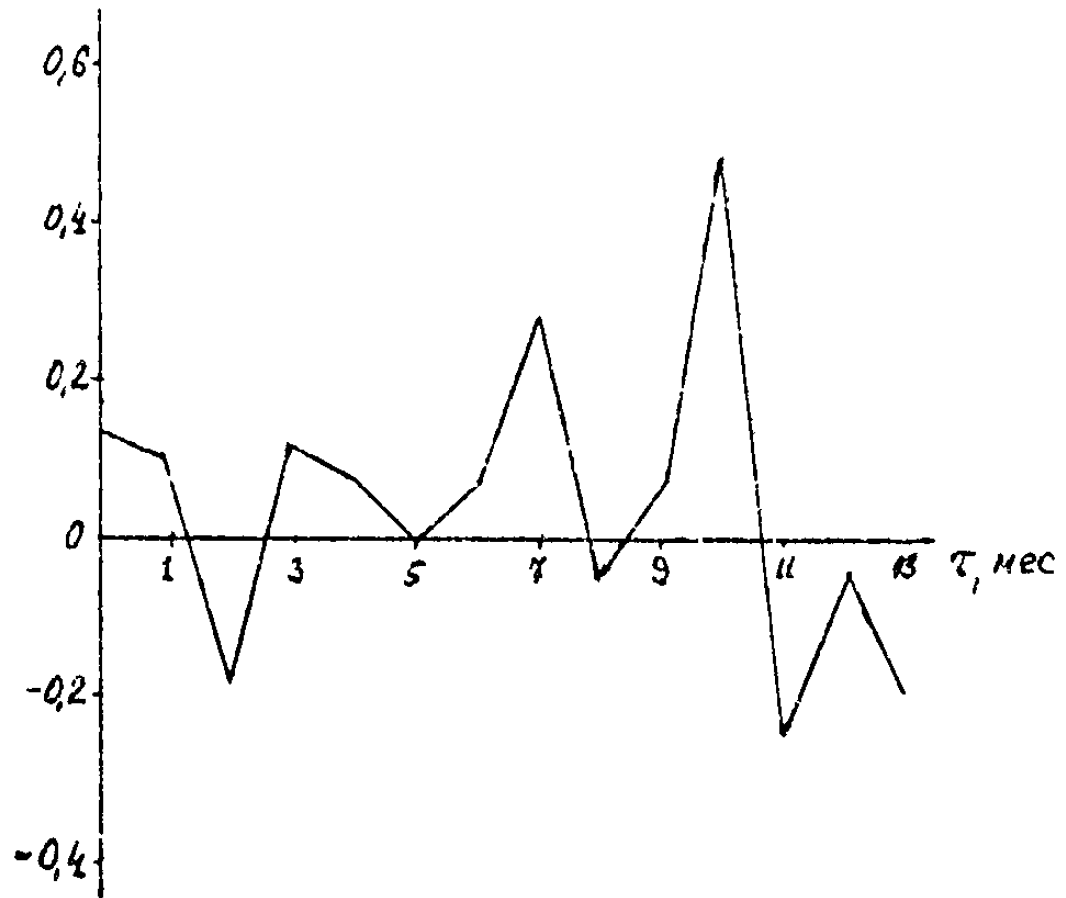


Рис. 5.2

## 6. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ КОМПРЕССОРНЫХ СКВАЖИН .

Общепринятым в нефтепромысловой практике методом установления оптимального режима работы компрессорных скважин является построение зависимости объема добываемой жидкости от расхода газа с последующим выбором точки, соответствующей оптимальному удельному расходу газа. Такой подход требует исследования скважин на различных режимах, что в случае высокодебитных скважин связано со значительными потерями в добыче нефти.

В настоящем разделе предлагается методика расчёта оптимального режима работы по сокращенной программе исследований скважин. Следует выделить 4 основных этапа такого подхода :

I. Сбор и подготовка промысловых данных.

II. Объединение анализируемых скважин в группы по признаку близости их дебитов, объемов закачиваемого газа и характерным особенностям технологических режимов. В ряде случаев это позволит распространять результаты анализа режимов работы одной или нескольких скважин на группу в целом.

III. Установление необходимого времени исследования работы скважины на каждом режиме, при котором погрешность замеренных значений технологических параметров (дебит жидкости, рабочее давление, расход газа и др.) по сравнению со среднесуточными значениями не превышают требуемой величины.

IV. Определение по данным сокращенных исследований расчетной формулы для оценки дебита жидкости в процессе обучения и проверка возможности использования ее при сравнении со среднесуточными показателями.

Последовательное применение сформулированных принципов анализа различных технологических режимов позволит ускорить вывод скважины на оптимальный режим работы, а также сократить объем проводимых исследований, потери добычи нефти и производительный расход газа.

Ниже приводятся конкретные примеры расчетов по всем пяти этапам применительно к некоторым скважинам объединения "Азнефть"

1. На первом этапе сбор промысловых данных проводится в процессе нормальной эксплуатации скважин.

1. Измерения количества жидкости в продукции компрессорных скважин.

2. Количество нефти в продукции компрессорных скважин.

3. Измерения рабочего и устьевого давления.

4. Измерения расхода закачиваемого агента.

5. Данные технологических режимов (диаметр эксплуатационной колонны, характеристики конструкций лифта, диаметр штуцера, газовый фактор).

Для выполнения третьего и четвертого этапов измерения указанных технологических параметров в процессе обучения, для части скважин следует производить в индивидуальном режиме, фиксируя их достаточно короткие промежутки времени.

В основу расчетов брались промысловые данные компрессорных скважин № № 1736, 1723, 1706, 1655, 1717, 1660, 1669 НГДУ "Орджоникидзенефть" ПО "Азнефть" Азербайджанской ССР. Таблицы 6.1 - 6,7.

Таблица 6. I.

| № №<br>ПП | $Q_H$<br>т/сут | $P_y$<br>кг/см <sup>2</sup> | $P_{раб}$<br>кг/см <sup>2</sup> | $Q_T$<br>м <sup>3</sup> /час | № №<br>ПП | $Q_H$<br>т/сут | $P_y$<br>кг/см <sup>2</sup> | $P_{раб}$<br>кг/см <sup>2</sup> | $Q_T$<br>м <sup>3</sup> /час |
|-----------|----------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------|----------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 1         | 12,34          | 12,4                        | 44,4                            | 46,0                         | 25        | 12,25          | 9,8                         | 44,2                            | 46,0                         |
| 2         | 6,48           | 10,0                        | 32,2                            | 44,0                         | 26        | 15,46          | 10,3                        | 48,4                            | 46,0                         |
| 3         | 8,31           | 10,2                        | 34,6                            | 46,0                         | 27        | 13,84          | 8,8                         | 48,4                            | 46,0                         |
| 4         | 7,23           | 10,8                        | 36,5                            | 40,0                         | 28        | 12,78          | 7,2                         | 44,4                            | 46,0                         |
| 5         | 8,52           | 8,8                         | 49,4                            | 35,0                         | 29        | 15,36          | 6,4                         | 48,4                            | 46,0                         |
| 6         | 8,38           | 8,8                         | 36,4                            | 40,0                         | 30        | 10,64          | 5,2                         | 42,2                            | 46,0                         |
| 7         | 9,11           | 9,6                         | 34,4                            | 48,8                         | 31        | 10,21          | 8,6                         | 40,6                            | 46,0                         |
| 8         | 7,50           | 9,8                         | 34,2                            | 44,0                         | 32        | 12,56          | 10,6                        | 44,4                            | 46,0                         |
| 9         | 8,21           | 11,2                        | 37,6                            | 42,2                         | 33        | 9,68           | 9,2                         | 42,8                            | 44,0                         |
| 10        | 8,84           | 10,4                        | 40,6                            | 44,0                         | 34        | 10,91          | 12,0                        | 42,2                            | 44,0                         |
| 11        | 10,56          | 9,0                         | 38,8                            | 46,0                         | 35        | 12,34          | 12,8                        | 42,2                            | 46,8                         |
| 12        | 7,32           | 10,2                        | 34,4                            | 46,0                         | 36        | 10,84          | 11,3                        | 36,8                            | 50,0                         |
| 13        | 9,46           | 11,2                        | 38,8                            | 46,0                         | 37        | 10,32          | 11,4                        | 36,8                            | 50,0                         |
| 14        | 8,66           | 10,2                        | 36,0                            | 46,0                         | 38        | 11,11          | 12,0                        | 38,8                            | 50,0                         |
| 15        | 8,88           | 11,2                        | 46,0                            | 36,0                         | 39        | 12,28          | 16,0                        | 44,4                            | 50,0                         |
| 16        | 10,21          | 11,8                        | 36,8                            | 50,0                         | 40        | 13,77          | 16,4                        | 44,4                            | 48,8                         |
| 17        | 6,24           | 9,6                         | 34,2                            | 40,0                         | 41        | 11,08          | 15,8                        | 41,3                            | 48,2                         |
| 18        | 6,26           | 11,3                        | 32,2                            | 44,2                         | 42        | 12,21          | 10,2                        | 46,8                            | 42,0                         |
| 19        | 6,40           | 6,8                         | 28,8                            | 46,0                         | 43        | 10,17          | 10,8                        | 46,8                            | 38,0                         |
| 20        | 6,44           | 7,2                         | 28,8                            | 46,0                         | 44        | 11,00          | 12,4                        | 46,0                            | 40,0                         |
| 21        | 7,24           | 5,0                         | 32,5                            | 46,0                         | 45        | 14,22          | 6,4                         | 49,0                            | 44,0                         |
| 22        | 6,35           | 4,0                         | 30,6                            | 46,0                         | 46        | 12,24          | 5,8                         | 44,6                            | 46,0                         |
| 23        | 14,46          | 9,8                         | 48,8                            | 44,0                         | 47        | 11,11          | 5,4                         | 40,2                            | 46,0                         |
| 24        | 9,62           | 10,8                        | 38,8                            | 46,0                         | 48        | 9,68           | 5,2                         | 38,4                            | 46,0                         |

Таблица 6.2

| № №<br>ПП | Q <sub>н</sub><br>т/сут | P <sub>у</sub><br>кг/см <sup>2</sup> | P <sub>раб</sub><br>кг/см <sup>2</sup> | Q <sub>Г</sub><br>м <sup>3</sup> /ч | № №<br>ПП | Q <sub>н</sub><br>т/сут | P <sub>у</sub><br>кг/см <sup>2</sup> | P <sub>раб</sub><br>кг/см <sup>2</sup> | Q <sub>Г</sub><br>м <sup>3</sup> /час |
|-----------|-------------------------|--------------------------------------|--|-------------------------------------|-----------|-------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------------------|
| I         | 12,66                   | 2,6                                  | 42,2                                   | 50,0                                | 25        | 5,55                    | 5,2                                  | 34,2                                   | 40                                    |
| 2         | 7,82                    | 2,1                                  | 36,4                                   | 46,0                                | 26        | 6,32                    | 4,2                                  | 34,4                                   | 40,0                                  |
| 3         | 8,24                    | 2,2                                  | 36,2                                   | 46,0                                | 27        | 6,81                    | 3,8                                  | 36,2                                   | 40,0                                  |
| 4         | 7,77                    | 2,8                                  | 36,2                                   | 46,0                                | 28        | 6,94                    | 3,6                                  | 36,8                                   | 38,4                                  |
| 5         | 8,00                    | 3,4                                  | 36,2                                   | 46,0                                | 29        | 6,73                    | 5,4                                  | 38,8                                   | 38,4                                  |
| 6         | 8,68                    | 4,4                                  | 36,2                                   | 46,0                                | 30        | 8,14                    | 5,8                                  | 38,6                                   | 40,0                                  |
| 7         | 9,48                    | 4,8                                  | 38,4                                   | 44,0                                | 31        | 11,12                   | 6,4                                  | 42,4                                   | 44,4                                  |
| 8         | 7,86                    | 5,6                                  | 38,2                                   | 44,0                                | 32        | 11,85                   | 2,8                                  | 44,4                                   | 46,0                                  |
| 9         | 8,12                    | 6,2                                  | 36,2                                   | 46,0                                | 33        | 8,94                    | 1,6                                  | 36,0                                   | 46,0                                  |
| 10        | 9,06                    | 6,8                                  | 36,4                                   | 46,0                                | 34        | 8,31                    | 1,8                                  | 36,0                                   | 46,0                                  |
| 11        | 8,82                    | 7,4                                  | 36,8                                   | 46,0                                | 35        | 8,42                    | 2,2                                  | 36,0                                   | 46,0                                  |
| 12        | 7,94                    | 7,2                                  | 34,0                                   | 50,0                                | 36        | 8,24                    | 4,2                                  | 36,0                                   | 46,0                                  |
| 13        | 9,2                     | 6,8                                  | 34,0                                   | 50,0                                | 37        | 7,25                    | 6,4                                  | 36,0                                   | 44,4                                  |
| 14        | 8,88                    | 4,2                                  | 34,0                                   | 50,0                                | 38        | 7,84                    | 6,6                                  | 36,0                                   | 44,2                                  |
| 15        | 8,64                    | 3,2                                  | 34,0                                   | 50,0                                | 39        | 11,31                   | 7,8                                  | 44,4                                   | 46,0                                  |
| 16        | 8,55                    | 2,4                                  | 34,0                                   | 50,0                                | 40        | 13,54                   | 8,2                                  | 48,5                                   | 46,0                                  |
| 17        | 6,86                    | 3,8                                  | 34,0                                   | 42,0                                | 41        | 10,66                   | 6,8                                  | 42,2                                   | 46,0                                  |
| 18        | 6,12                    | 4,4                                  | 34,0                                   | 42,0                                | 42        | 12,79                   | 2,2                                  | 46,4                                   | 46,0                                  |
| 19        | 6,32                    | 6,8                                  | 34,0                                   | 40,0                                | 43        | 10,34                   | 4,2                                  | 40,2                                   | 46,0                                  |
| 20        | 6,78                    | 9,6                                  | 36,2                                   | 40,0                                | 44        | 9,38                    | 1,8                                  | 38,4                                   | 46,0                                  |
| 21        | 7,84                    | 7,2                                  | 36,2                                   | 40,0                                | 45        | 10,41                   | 4,2                                  | 40,2                                   | 46,0                                  |
| 22        | 6,56                    | 6,8                                  | 34,2                                   | 40,0                                | 46        | 10,50                   | 4,4                                  | 40,2                                   | 46,0                                  |
| 23        | 13,60                   | 5,8                                  | 42,2                                   | 48,4                                | 47        | 12,72                   | 7,2                                  | 42,2                                   | 50,0                                  |
| 24        | 10,36                   | 4,4                                  | 38,8                                   | 46,0                                | 48        | 12,87                   | 6,2                                  | 42,2                                   | 50,0                                  |



Таблица 6.3.

| № п/п | Q <sub>н</sub><br>т/сут | P <sub>у</sub><br>кг/см <sup>2</sup> | P <sub>раб</sub><br>кг/см <sup>2</sup> | Q <sub>г</sub><br>м <sup>3</sup> /ч | № п/п | Q <sub>н</sub><br>т/сут | P <sub>у</sub><br>кг/см <sup>2</sup> | P <sub>раб</sub><br>кг/см <sup>2</sup> | Q <sub>г</sub><br>м <sup>3</sup> /час |
|-------|-------------------------|--------------------------------------|--|-------------------------------------|-------|-------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------------------|
|       |                         |                                      |  |                                     |       |                         |                                      |  |                                       |
| 1     | 10,64                   | 9,0                                  | 44,0                                   | 41,0                                | 25    | 10,64                   | 12,0                                 | 44,5                                   | 41,0                                  |
| 2     | 13,80                   | 12,0                                 | 50,0                                   | 42,0                                | 26    | 13,67                   | 8,0                                  | 50,0                                   | 40,0                                  |
| 3     | 9,63                    | 8,4                                  | 45,0                                   | 38,0                                | 27    | 12,15                   | 8,0                                  | 49,0                                   | 40,0                                  |
| 4     | 8,20                    | 10,0                                 | 44,0                                   | 37,0                                | 28    | 10,00                   | 6,0                                  | 44,0                                   | 41,0                                  |
| 5     | 10,69                   | 12,0                                 | 46,0                                   | 41,0                                | 29    | 9,87                    | 6,8                                  | 45,0                                   | 40,0                                  |
| 6     | 8,06                    | 7,5                                  | 41,0                                   | 39,0                                | 30    | 10,55                   | 6,0                                  | 46,0                                   | 40,0                                  |
| 7     | 9,88                    | 8,0                                  | 45,0                                   | 40,0                                | 31    | 11,93                   | 10,0                                 | 49,0                                   | 40,0                                  |
| 8     | 8,47                    | 7,0                                  | 44,0                                   | 36,0                                | 32    | 11,06                   | 4,8                                  | 47,0                                   | 41,0                                  |
| 9     | 9,78                    | 10,0                                 | 44,5                                   | 39,0                                | 33    | 11,52                   | 6,8                                  | 47,0                                   | 40,0                                  |
| 10    | 9,13                    | 6,2                                  | 43,3                                   | 39,0                                | 34    | 11,55                   | 6,8                                  | 50,0                                   | 40,0                                  |
| 11    | 9,33                    | 9,0                                  | 43,6                                   | 40,0                                | 35    | 11,81                   | 6,0                                  | 48,0                                   | 41,0                                  |
| 12    | 8,54                    | 12,0                                 | 45,0                                   | 36,0                                | 36    | 11,25                   | 8,4                                  | 45,0                                   | 44,0                                  |
| 13    | 9,15                    | 14,0                                 | 45,0                                   | 39,0                                | 37    | 9,85                    | 6,8                                  | 45,0                                   | 39,0                                  |
| 14    | 8,98                    | 8,0                                  | 45,0                                   | 40,0                                | 38    | 9,78                    | 8,0                                  | 45,0                                   | 40,0                                  |
| 15    | 8,96                    | 4,8                                  | 45,0                                   | 37,0                                | 39    | 10,32                   | 11,6                                 | 47,0                                   | 40,0                                  |
| 16    | 8,54                    | 12,0                                 | 45,0                                   | 36,0                                | 40    | 11,54                   | 14,0                                 | 45,0                                   | 43,0                                  |
| 17    | 5,90                    | 10,4                                 | 44,4                                   | 29,0                                | 41    | 11,76                   | 25,2                                 | 47,0                                   | 42,0                                  |
| 18    | 8,00                    | 7,5                                  | 40,0                                   | 39,0                                | 42    | 12,13                   | 8,4                                  | 46,5                                   | 42,0                                  |
| 19    | 8,06                    | 7,5                                  | 41,0                                   | 39,0                                | 43    | 11,97                   | 11,2                                 | 46,5                                   | 42,0                                  |
| 20    | 9,17                    | 13,0                                 | 44,0                                   | 39,0                                | 44    | 10,43                   | 8,0                                  | 45,0                                   | 41,0                                  |
| 21    | 9,06                    | 16,0                                 | 45,0                                   | 39,0                                | 45    | 11,51                   | 6,0                                  | 46,0                                   | 41,0                                  |
| 22    | 8,20                    | 10,0                                 | 44,0                                   | 37,0                                | 46    | 10,74                   | 6,0                                  | 46,0                                   | 40,0                                  |
| 23    | 12,27                   | 4,8                                  | 47,0                                   | 43,0                                | 47    | 10,76                   | 7,6                                  | 45,0                                   | 40,0                                  |
| 24    | 10,00                   | 8,4                                  | 47,0                                   | 40,0                                | 48    | 10,58                   | 7,2                                  | 45,0                                   | 40,0                                  |

Таблица 6.4.

| №№<br>ПП | Q     | P <sub>y</sub>     | P <sub>раб</sub>   | Q <sub>Г</sub>    | №№<br>ПП | Q <sub>н</sub> | P <sub>y</sub>     | P <sub>раб</sub>   | Q <sub>Г</sub>      |
|----------|-------|--------------------|--------------------|-------------------|----------|----------------|--------------------|--------------------|---------------------|
|          | т/сут | кг/см <sup>2</sup> | кг/см <sup>2</sup> | м <sup>3</sup> /ч |          | т/сут          | кг/см <sup>2</sup> | кг/см <sup>2</sup> | м <sup>3</sup> /час |
| I        | 2     | 3                  | 4                  | 5                 | I        | 2              | 3                  | 4                  | 5                   |
| I        | 6,72  | 11,2               | 34,2               | 42,4              | 25       | 5,32           | 8,0                | 29,6               | 41,0                |
| 2        | 6,93  | 12,0               | 34,2               | 41,3              | 26       | 7,00           | 14,0               | 35,0               | 40,0                |
| 3        | 6,16  | 12,0               | 34,2               | 42,0              | 27       | 6,55           | 14,0               | 35,0               | 40,0                |
| 4        | 6,00  | 13,2               | 34,2               | 41,5              | 28       | 6,16           | 12,0               | 35,2               | 40,0                |
| 5        | 6,24  | 10,8               | 33,2               | 41,0              | 29       | 6,96           | 10,0               | 35,1               | 40,0                |
| 6        | 6,80  | 10,0               | 33,2               | 42,3              | 30       | 6,71           | 20,8               | 35,2               | 41,2                |
| 7        | 7,05  | 9,6                | 34,0               | 42,0              | 31       | 8,66           | 18,0               | 35,2               | 45,4                |
| 8        | 7,00  | 12,0               | 34,0               | 42,2              | 32       | 7,94           | 18,4               | 35,2               | 45,8                |
| 9        | 8,20  | 9,2                | 34,0               | 46,4              | 33       | 7,00           | 14,0               | 31,6               | 48,4                |
| 10       | 9,11  | 5,6                | 34,0               | 48,5              | 34       | 7,11           | 12,8               | 31,8               | 48,0                |
| 11       | 9,24  | 2,0                | 33,6               | 49,2              | 35       | 7,15           | 9,2                | 31,8               | 48,6                |
| 12       | 9,13  | 24,0               | 34,0               | 49,0              | 36       | 7,25           | 3,0                | 32,0               | 48,9                |
| 13       | 8,78  | 18,0               | 33,8               | 49,0              | 37       | 8,32           | 12,0               | 33,0               | 50,6                |
| 14       | 8,94  | 16,0               | 34,0               | 48,6              | 38       | 7,11           | 14,4               | 34,0               | 46,2                |
| 15       | 8,18  | 24,0               | 33,4               | 49,0              | 39       | 6,76           | 11,2               | 34,0               | 44,2                |
| 16       | 8,88  | 12,0               | 33,2               | 48,8              | 40       | 6,98           | 12,4               | 34,0               | 41,3                |
| 17       | 8,06  | 12,0               | 35,0               | 44,5              | 41       | 6,55           | 14,0               | 34,2               | 41,0                |
| 18       | 7,93  | 7,8                | 35,0               | 43,3              | 42       | 6,08           | 15,5               | 34,2               | 41,2                |
| 19       | 7,20  | 10,0               | 35,1               | 43,0              | 43       | 6,31           | 14,0               | 34,2               | 41,2                |
| 20       | 7,17  | 9,2                | 35,2               | 43,1              | 44       | 6,28           | 11,2               | 34,4               | 41,2                |
| 21       | 7,15  | 10,4               | 35,0               | 43,2              | 45       | 6,30           | 12,0               | 34,2               | 41,1                |
| 22       | 7,21  | 8,4                | 35,0               | 43,4              | 46       | 6,32           | 11,2               | 34,4               | 41,3                |
| 23       | 7,64  | 11,2               | 35,0               | 43,2              | 47       | 6,25           | 12,0               | 34,2               | 41,2                |
| 24       | 5,26  | 16,0               | 29,6               | 43,2              | 48       | 6,48           | 12,4               | 34,4               | 41,5                |

Таблица 6.5.

| № п/п | $Q_H$ | $P_y$              | $P_{раб}$          | $Q_T$             | № п/п | $Q_H$ | $P_y$              | $P_{раб}$          | $Q_T$               |
|-------|-------|--------------------|--------------------|-------------------|-------|-------|--------------------|--------------------|---------------------|
|       | т/сут | кг/см <sup>2</sup> | кг/см <sup>2</sup> | м <sup>3</sup> /ч |       | т/сут | кг/см <sup>2</sup> | кг/см <sup>2</sup> | м <sup>3</sup> /час |
| 1     | 2     | 3                  | 4                  | 5                 | 1     | 2     | 3                  | 4                  | 5                   |
| 1     | 4,85  | 2,5                | 35,0               | 35,0              | 25    | 6,56  | 1,5                | 32,0               | 35,0                |
| 2     | 4,80  | 1,8                | 31,4               | 35,0              | 26    | 5,24  | 4,9                | 35,6               | 34,8                |
| 3     | 5,10  | 1,5                | 31,3               | 35,0              | 27    | 6,52  | 1,3                | 38,7               | 35,0                |
| 4     | 4,45  | 2,1                | 31,2               | 33,2              | 28    | 7,36  | 3,3                | 44,7               | 35,2                |
| 5     | 4,54  | 3,0                | 31,3               | 31,9              | 29    | 7,12  | 1,5                | 44,0               | 35,1                |
| 6     | 4,50  | 2,5                | 34,6               | 31,0              | 30    | 5,15  | 2,5                | 31,5               | 35,5                |
| 7     | 4,60  | 1,7                | 35,0               | 30,5              | 31    | 5,15  | 2,0                | 35,6               | 35,1                |
| 8     | 4,72  | 2,0                | 35,0               | 30,5              | 32    | 6,00  | 1,2                | 38,5               | 35,0                |
| 9     | 4,60  | 2,8                | 35,0               | 28,6              | 33    | 5,00  | 1,2                | 38,6               | 35,2                |
| 10    | 4,12  | 2,7                | 35,5               | 27,5              | 34    | 6,40  | 1,2                | 40,2               | 35,1                |
| 11    | 4,06  | 3,0                | 35,5               | 26,4              | 35    | 6,75  | 2,0                | 40,0               | 35,4                |
| 12    | 4,00  | 2,8                | 36,1               | 26,3              | 36    | 6,60  | 1,2                | 40,0               | 35,0                |
| 13    | 3,61  | 3,7                | 30,2               | 28,7              | 37    | 5,93  | 1,5                | 39,8               | 35,0                |
| 14    | 4,33  | 2,7                | 34,7               | 28,0              | 38    | 6,65  | 2,3                | 40,0               | 35,2                |
| 15    | 4,90  | 2,4                | 38,8               | 30,0              | 39    | 6,00  | 1,3                | 40,0               | 34,8                |
| 16    | 5,54  | 2,0                | 41,0               | 30,0              | 40    | 7,00  | 1,2                | 44,2               | 34,8                |
| 17    | 5,92  | 1,2                | 40,6               | 32,6              | 41    | 7,12  | 2,0                | 44,2               | 34,8                |
| 18    | 6,66  | 4,5                | 42,8               | 33,8              | 42    | 6,78  | 1,5                | 44,0               | 34,0                |
| 19    | 6,74  | 5,0                | 42,5               | 34,0              | 43    | 6,44  | 1,3                | 42,1               | 35,9                |
| 20    | 6,90  | 3,0                | 43,0               | 34,0              | 44    | 4,55  | 1,8                | 32,5               | 31,8                |
| 21    | 6,24  | 1,1                | 42,5               | 34,2              | 45    | 5,12  | 1,0                | 32,1               | 34,7                |
| 22    | 5,90  | 1,3                | 40,4               | 34,1              | 46    | 4,31  | 2,0                | 32,0               | 34,8                |
| 23    | 5,75  | 3,5                | 38,5               | 34,2              | 47    | 5,50  | 1,5                | 31,5               | 35,0                |
| 24    | 4,21  | 1,0                | 32,1               | 34,3              | 48    | 5,50  | 1,0                | 31,5               | 35,5                |

Таблица 6.6.

| № №<br>п/п | $Q_H$ | $P_y$              | $P_{раб}$          | $Q_T$             | № №<br>п/п | $Q_H$ | $P_y$              | $P_{раб}$          | $Q_T$               |
|------------|-------|--------------------|--------------------|-------------------|------------|-------|--------------------|--------------------|---------------------|
|            | т/сут | кг/см <sup>2</sup> | кг/см <sup>2</sup> | м <sup>3</sup> /ч |            | т/сут | кг/см <sup>2</sup> | кг/см <sup>2</sup> | м <sup>3</sup> /час |
| I          | 2     | 3                  | 4                  | 5                 | 6          | 7     | 8                  | 9                  | 10                  |
| I          | 5,88  | 3,2                | 39,5               | 35,0              | 25         | 6,15  | 6,0                | 37,5               | 37,6                |
| 2          | 5,96  | 4,1                | 39,2               | 35,1              | 26         | 6,67  | 4,0                | 38,0               | 38,5                |
| 3          | 6,31  | 3,0                | 41,6               | 35,0              | 27         | 6,17  | 6,0                | 38,0               | 36,1                |
| 4          | 6,12  | 4,6                | 41,0               | 35,0              | 28         | 6,21  | 3,7                | 46,1               | 31,3                |
| 5          | 6,77  | 2,3                | 39,6               | 35,2              | 29         | 5,44  | 3,6                | 46,5               | 27,4                |
| 6          | 5,90  | 1,5                | 39,8               | 34,1              | 30         | 4,93  | 3,5                | 46,0               | 35,0                |
| 7          | 6,66  | 5,0                | 41,1               | 35,0              | 31         | 4,33  | 4,0                | 42,2               | 23,2                |
| 8          | 6,15  | 3,4                | 39,0               | 34,6              | 32         | 4,18  | 3,1                | 42,1               | 23,2                |
| 9          | 6,12  | 4,0                | 39,0               | 35,0              | 33         | 4,21  | 3,4                | 42,4               | 23,5                |
| 10         | 6,00  | 3,8                | 39,2               | 34,8              | 34         | 4,49  | 3,7                | 45,0               | 24,0                |
| 11         | 6,24  | 4,8                | 42,5               | 33,2              | 35         | 4,66  | 4,2                | 44,4               | 24,4                |
| 12         | 6,65  | 3,4                | 42,4               | 33,2              | 36         | 4,85  | 3,5                | 43,0               | 24,8                |
| 13         | 6,66  | 4,5                | 43,8               | 33,2              | 37         | 4,66  | 2,0                | 40,2               | 24,8                |
| 14         | 6,94  | 2,6                | 44,0               | 34,0              | 38         | 4,17  | 3,2                | 38,5               | 25,0                |
| 15         | 7,20  | 5,1                | 44,5               | 34,0              | 39         | 3,94  | 3,5                | 37,6               | 25,0                |
| 16         | 6,38  | 4,5                | 41,2               | 35,1              | 40         | 4,35  | 3,0                | 38,0               | 25,0                |
| 17         | 6,44  | 3,0                | 41,3               | 35,2              | 41         | 6,71  | 4,2                | 42,1               | 32,6                |
| 18         | 6,87  | 6,1                | 41,5               | 35,0              | 42         | 7,26  | 4,2                | 45,9               | 32,6                |
| 19         | 6,93  | 4,4                | 41,0               | 35,0              | 43         | 8,20  | 3,5                | 46,4               | 35,0                |
| 20         | 6,55  | 4,5                | 43,6               | 32,6              | 44         | 8,40  | 4,5                | 47,8               | 35,0                |
| 21         | 6,31  | 2,5                | 45,4               | 31,2              | 45         | 8,45  | 3,3                | 47,0               | 35,0                |
| 22         | 6,12  | 3,2                | 44,6               | 30,0              | 46         | 6,34  | 5,7                | 42,1               | 35,0                |
| 23         | 5,61  | 3,6                | 40,1               | 33,1              | 47         | 6,11  | 5,5                | 40,4               | 35,0                |
| 24         | 4,97  | 4,7                | 38,5               | 32,2              | 48         | 5,35  | 4,0                | 39,2               | 35,0                |

Таблица 6.7.

| № №<br>ПП | $Q_H$ | $P_y$              | $P_{раб}$          | $Q_T$               | № №<br>ПП | $Q_H$ | $P_y$              | $P_{раб}$          | $Q_T$               |
|-----------|-------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------|-------|--------------------|--------------------|---------------------|
|           | т/сут | кг/см <sup>2</sup> | кг/см <sup>2</sup> | м <sup>3</sup> /час |           | т/сут | кг/см <sup>2</sup> | кг/см <sup>2</sup> | м <sup>3</sup> /час |
| I         | 2     | 3                  | 4                  | 5                   | I         | 2     | 3                  | 4                  | 5                   |
| 1         | 12,80 | 4,6                | 36,0               | 56                  | 25        | 16,70 | 3,4                | 38,6               | 60                  |
| 2         | 9,86  | 3,6                | 32,4               | 55                  | 26        | 17,24 | 3,5                | 39,8               | 60                  |
| 3         | 8,50  | 3,5                | 32,4               | 50                  | 27        | 18,52 | 3,5                | 41,4               | 60                  |
| 4         | 10,46 | 2,6                | 36,0               | 53                  | 28        | 15,10 | 2,6                | 36,2               | 60                  |
| 5         | 11,00 | 3,7                | 36,8               | 52                  | 29        | 19,35 | 3,8                | 42,8               | 60                  |
| 6         | 11,82 | 3,1                | 37,2               | 52                  | 30        | 16,05 | 4,0                | 38,8               | 58                  |
| 7         | 12,06 | 2,8                | 36,4               | 56                  | 31        | 20,55 | 5,5                | 45,7               | 58                  |
| 8         | 12,25 | 3,3                | 36,6               | 57                  | 32        | 8,46  | 1,8                | 2,84               | 58                  |
| 9         | 15,48 | 3,6                | 40,4               | 56                  | 33        | 6,48  | 1,5                | 2,84               | 57                  |
| 10        | 15,24 | 3,5                | 40,2               | 57                  | 34        | 5,00  | 3,9                | 28,2               | 55                  |
| 11        | 12,18 | 3,4                | 36,8               | 56                  | 35        | 20,00 | 4,5                | 45,8               | 56                  |
| 12        | 11,78 | 2,6                | 34,7               | 57                  | 36        | 23,23 | 6,4                | 48,6               | 56                  |
| 13        | 10,20 | 1,6                | 32,4               | 57                  | 37        | 18,60 | 4,1                | 43,4               | 56                  |
| 14        | 12,70 | 2,7                | 36,6               | 57                  | 38        | 17,00 | 3,1                | 41,4               | 56                  |
| 15        | 14,50 | 3,5                | 38,4               | 57                  | 39        | 15,10 | 3,1                | 42,0               | 52                  |
| 16        | 17,55 | 3,9                | 42,2               | 57                  | 40        | 24,25 | 6,9                | 50,0               | 54                  |
| 17        | 21,78 | 4,2                | 46,4               | 60                  | 41        | 25,56 | 10,2               | 50,0               | 52                  |
| 18        | 21,00 | 4,2                | 46,0               | 60                  | 42        | 29,60 | 9,9                | 50,0               | 54                  |
| 19        | 22,80 | 3,7                | 46,0               | 60                  | 43        | 30,12 | 9,0                | 58,5               | 56                  |
| 20        | 18,50 | 3,6                | 42,4               | 60                  | 44        | 27,78 | 8,1                | 56,4               | 56                  |
| 21        | 18,50 | 3,6                | 42,2               | 60                  | 45        | 20,62 | 7,1                | 50,2               | 50                  |
| 22        | 15,24 | 2,6                | 36,8               | 60                  | 46        | 16,12 | 5,7                | 46,4               | 50                  |
| 23        | 15,00 | 2,8                | 36,2               | 60                  | 47        | 15,48 | 4,3                | 46,0               | 50                  |
| 24        | 18,48 | 3,7                | 40,2               | 60                  | 48        | 12,00 | 3,8                | 41,2               | 50                  |

II. Группирование скважин можно произвести на основе применения непараметрических критериев.

Параметрические критерии включают предположение о том, что исследуемые случайные величины распределены по некоторому известному закону, как правило, по нормальному.

Исследование выборок без предварительного знания вида распределений может привести к неверным выводам. Поэтому разработаны непараметрические критерии распознавания, которые не зависят от формы распределения. Эти критерии также называются критериями с произвольным распределением.

Данные критерии применимы для выборок непрерывных величин. Их можно использовать при проверке гипотез для того, чтобы найти интервальную или даже точечную оценку параметров.

При параметрических критериях вместо вида распределения исследуются относительные характеристики выборок: ранги, инверсии, серии, знаки и т.д. При распределении, близком нормальному, непараметрические критерии дают результаты, близкие критерию  $t$  (критерий Стьюдента).

Рассмотрим применение некоторых из основных непараметрических критериев для задачи группирования компрессорных скважин, распознавание их по технологическим режимам.

#### Критерий Уилкоксона - Манна - Уитни

Среди непараметрических критериев критерий  $U^*$  является наиболее мощным критерием, заменяющим критерий  $t$ . Этот общий метод, впервые предложенный Уилкоксоном и другими, был усовершенствован и представлен в форме таблиц Манном и Уитни. Он может быть применен для проверки идентичности двух совокупностей.

Пусть изменяются две выборки размеров  $M$  и  $N$ , где  $M \leq N$ . Упорядочим выборочные значения обеих выборок в одну последовательность длины  $P = M + N$ . Припишем наименьшему наблюдению в этой упорядоченной последовательности ранг 1, а следующим — ранги в возрастающем порядке.

Пусть  $R$  — сумма рангов, приписанных наблюдениям из выборки размера  $M$ .

Образуем статистику  $U^*$ :

$$U^* = MN + \frac{M(M+1)}{2} - R \quad (6.1)$$

Способ определения значимости статистики  $U^*$  зависит от значения размера  $N$ . При этом существуют три возможности:

1. Если  $N$  не превосходит 8, следует вычислить  $U = MN - U^*$  и выбрать  $\min\{U, U^*\}$ . Эта величина исследуется для отыскания точной вероятности ее появления, которую можно найти по справочным таблицам

2. Если  $8 < N < 21$ , снова необходимо вычислить  $U^*$  и  $U$ , но теперь в таблицах следует искать критическое значение для наименьшей из двух величин при заданном уровне значимости  $\alpha$ .

3. Если  $N \geq 21$ , то мы можем определить вероятность появления вычисленного значения  $U^*$  с помощью вычисления значения величины  $Z$  и сравнения её с табличным значением (см. [2]).

$$Z = \frac{U^* - MN/2}{\sqrt{\frac{MN(M+N+1)}{12}}} \quad (6.2)$$

#### Пример I

Предположим мы имеем по 24 замера дебитов для скважин № № 1736, 1723, 1706. Эти данные приведены в табл. 6.1-6.3 (№ 1-24). Требуется с помощью критерия  $U^*$  проверить значимость отличия между выборками дебитов каждой пары скважин: 1736, 1723, 1736, 1706, 1723 и 1706 при  $\alpha = 0.01$ .

В таблице 6.8 приведены показатели дебита и их ранга скв. № № 1736 и 1723.

Таблица 6.8  
Показатели дебита компрессорных скважин 1736 и 1723

| Замеры | Реальная система, скв. 1736 |       | Имитационная система скв. 1723 |       |
|--------|-----------------------------|-------|--------------------------------|-------|
|        | показатель дебита           | ранг  | показатель дебита              | ранг  |
| I      | 12,34                       | 45    | 12,66                          | 46    |
| 2      | 6,48                        | 8     | 7,82                           | 17    |
| 3      | 8,31                        | 25    | 8,24                           | 24    |
| 4      | 7,23                        | 12    | 7,77                           | 16    |
| 5      | 8,52                        | 27    | 8,00                           | 21    |
| 6      | 8,38                        | 26    | 8,68                           | 31    |
| 7      | 9,11                        | 38    | 9,48                           | 41    |
| 8      | 7,50                        | 15    | 7,86                           | 19    |
| 9      | 8,21                        | 23    | 8,12                           | 22    |
| 10     | 8,84                        | 33    | 9,06                           | 37    |
| 11     | 9,00                        | 36    | 8,82                           | 32    |
| 12     | 7,32                        | 14    | 7,94                           | 20    |
| 13     | 9,46                        | 40    | 9,12                           | 39    |
| 14     | 8,66                        | 30    | 8,88                           | 34,5  |
| 15     | 8,88                        | 34,5  | 8,64                           | 29    |
| 16     | 10,21                       | 43    | 8,55                           | 28    |
| 17     | 6,24                        | 2     | 6,86                           | 11    |
| 18     | 6,26                        | 3     | 6,12                           | 1     |
| 19     | 6,40                        | 6     | 6,32                           | 4     |
| 20     | 6,44                        | 7     | 6,78                           | 10    |
| 21     | 7,24                        | 13    | 7,84                           | 18    |
| 22     | 6,35                        | 5     | 6,56                           | 9     |
| 23     | 14,46                       | 48    | 13,60                          | 47    |
| 24     | 9,62                        | 42    | 10,36                          | 44    |
| Всего  | 201,46<br>8,39              | 575,5 | 204,08<br>8,50                 | 600,5 |



Имеем  $M = 24$  ;  $N = 24$  ;  $R = 575,5$

$$V = MN + \frac{M(M+1)}{2} - R = 24 \cdot 24 + \frac{24(24+1)}{2} - 575,5 = 300,5$$

$$z = \frac{V - MN/2}{\sqrt{\frac{MN(M+N+1)}{12}}} = \frac{12,5}{48,5} = 0,26$$

Соответствующее значение из таблиц работы [ 2 ] равно  $\bar{z} = 2,58$ , Так как значение  $\bar{z}$  меньше этого критического значения, то гипотеза  $H_0$  об отсутствии значимого отличия не должна быть отвергнута.

В табл. 6.9-6.10 приведены показатели дебита и их ранги для каждой из пар скважин I736-I706 и I723-I706.

Для пары I736-I706 имеем

$$\bar{z} = 1,97 \quad , \quad \bar{z}_{\text{табл. } 0,01} = 2,00$$

Для I723 - I706

$$\bar{z} = 2,17 \quad , \quad \bar{z}_{\text{табл. } 0,01} = 2,66$$

Таким образом, видно, что выборки дебитов рассматриваемых скважин не отличаются между собой, т.е. эти скважины образуют одну группу.

Простейшим непараметрическим критерием, который можно использовать вместо критерия  $t$ , является критерий знаков, используемый для распознавания парных наблюдений.

#### Критерий знаков

Предположим, что проведено  $n$  пар измерений некоторой случайной величины. Сущность данного критерия заключается в том, что путем сравнения каждой пары рядов  $A$  и  $B$  наблюдений определяются разности между ними  $A_i - B_i$ , которые либо положительны, либо отрицательны, либо равны нулю.

Таблица 6.9

Показатели дебита компрессорных скважин I736 и I706

| Замеры | Реальная система, скв. I736 |      | Имитационная система, скв. I706 |      |
|--------|-----------------------------|------|---------------------------------|------|
|        | показатели<br>дебита        | ранг | показатели<br>дебита            | ранг |
| I      | 12,34                       | 45   | 10,64                           | 43   |
| 2      | 6,48                        | 7    | 13,80                           | 7    |
| 3      | 8,31                        | 19   | 9,63                            | 39   |
| 4      | 7,23                        | 8    | 8,20                            | 16,5 |
| 5      | 8,52                        | 22   | 10,69                           | 44   |
| 6      | 8,38                        | 20   | 8,06                            | 14,5 |
| 7      | 9,11                        | 32   | 9,88                            | 40   |
| 8      | 7,50                        | 11   | 8,47                            | 21   |
| 9      | 8,21                        | 18   | 8,00                            | 12,5 |
| 10     | 8,8                         | 26   | 9,13                            | 38   |
| 11     | 9,00                        | 30   | 9,33                            | 36   |
| 12     | 7,32                        | 10   | 8,54                            | 23,5 |
| 13     | 9,46                        | 37   | 9,15                            | 34   |
| 14     | 8,66                        | 25   | 8,98                            | 29   |
| 15     | 8,88                        | 27   | 8,96                            | 28   |
| 16     | 10,21                       | 42   | 8,54                            | 23,5 |
| 17     | 6,24                        | 2    | 5,90                            | 1    |
| 18     | 6,26                        | 3    | 8,00                            | 12,5 |
| 19     | 6,40                        | 5    | 8,06                            | 14,5 |
| 20     | 6,44                        | 6    | 9,17                            | 35   |
| 21     | 7,24                        | 9    | 9,06                            | 31   |
| 22     | 6,35                        | 4    | 8,20                            | 16,5 |
| 23     | 14,46                       | 48   | 12,87                           | 46   |
| 24     | 9,62                        | 38   | 10,00                           | 41   |
| Всего  | 201,46<br>8,29              | 494  | 221,26<br>9,22                  | 642  |

Имеем  $M = 24$  ;  $N = 24$  ;  $R = 575,5$

$$U = MN + \frac{M(M+1)}{2} - R = 24 \cdot 24 + \frac{24(24+1)}{2} - 575,5 = 300,5$$

$$Z = \frac{U - MN/2}{\sqrt{\frac{MN(M+N+1)}{12}}} = \frac{12,5}{48,5} = 0,26$$

Соответствующее значение из таблиц работы [ 2 ] равно  $Z = 2,58$ . Так как вычисленное значение  $Z$  меньше этого критического значения, то гипотеза  $H_0$  об отсутствии значимого отличия не должна быть отвергнута.

В табл.6.9-6.10 приведены показатели дебита и их ранги для каждой из пар скважин 1736-1706 и 1723-1706.

Для пары 1736-1706 имеем

$$Z = 1,97 \quad , \quad Z_{\text{табл. } 0,01} = 2,00$$

Для 1723 - 1706

$$Z = 2,17 \quad , \quad Z_{\text{табл. } 0,01} = 2,66$$

Таким образом, видно, что выборки дебитов рассматриваемых скважин не отличаются между собой, т.е. эти скважины образуют одну группу.

Простейшим непараметрическим критерием, который можно использовать вместо критерия  $t$ , является критерий знаков, используемый для распознавания парных наблюдений.

#### КРИТЕРИЙ ЗНАКОВ

Предположим, что проведено  $n$  пар измерений некоторой случайной величины. Сущность данного критерия заключается в том, что путем сравнения каждой пары рядов А и В наблюдения определяются разности между ними  $A_i - B_i$ , которые либо положительные, либо отрицательные, либо равны нулю. Если нет нулевых разностей,

Таблица 6.10

Показатели дебита компрессорных скважин  
№ № 1723 и 1706

| Замеры | Реальная система, скв. № 1723 |      | Имитационная система<br>скв. № 1706 |      |
|--------|-------------------------------|------|-------------------------------------|------|
|        | показатели<br>дебита          | Ранг | Показатели<br>дебита                | Ранг |
| I      | 12,66                         | 45,0 | 10,64                               | 43,0 |
| 2      | 7,82                          | 8,0  | 13,80                               | 48,0 |
| 3      | 8,24                          | 19,0 | 9,63                                | 38,0 |
| 4      | 7,77                          | 7,0  | 8,20                                | 17,5 |
| 5      | 8,00                          | 12,5 | 10,69                               | 44,0 |
| 6      | 8,68                          | 25,0 | 8,06                                | 14,5 |
| 7      | 9,48                          | 37,0 | 9,88                                | 40,0 |
| 8      | 7,86                          | 10,0 | 8,47                                | 20,0 |
| 9      | 8,12                          | 16,0 | 9,78                                | 39,0 |
| 10     | 9,06                          | 30,5 | 9,13                                | 33,0 |
| 11     | 8,82                          | 26,0 | 9,33                                | 36,0 |
| 12     | 7,94                          | 11,0 | 8,54                                | 21,5 |
| 13     | 9,12                          | 32,0 | 9,15                                | 34,0 |
| 14     | 8,88                          | 27,0 | 9,98                                | 29,0 |
| 15     | 8,64                          | 24,0 | 8,96                                | 28,0 |
| 16     | 8,55                          | 23,0 | 8,54                                | 21,5 |
| 17     | 6,86                          | 6,0  | 5,90                                | 1,0  |
| 18     | 6,32                          | 2,5  | 8,00                                | 12,5 |
| 19     | 6,32                          | 2,5  | 8,06                                | 14,5 |
| 20     | 6,78                          | 5,0  | 9,17                                | 35,0 |
| 21     | 7,84                          | 9,0  | 9,06                                | 30,5 |
| 22     | 6,56                          | 4,0  | 8,20                                | 17,5 |
| 23     | 13,60                         | 47,0 | 12,87                               | 46,0 |
| 24     | 10,36                         | 42,0 | 10,00                               | 41,0 |
| Всего: | 204,28<br>8,51                | 471  | 223,04<br>9,29                      | 705  |

положительный результат распределен как биномиальная переменная с  $\theta = 0,5$ . Нулевые разности, если их немного, скажем меньше 5 % отбраиваются поровну распределяются между положительными и отрицательными исходными данными.

Для каждой разности  $A_i - B_i$  вероятность

$$P\{A_i > B_i\} = P\{A_i < B_i\} = 0,5$$

если  $\sum \{A_i - B_i\} = 0$

Допустим, что  $z$  - число случаев реже встречающегося знака  $A$  ( $n - z$ ) - число случаев чаще встречающегося знака.

Если выборки  $A$  и  $B$  не существенно различимы, то накопленные вероятности получения меньшего числа знаков  $z$

$$P = \sum_{i=0}^z \binom{n}{i} (0,5)^n \quad (6.3)$$

Принадлежность выборок к одной и той же совокупности отвергается, если

$$P < \alpha/2 \quad \text{или} \quad P \geq 1 - \alpha/2 \quad (6.4)$$

где  $\alpha$  - уровень значимости.

### Пример 2

Рассмотрим показатели дебита выше рассматриваемых скважин табл. 6.8-6.10

Для значений дебитов скважин 1736 и 1723 получено 9 плюсов и 15 минусов, т.е.  $z = 9$ ,  $n - z = 15$  (табл. 6.11).

Вычислим

$$\begin{aligned} P(z < 9) &= P(z=0) + P(z=1) + P(z=2) + P(z=3) + P(z=4) + \\ &+ P(z=5) + P(z=6) + P(z=7) + P(z=8) + P(z=9) = \\ &= \frac{24!}{1 \cdot 24!} \left(\frac{1}{2}\right)^{24} + \frac{24!}{1 \cdot 23!} \left(\frac{1}{2}\right)^{24} + \frac{24!}{2! \cdot 22!} \left(\frac{1}{2}\right)^{24} + \frac{24!}{3! \cdot 21!} \left(\frac{1}{2}\right)^{24} + \frac{24!}{4! \cdot 20!} \left(\frac{1}{2}\right)^{24} + \end{aligned}$$

Таблица 6. II

| № №<br>ПП | I736  | I723  | Зна-<br>ки | № №<br>ПП | I736  | I706  | Зна-<br>ки | № №<br>ПП. | I723  | I706  | Зна-<br>ки |
|-----------|-------|-------|------------|-----------|-------|-------|------------|------------|-------|-------|------------|
| I         | 12,34 | 12,66 | -          | I         | 12,34 | 10,64 | +          | I          | 12,66 | 10,64 | +          |
| 2         | 6,48  | 7,82  | -          | 2         | 6,48  | 13,80 | -          | 2          | 7,82  | 13,80 | -          |
| 3         | 8,31  | 8,24  | +          | 3         | 8,31  | 9,63  | -          | 3          | 8,24  | 9,63  | -          |
| 4         | 7,23  | 7,77  | -          | 4         | 7,23  | 8,20  | -          | 4          | 7,77  | 8,20  | -          |
| 5         | 8,52  | 8,00  | +          | 5         | 8,52  | 10,69 | -          | 5          | 8,00  | 10,69 | -          |
| 6         | 8,38  | 8,68  | -          | 6         | 8,38  | 8,06  | +          | 6          | 8,68  | 8,06  | +          |
| 7         | 9,11  | 9,48  | -          | 7         | 9,11  | 9,88  | -          | 7          | 9,48  | 9,88  | -          |
| 8         | 7,50  | 7,86  | -          | 8         | 7,50  | 8,47  | -          | 8          | 7,86  | 8,47  | -          |
| 9         | 8,21  | 8,12  | +          | 9         | 8,21  | 8,00  | +          | 9          | 8,12  | 8,00  | +          |
| 10        | 8,84  | 9,06  | -          | 10        | 8,84  | 9,13  | -          | 10         | 9,06  | 9,13  | -          |
| 11        | 9,00  | 8,82  | +          | 11        | 9,00  | 9,33  | -          | 11         | 8,82  | 9,33  | -          |
| 12        | 7,32  | 7,94  | -          | 12        | 7,32  | 8,54  | -          | 12         | 7,94  | 8,54  | -          |
| 13        | 9,46  | 9,12  | +          | 13        | 9,46  | 9,15  | +          | 13         | 9,12  | 9,15  | -          |
| 14        | 8,66  | 8,88  | -          | 14        | 8,66  | 8,98  | -          | 14         | 8,88  | 8,98  | -          |
| 15        | 8,88  | 8,64  | +          | 15        | 8,88  | 8,96  | -          | 15         | 8,64  | 8,96  | -          |
| 16        | 10,21 | 8,55  | +          | 16        | 10,21 | 8,54  | +          | 16         | 8,55  | 8,54  | +          |
| 17        | 6,24  | 6,86  | -          | 17        | 6,24  | 5,90  | +          | 17         | 6,86  | 5,90  | +          |
| 18        | 6,26  | 6,12  | +          | 18        | 6,26  | 8,00  | -          | 18         | 6,12  | 8,00  | -          |
| 19        | 6,40  | 6,32  | +          | 19        | 6,40  | 8,06  | -          | 19         | 6,32  | 8,06  | -          |
| 20        | 6,44  | 6,78  | -          | 20        | 6,44  | 9,17  | -          | 20         | 6,78  | 9,17  | -          |
| 21        | 7,24  | 7,84  | -          | 21        | 7,24  | 9,06  | -          | 21         | 7,84  | 9,06  | -          |
| 22        | 6,35  | 6,56  | -          | 22        | 6,35  | 8,20  | -          | 22         | 6,56  | 8,20  | -          |
| 23        | 14,46 | 15,60 | -          | 23        | 14,46 | 12,87 | +          | 23         | 15,60 | 12,87 | +          |
| 24        | 9,62  | 10,36 | -          | 24        | 9,62  | 10,00 | -          | 24         | 10,36 | 10,00 | +          |

$$\begin{aligned} \nu &= 9 \\ 11 - \nu &= 15 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nu &= 7 \\ 10 - \nu &= 17 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nu &= 7 \\ 11 - \nu &= 17 \end{aligned}$$

$$+ \frac{24!}{5!19!} \left(\frac{1}{2}\right)^{24} + \frac{24!}{6!18!} \left(\frac{1}{2}\right)^{24} + \frac{24!}{7!17!} \left(\frac{1}{2}\right)^{24} + \frac{24!}{8!16!} \left(\frac{1}{2}\right)^{24} + \frac{24!}{9!15!} \left(\frac{1}{2}\right)^{24} = 0,153$$

Если выбрать уровень значимости  $\alpha = 0,05$ ,  $\frac{\alpha}{2} = 0,025$   
 Так как  $0,153 > 0,025$ , рассматриваемые дебиты по величине не различимы.

Для скважин 1736 и 1706

$$P = \sum_{l=0}^7 \binom{7}{l} \left(\frac{1}{2}\right)^{24} = 0,032$$

В [2] приведены таблицы, характеризующие число плюсов, необходимом для того, чтобы отвергнуть принадлежность скважин к одной группе. Следовательно, вновь убеждаемся в том, что рассматриваемые компрессорные скважины образуют одну группу.

Рассмотрим критерий Розенбаума  $Q$ , состоящий в сравнении двух ранжированных рядов наблюдений, для которых подсчитывается число наблюдений  $S$  первого ряда, большее максимальной величины второго ряда, и число наблюдений  $K$  второго ряда, меньшее минимальной величины первого ряда. По значениям  $S$  и  $K$  находятя

$$Q = S + K \quad (6.5)$$

Полученное значение  $Q$  сравнивается с  $Q_{\text{табл.}}$ , которое определяется в зависимости от числа членов  $n_1$  и  $n_2$  в выборках для уровней значимости 0,05 и 0,01 из таблиц (I.1-1.2) приложения.

### Пример 3

Определим, существует ли различие в значениях дебита компрессорных скважин № 1723, 1736, 1706 и 1723, 1706.

Составим ранжированные ряды дебитов этих скважин табл.6.12

Таблица 6.12

| № №<br>пп. | СКВ.<br>I706 | СКВ.<br>I736 | № №<br>пп. | СКВ.<br>I723 | СКВ.<br>I736 | № №<br>пп. | СКВ.<br>I723 | СКВ.<br>I706 |
|------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|
| I          | 5,90         | 6,24         | I          | 6,12         | 6,24         | I          | 6,12         | 5,90         |
| 2          | 8,00         | 6,26         | 2          | 6,32         | 6,26         | 2          | 6,32         | 8,00         |
| 3          | 8,00         | 6,35         | 3          | 6,56         | 6,35         | 3          | 6,56         | 8,00         |
| 4          | 8,06         | 6,40         | 4          | 6,78         | 6,40         | 4          | 6,78         | 8,06         |
| 5          | 8,06         | 6,44         | 5          | 6,86         | 6,44         | 5          | 6,86         | 8,06         |
| 6          | 8,20         | 6,48         | 6          | 7,77         | 6,48         | 6          | 7,77         | 8,20         |
| 7          | 8,20         | 7,23         | 7          | 7,82         | 7,23         | 7          | 7,82         | 8,20         |
| 8          | 8,47         | 7,24         | 8          | 7,84         | 7,24         | 8          | 7,84         | 8,47         |
| 9          | 8,54         | 7,32         | 9          | 7,86         | 7,32         | 9          | 7,86         | 8,54         |
| 10         | 8,54         | 7,50         | 10         | 7,94         | 7,50         | 10         | 7,94         | 8,54         |
| 11         | 8,96         | 8,21         | 11         | 8,00         | 8,21         | 11         | 8,00         | 8,96         |
| 12         | 8,98         | 8,31         | 12         | 8,12         | 8,31         | 12         | 8,12         | 8,98         |
| 13         | 9,06         | 8,38         | 13         | 8,24         | 8,38         | 13         | 8,24         | 9,06         |
| 14         | 9,13         | 8,52         | 14         | 8,55         | 8,52         | 14         | 8,55         | 9,13         |
| 15         | 9,15         | 8,66         | 15         | 8,64         | 8,66         | 15         | 8,64         | 9,15         |
| 16         | 9,17         | 8,84         | 16         | 8,68         | 8,84         | 16         | 8,68         | 9,17         |
| 17         | 9,33         | 8,88         | 17         | 8,82         | 8,88         | 17         | 8,82         | 9,33         |
| 18         | 9,63         | 9,00         | 18         | 8,88         | 9,00         | 18         | 8,88         | 9,63         |
| 19         | 9,88         | 9,11         | 19         | 9,06         | 9,11         | 19         | 9,06         | 9,88         |
| 20         | 10,00        | 9,46         | 20         | 9,12         | 9,46         | 20         | 9,12         | 10,00        |
| 21         | 10,64        | 9,62         | 21         | 9,48         | 9,62         | 21         | 9,48         | 10,64        |
| 22         | 10,69        | 10,21        | 22         | 10,36        | 10,21        | 22         | 10,36        | 10,69        |
| 23         | 12,87        | 12,34        | 23         | 12,66        | 12,34        | 23         | 12,66        | 12,87        |
| 24         | 13,80        | 14,46        | 24         | 15,60        | 14,46        | 24         | 15,60        | 13,80        |

$$S = I \quad K = I, \quad Q = 2$$

$$S = I \quad K = 0 \\ Q = I$$

$$S = I \quad K = I \quad Q = 2$$



Для значений дебита скважин I723, I736  $S = I$ ,  $K=0$  и  $Q = I$ . Согласно таблице I.I приложения для  $n_1 = n_2 = 24$  табличное значение  $Q_{\text{табл.}} = 7$  при уровне значимости 0,01. Так как  $Q < Q_{\text{табл.}}$  можно с вероятностью 0,99 утверждать об отсутствии разницы в средних значениях дебита данных компрессорных скважин, т.е. они принадлежат к одной группе.

Анализ технологических режимов рассматриваемых скважин показал, что по основным показателям эксплуатации : процент обводненности, длина подъемника, диаметр штуцера, газовый фактор - рассматриваемые скважины группируются таким же образом. При этом в первую группу вошли скважины с диапазоном изменения перечисленных факторов : процент обводненности - 85-90 % (до 90 %), длина подъемника - I ряда 250-300 м, II- ряда I450-I550 м; диаметр штуцера - 24 мм, газовый фактор 80-90 м<sup>3</sup>/т. Во вторую группу вошли с диапазоном изменения : процент обводненности - 94-96 % (свыше 90 %), длина подъемника - I ряда 480-540 м, II ряда - I960-2000 м, диаметр штуцера - 25 мм, газовый фактор - I40-I46 м<sup>3</sup>/т.

В третью группу вошла скважина № I669, продуцирующая эмульсионную нефть. Длина подъемника составила : I ряда - 400 м, II ряда - I800 м, диаметр штуцера 24 мм, газовый фактор - 65 м<sup>3</sup>/т.

III Оценку необходимого времени непрерывных измерений технологических параметров, обеспечивающих определенную точность среднесуточных показателей проведем методом выборочных частот. Проиллюстрируем методику на примере расхода газа для скважины I736 (табл. 6.I). С этой целью

I. По всей выборке 30 минутных замеров определяется средний дебит газа  $Q_{\text{ср}} = 45,1 \text{ м}^3/\text{час.}$

2. Область изменения текущего дебита разделяется на интервалы от точки  $q_{cp}$  так, чтобы относительная величина интервала  $\frac{\Delta q}{q_{cp}}$  составляла заданный процент погрешности. В данном случае интервал  $\Delta q$  выберем равным  $\pm 0,9 \text{ м}^3/\text{час}$ , что составляет 2 % погрешности:  $2\Delta q = 1,8 \text{ м}^3/\text{час}$ , т.е. 4 % погрешности и т.д.

3. Определяется количество точек исходной выборки, попавших соответственно в следующие области:

$n_1$  - число точек в интервале ( $q_{cp} - \Delta q$ ;  $q_{cp} + \Delta q$ )

$n_2$  - " " " " ( $q_{cp} - 2\Delta q$ ;  $q_{cp} + 2\Delta q$ )

.....

$n_i$  - число точек в интервале ( $q_{cp} - i\Delta q$ ;  $q_{cp} + i\Delta q$ )

Для скважины 1736 в первый интервал (44,2-46) попадает 23 точки, в следующий интервал (43,3-46,9) - 32 точки и т.д.

4. Подсчитывается вероятность оценки среднего значения дебита данной скважины с погрешностью, не превышающей  $\frac{i\Delta q}{q_{cp}}$ , что составляет  $\frac{n_i}{N_i}$ , где  $N_i$  - общее число замеров в данном случае  $N_i = 48$ .

Следовательно, для интервала (44,2-46) эта вероятность не превышает  $\frac{23}{48} \approx 48\%$  и т.д. Заносим эти значения в таблицу 6.13.

5. Предположим теперь, что непрерывный замер производится в течении одного часа. Обозначим выборку исходных данных через  $q_i^{(1)}$ , а предполагаемые часовые замеры через  $q_i^{(2)}$ .

Таблица 6.13

| № п/п | % погрешности | Интервалы изменения дебита | Кол-во точек попавших в данный интервал | Вероятность оценки дебита, % |
|-------|---------------|----------------------------|---|------------------------------|
| 1     | 2             | 44,2-46,0                  | 23                                      | 48                           |
| 2     | 4             | 43,3-46,9                  | 32                                      | 67                           |
| 3     | 6             | 42,4-47,8                  | 32                                      | 67                           |
| 4     | 8             | 41,5-48,7                  | 35                                      | 73                           |
| 5     | 10            | 40,6-49,6                  | 37                                      | 77                           |
| 6     | 12            | 39,7-50,5                  | 45                                      | 94                           |
| 7     | 14            | 38,8-51,4                  | 45                                      | 94                           |
| 8     | 16            | 37,9-52,3                  | 46                                      | 96                           |
| 9     | 18            | 37,0-53,2                  | 46                                      | 96                           |
| 10    | 20            | 36,1-54,1                  | 46                                      | 96                           |
| 11    | 22            | 35,2-55,0                  | 47                                      | 98                           |
| 12    | 24            | 34,3-55,9                  | 48                                      | 100                          |

Тогда в зависимости от момента времени, с которого начинался бы часовой замер, возможны следующие значения

$$q_1^{(2)} = \frac{q_1^{(1)} + q_2^{(1)}}{2} = \frac{46,0 + 44,0}{2} = 45,0$$

$$q_2^{(2)} = \frac{q_2^{(1)} + q_3^{(1)}}{2} = \frac{44,0 + 46,0}{2} = 45,0$$

.. .. .

$$q_{N-1}^{(2)} = \frac{q_{N-1}^{(1)} + q_N^{(1)}}{2} = \frac{46,0 + 46,0}{2} = 46,0$$

Очевидно, что объем выборки в этом случае равен  $N_2 = N_1 - 1$ . Для полученных таким образом значений часовых замеров дебитов может быть проведен аналогичный анализ. Результаты его сведены в таблицу 6.14 и вообще, для любого интервала времени, кратного 30 мин -  $\Delta t = K \times 0,5$  (час), могут быть смоделированы данные соответствующих замеров в объеме  $N_k = N_{k-1} - 1$ .

Окончательный результат для технологических параметров всех скважин представлен в таблице 6.15.

Таблица 6.14

| № скважины | Процент погрешности | Интервалы изменения дебита | Количество точек, попавших в данный интервал | Вероятность оценки дебита, % |
|------------|---------------------|----------------------------|--|------------------------------|
| 1          | 2                   | 44,2-46                    | 27   | 57                           |
| 2          | 4                   | 43,3-46,9                  | 29   | 62                           |
| 3          | 6                   | 42,4-47,8                  | 34   | 72                           |
| 4          | 8                   | 41,5-48,7                  | 38   | 81                           |
| 5          | 10                  | 40,6-49,6                  | 40   | 85                           |
| 6          | 12                  | 39,7-50,5                  | 45   | 96                           |
| 7          | 14                  | 38,8-51,4                  | 46   | 98                           |
| 8          | 16                  | 37,9-52,3                  | 46   | 98                           |
| 9          | 18                  | 37,0-53,2                  | 47   | 100                          |

Таблица 6.15

| t зам., час | Относительная погрешность, (%) |                  |                |
|-------------|--------------------------------|------------------|----------------|
|             | Q <sub>н</sub>                 | P <sub>раб</sub> | Q <sub>г</sub> |
| 3           | 14                             | 3                | 8              |
| 4           | 12                             | 2                | 7              |
| 5           | 11                             | 1                | 6              |
| 6           | 10                             | 1                | 5              |

IV. В процессе преобразования наших знаний о системе в её математическую модель, мы должны :

1. Определить назначение модели.
2. Определить, какие компоненты должны быть включены в состав модели.
3. Выявление из большого числа действующих факторов тех, которые в наибольшей степени влияют на общее поведение системы.
4. Выявить зависимость между двумя или несколькими действующими факторами.

Этот список нельзя считать исчерпывающим : в нем перечислены некоторые наиболее распространенные цели моделирования.

Пример дебит компрессорных скважин за отклик системы, а также значения, как устьевое давление, рабочее давление и количество закачиваемого агента за входные компоненты системы.

Таким образом, в дальнейшем будем рассматривать зависимость :

$$Q_n = f(P_u, P_{р.с.}, Q_r) \quad (6.6)$$

Качественное влияние рассматриваемых компонент (факторов) на показатели дебита компрессорных скважин может быть установлено с помощью факторного анализа (дисперсионного анализа), который позволяет одновременно оценить влияние каждого отдельного фактора, всех факторов и их различных взаимодействий на результативный признак (дебит).

Таким образом, факторный анализ является начальной стадией статистического исследования и позволяет ответить на вопрос, существует ли связь между анализируемыми параметрами.

Дисперсионный анализ для варианта с незаполненными  
клетками таблицы

Определим, какие факторы должны быть включены в зависимость вида (6.6) для получения модели, иначе говоря, выявим факторы, в наибольшей степени влияющие на дебит компрессорных скважин.

Приведем расчеты дисперсионного анализа для варианта с незаполненными клетками на конкретном примере.

Пример 1

Исследуется влияние рабочего ( $P_{\text{раб}}$ ) и устьевго ( $P_y$ ) давлений, а также расхода закачиваемого агента  $Q$  г на дебит компрессорных скважин (табл. 6.1-6.8).

Для рабочего давления примем следующие три уровня :

$$P_{\text{раб}1} = 28,4 \div 35,6 \text{ кг/см}^2, P_{\text{раб}2} = 35,6 - 42,8 \text{ кг/см}^2 \text{ и} \\ P_{\text{раб}3} > 42,8 \text{ кг/см}^2, \text{ для устьевго давления -}$$

$$P_y 1 = 1,2 \div 7,7 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}, P_y 2 = 7,7 \div 1,42 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \text{ и } P_y 3 > 14,2 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$$

для расхода закачиваемого агента -

$$Q_{\Gamma 1} = 23,2 \div 35,4 \text{ м}^3/\text{час}, Q_{\Gamma 2} = 35,4 \div 47,6 \text{ м}^3/\text{час} \text{ и} \\ Q_{\Gamma 3} > 47,6 \text{ м}^3/\text{час}.$$

Составим таблицу 7.16, где в каждой клетке для различных уровней изменения перечисленных факторов, записываются дебиты, соответствующие этим уровням.

По каждой клетке таблицы 7.16 рассчитываются следующие показатели и среднее значение результирующего признака по формуле

$$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_1^m y_i \quad (6.7)$$

параметр

$$Z_j = \frac{1}{m} \left( \sum_1^m y_i \right)^2 \quad (6.8)$$

где  $m$  - число результатов в клетке.

По вычислениям составляется таблица 6.17, каждая клетка которой заполняется по форме :

|                |       |
|----------------|-------|
| $m$            | $y$   |
| $\sum_1^m y_i$ | $z_j$ |

Из таблицы 6.17 формируются три таблицы 7.20 – 7.22, учитывающие влияние на результативный признак (дебит) двух параметров, а третий параметр при этом фиксируется.

В таблице 6.17 учитывается предполагаемое влияние на дебит рабочего и устьевого давления и расхода закачиваемого агента.

В табл.6.18 учитывается влияние рабочего давления и устьевого давления. В таблице 6.19 – устьевого давления и расхода закачиваемого агента, в 6.20 – рабочего давления и расхода закачиваемого агента. Для каждой из таблиц формируются соответственно таблицы 6.21–6.23, учитывающие соответственно влияние расхода закачиваемого агента, устьевого и рабочего давлений в отдельности.

Для каждой таблицы вычисляем факториальную  $G_1^2$  и остаточную  $G_0^2$  дисперсии по формуле :

$$G_1^2 = \frac{1}{g-1} \left[ \sum_1^g z_j - \frac{1}{N} \left( \sum_1^N y_i \right)^2 \right], \quad (6.9)$$

$$G_0^2 = \frac{1}{N-g} \left[ \sum_1^N y_i^2 - \sum_1^g z_j \right] \quad (6.10)$$

$$\theta = G_1^2 / G_0^2 \quad (6.11)$$

$$f_1 = g-1, \quad f_2 = N-g \quad (6.12)$$

где  $g$  – число заполненных клеток таблицы ;  $N$  – число результативных признаков (дебита).





Таблица 6.17

| $\bar{y}$ | Р <sub>двб</sub> 1 |          |          | Р <sub>двб</sub> 2 |          |          | Р <sub>двб</sub> 3 |          |          |        |       |       |       |       |       |       |       |         |
|-----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
|           | $Q_{T1}$           | $Q_{T2}$ | $Q_{T3}$ | $Q_{T1}$           | $Q_{T2}$ | $Q_{T3}$ | $Q_{T1}$           | $Q_{T2}$ | $Q_{T3}$ |        |       |       |       |       |       |       |       |         |
| 21        | 4,75               | 11       | 6,29     | 14                 | 8,70     | 48       | 5,72               | 37       | 8,35     | 30     | 14,77 | 21    | 6,59  | 26    | 6,59  | 11    | 20,43 |         |
| $P_{y1}$  | 99,8               | 474,7    | 69,2     | 435,9              | 121,7    | 1059     | 274,7              | 1572,1   | 308,9    | 2578,5 | 443,2 | 546,6 | 138,4 | 912,9 | 138,4 | 912,9 | 224,7 | 4591,23 |
|           |                    | 31       | 6,82     | 6                  | 7,65     |          |                    | 18       | 8,59     | 5      | 10,71 | 2     | 12,21 | 36    | 11,10 | 6     | 23,13 |         |
| $P_{y2}$  |                    | 211,5    | 1443     | 45,9               | 552      |          |                    | 154,6    | 1328     | 53,5   | 573,7 | 24,4  | 298,2 | 398,5 | 44,1  | 139   | 3211  |         |
|           |                    | 5        | 17,32    | 5                  | 8,78     |          |                    |          |          |        |       |       | 3     | 10,20 |       |       |       |         |
| $P_{y3}$  |                    | 34,6     | 240      | 43,9               | 385      |          |                    |          |          |        |       |       | 30,6  | 312   |       |       |       |         |

$$\sum_m = 306$$

$$\sum_j = 35955,7$$

Таблица 6.18

| $P_y$          | $P_{\text{раб I}}$ | $P_{\text{раб 2}}$   | $P_{\text{раб 3}}$ |              |           |                |
|----------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------|-----------|----------------|
| $P_{y1}$       | 46<br>291          | 6,32<br>18,59        | 115<br>1027        | 8,93<br>9167 | 58<br>655 | 11,29<br>739,2 |
| $P_{y2}$       | 57<br>257          | 6,96<br>1791         | 23<br>208          | 9,05<br>1884 | 44<br>562 | 12,76<br>7171  |
| $P_{y3}$       | 10<br>78,5         | 7,8<br>617           |                    |              | 3<br>30,6 | 10,20<br>312   |
| $\sum_m = 336$ |                    | $\sum z_j = 30173,6$ |                    |              |           |                |

Таблица 6.19

|                | $Q_{r1}$  | $Q_{r2}$           | $Q_{r3}$    |               |             |                 |
|----------------|-----------|--------------------|-------------|---------------|-------------|-----------------|
|                | 90<br>513 | 5,7<br>2924        | 74<br>670   | 9,05<br>6061  | 55<br>790   | 14,36<br>113,37 |
|                | 2<br>24,4 | 12,21<br>298,2     | 85<br>764,6 | 8,99<br>6876  | 17<br>238,3 | 14,02<br>3841   |
|                |           |                    | 8<br>65,2   | 8,15<br>532,2 | 5<br>43,91  | 8,78<br>385,6   |
| $\sum_m = 336$ |           | $\sum z_j = 31757$ |             |               |             |                 |

Таблица 6.20

|      | Р <sub>раб1</sub> |                 |                 | Р <sub>раб2</sub> |                 |                 | Р <sub>раб3</sub>    |                 |                 |       |       |       |      |       |       |       |       |  |
|------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--|
|      | q <sub>Г1</sub>   | q <sub>Г2</sub> | q <sub>Г3</sub> | q <sub>Г1</sub>   | q <sub>Г2</sub> | q <sub>Г3</sub> | q <sub>Г1</sub>      | q <sub>Г2</sub> | q <sub>Г3</sub> |       |       |       |      |       |       |       |       |  |
| 21   | 4,75              | 47              | 6,71            | 25                | 8,46            | 48              | 5,72                 | 55              | 8,43            | 35    | 14,19 | 23    | 7,08 | 65    | 11,09 | 17    | 21,38 |  |
| 99,8 | 474,7             | 315,4           | 2116            | 211,6             | 1791            | 274,7           | 157,22               | 463,7           | 3909            | 496,7 | 7050  | 162,9 | 1153 | 720,7 | 7990  | 363,5 | 7774  |  |
|      | $\sum_m = 336$    |                 |                 |                   |                 |                 | $\sum z_j = 33831,2$ |                 |                 |       |       |       |      |       |       |       |       |  |

Таблица 6.21

| q <sub>Г1</sub> | q <sub>Г2</sub> | q <sub>Г3</sub>      |       |      |       |
|-----------------|-----------------|----------------------|-------|------|-------|
| 92              | 5,84            | 167                  | 8,98  | 77   | 13,92 |
| 537,4           | 3139            | 1499                 | 13465 | 1072 | 14921 |
| $\sum_m = 336$  |                 | $\sum z_j = 31525,5$ |       |      |       |

Таблица 6.22

| P <sub>у1</sub> | P <sub>у2</sub> | P <sub>у3</sub>      |       |       |       |
|-----------------|-----------------|----------------------|-------|-------|-------|
| 219             | 9,00            | 104                  | 9,88  | 13    | 8,40  |
| 1972            | 17764           | 1027                 | 10148 | 109,1 | 916,6 |
| $\sum_m = 336$  |                 | $\sum z_j = 28826,4$ |       |       |       |

Таблица 6.23

| Р <sub>раб1</sub> | Р <sub>раб2</sub> | Р <sub>раб3</sub>    |       |      |       |
|-------------------|-------------------|----------------------|-------|------|-------|
| 93                | 6,74              | 138                  | 8,95  | 105  | 11,88 |
| 626,8             | 4225              | 1235                 | 11051 | 1247 | 14812 |
| $\sum_m = 336$    |                   | $\sum z_j = 38097,8$ |       |      |       |

Таблица 6.24

Расчет влияния факторов и их взаимодействий на дебит компрессорных скважин

| Факторы и их взаимодействие | $\sum_{j=1}^g x_j$ | $\frac{1}{N}(\sum_{j=1}^N y_j)^2$ | $\sum_{j=1}^N y_j^2$ | $\sum_{j=1}^N x_j - \frac{1}{N}(\sum_{j=1}^N y_j)$ | $\sum_{j=1}^N y_j^2 - \sum_{j=1}^g z_j$ | $f_1 = g - 1$ | $f_2 = N - g$ | $G_1^2$ | $G_0^2$ | $\theta$ | При $F_{g,05}$ |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------|--|---|---------------|---------------|---------|---------|----------|----------------|
| $P_y$                       | 28628,4            |                                   | 63,5                 | 5661,2   | 2                                       | 334           | 31,75         | 16,95   | 1,87    | 3,00     |                |
| $P_{заб}$                   | 30087,8            |                                   | 1322,9               | 4401,8   | 2                                       | 334           | 661,45        | 13,18   | 50,18   | 3,00     |                |
| $Q_r$                       | 31525,5            |                                   | 2760,                | 2964,1   | 2                                       | 334           | 1380,3        | 8,87    | 155,61  | 3,00     |                |
| $P_y Q_r$                   | 31756,9            | 28764,9                           | 34489,6              | 2992,0   | 2732,7                                  | 7             | 329           | 427,44  | 8,30    | 51,50    | 2,10           |
| $P_y P_{pas}$               | 30173,6            |                                   | <del>1408,7</del>    | 4316,0   | 7                                       | 329           | 201,24        | 13,12   | 15,34   | 2,10     |                |
| $P_{pas} Q_r$               | 33831,2            |                                   | 5066,3               | 658,4  | 8                                       | 328           | 633,29        | 2,01    | 315,06  | 2,10     |                |
| $P_y P_{pas} Q_r$           | 33995,7            |                                   | 5230,8               | 493,9  | 18                                      | 318           | 290,6         | 1,55    | 187,48  | 1,65     |                |

Полученное значение  $\theta$  при соответствующих  $f_1$  и  $f_2$  сравнивается с табличным  $F$  при уровне значимости 0,05 табл.2.2 Приложения. Если  $\theta > F$ , то это свидетельствует о влиянии факторов или их взаимодействиях на данный показатель, в противном случае - об отсутствии связи. Результаты расчетов сведены в таблицу 6.22.

Из таблицы 6.22 следует, что существенное влияние на дебит компрессорных скважин оказывают сочетание факторов  $R_{\text{раб}}$ ,  $Q_{\text{Г}}$ ,  $R_y R_{\text{раб}}$ ,  $Q_{\text{Г}}$ , факторы  $Q_{\text{Г}}$ ,  $R_{\text{раб}}$ , сочетание  $R_y Q_{\text{Г}}$ . В меньшей степени влияют сочетание  $R_y R_{\text{раб}}$ , влияние фактора  $R_y$  не выявлено.

Таким образом, нами показано, что в зависимости (6.6) входные факторы взаимно независимы, результирующий признак (дебит) распределен по нормальному закону. Наиболее влияющими факторами являются  $R_{\text{раб}}$ ,  $Q_{\text{Г}}$  и их взаимодействие, а также сочетание  $R_y R_{\text{раб}}$ ,  $Q_{\text{Г}}$ .

После того, как мы определили (по меньшей мере качественно) какие факторы влияют на результирующий признак (дебит) приступим к построению самой модели.

Следует отметить, что в качестве входных факторов мы рассмотрели далеко не полный список компонент.

Это объясняется тем, что при построении любой модели экспериментатор должен варьировать легкодоступными параметрами, каковыми являются, в нашем случае, устьевые информации компрессорных скважин.

Для построения математической модели, с целью прогнозирования дебита компрессорных скважин, в основу обработки бралась зависимость вида (6.6). Для обработки был применен перспективный метод МТУА (метод группового учета аргументов), позволяющий определить для заданного множества переменных единственную модель оптимальной сложности.

Данный метод предполагает разделение исходной выборки на обучающую и проверочную последовательности, где уточняется число членов и степени уравнений регрессии.

Это разделение выполняется следующим образом.

1. Определяется квадрат средневзвешенного по всем входным переменным расстояния от каждого узла интерполяции (экспериментальная точка) до некоторой и центральной точки выборки исходных данных:

$$P_j^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \right],$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij} \quad (13)$$

где  $m$  -- число узлов интерполяции в выборке исходных данных;

$x_{ij}$  -- численное значение переменной в  $j$ -ом узле интерполяции;

$\bar{x}_i$  -- среднее значение  $i$ -й переменной.

2. Узлы интерполяции ранжируются по параметру  $P_j^2$  так, чтобы в новой нумерации

$$P_j^2 \geq P_{j+1}^2 \quad (j = 1, 2, \dots)$$

3. Точки с нечетными индексами образуют обучающую последовательность (множество  $\mathcal{N}$ ), а с четными -- проверочную последовательность (множество  $\mathcal{N}_k$ ).

В зависимости от поставленной задачи (получение наиболее точной модели прогноза, идентификация уравнения объекта и т.д.) выбирается определенный критерий селекции, позволяющий в процессе перебора рядов постепенно усложняющихся моделей найти модель оптимальной сложности.

Для решения задач однократного прогнозирования случайных процессов целесообразным критерием является точность, определя-

мая на отдельной проверочной последовательности данных (критерий регулярности).

$$\sigma_{np}^2 = \frac{1}{N_{np}} \sum_{i=1}^{N_{np}} (\varphi_i - \varphi_i^*)^2 \quad (6.14)$$

где  $\sigma_{np}$  - абсолютная ошибка на проверочной последовательности;

$\varphi_i$  - значение прогноза в  $i$ -й точке по модели

$i = 1, 2, \dots, N_{np}$ ;  $\varphi_i^*$  - действительное значение прогноза в той же точке;  $N_{np}$  - число точек в проверочной последовательности.

Чем меньше ошибка, тем выше регулярность модели.

Приведем общую схему получения модели оптимальной сложности для однократного прогноза методом группового учета аргумента.

Полное описание объекта  $\Psi = \Psi(X_1, X_2, \dots, X_n)$  заменяется несколькими рядами частных описаний.

Первый ряд селекции

$$y_1 = f(x_1, x_2), y_2 = f(x_1, x_2) \dots y_s = f(x_{s-1}, y_{s-1})$$

Здесь  $S = C_n^k$

При этом функция  $f(x_i, x_k)$ , называемая опорной, принимается линейной:

$$f(x_i, x_k) = a + b x_k + c x_i$$

Второй ряд селекции:

$$z_1 = f(y_1, y_2), z_2 = f(y_1, y_2), \dots, z_p = f(y_{p-1}, y_p)$$

где  $P = C_s^k$  и т.д.

Уложение идет дискретно. В каждом ряду добавляются новые члены или повышается степень полинома, либо то и другое вместе.

Каждое частное описание является функцией только двух переменных. Поэтому коэффициенты частных описаний легко определяются по данным обучающей последовательности при малом числе узлов интерполяции (первая операция).

Из ряда в ряд селекции пропускается некоторое число самых регулярных переменных. Далее, исключая промежуточные переменные (вторая операция), можно получить аналог полного описания. Решающим обстоятельством является то, что при увеличении сложности математической модели (например, числа членов и степени полинома) точность, определяемая на отдельной проверочной последовательности, сначала возрастает, затем начинает уменьшаться. Минимуму критерия селекции и соответствует искомая модель оптимальной сложности.

Нами был применен один из алгоритмов МГУА [ 8 ] . Расчеты велись на ЭВМ "Минск-32" на языке ФОРТРАН.

В основу обработки были взяты значения дебитов скважин № № 1736, 1723, 1706 (по 24 замера с каждой - обучающая последовательность). Таблица 6.25. В результате была получена следующая зависимость :

$$Q_n = a_0 + P_{\text{раб}} \cdot Q_r (a_1 P_{\text{раб}} \cdot Q_r - a_2) \quad (6.15)$$

где коэффициенты  $a_i$  приняли следующие значения :  $a_0 = 4,61$   
 $a_1 = 0,39 \times 10^{-5}$  ,  $a_2 = 0,42 \times 10^{-2}$ . Как видно из таблицы максимальная погрешность (6.15) не превосходит 10 %.

Вычислим степень идентичности данной зависимости на обучающей последовательности

$$Y(Q) = \frac{\sum_1^n (Q_i^* - Q)^2}{\sum_1^n (Q_i^* - \bar{Q})^2 + \sum_1^n (Q_i^* - Q_i)^2} \quad (6.16)$$

где  $Q^*$  - значения дебита, полученные по (6.15),  $\bar{Q}$  - математическое ожидание исходного дебита,  $Q_i$  - текущие значения исходного дебита. Получим  $Y(Q) = 0,922$ . Максимальная погрешность (6.15) на проверочной последовательности при этом не превысила также 10 % при мере идентичности  $Y(Q) = 0,931$ , табл. 7.26.



Как видно (6.15) достаточно хорошо описывает изменение дебита компрессорных скважин, образующих I группу.

В табл. 6.27-6.30 указаны прогнозные значения дебита компрессорных скважин, образующих II и III группы. Сравнение с истинными значениями дает возможность установить, что максимальная погрешность при этом не превосходит максимальной погрешности на обучающей последовательности, а мера идентичности при этом возросла,  $U(Q) = 0,988$ .

Как видно структура полученной зависимости (6.15) не содержит в себе фактора - устьевого давления, что вновь подтверждает, что данный фактор является невлиющим.

Таким образом, на основе применения вышеизложенных вероятностно-статистических методов было установлено :

1. Рассматриваемые скважины можно сгруппировать по дебитам на отдельные группы. Такое группирование хорошо согласуется с группированием по технологическим режимам данных компрессорных скважин.

2. Выявлены факторы, влияющие на дебит компрессорных скважин. При этом наиболее влияющими являются рабочее давление ( $P_{\text{раб}}$ ), расход закачиваемого агента ( $Q_{\text{г}}$ ) и их сочетание ( $P_{\text{раб}} Q_{\text{г}}$ ).

3. Построенная зависимость достаточно хорошо описывает поведение дебита компрессорных скважин от изменения рабочего давления и расхода закачиваемого агента для всех трех групп, характеризующихся различными технологическими режимами.

Таблица 6.25

| № № скважин |                             |                           |     |          |                             |                           |     |          |                             |                           |     |
|-------------|-----------------------------|---------------------------|-----|----------|-----------------------------|---------------------------|-----|----------|-----------------------------|---------------------------|-----|
| I736        |                             |                           |     | I723     |                             |                           |     | I706     |                             |                           |     |
| №№<br>ПП    | Q <sub>H</sub> исх<br>т/сут | Q <sub>H</sub> *<br>т/сут | %   | №№<br>ПП | Q <sub>H</sub> исх<br>т/сут | Q <sub>H</sub> *<br>т/сут | %   | №№<br>ПП | Q <sub>H</sub> исх<br>т/сут | Q <sub>H</sub> *<br>т/сут | Δ%  |
| I           | 12,34                       | 12,29                     | 0,4 | I        | 12,66                       | 13,10                     | 3,3 | I        | 10,64                       | 9,72                      | 8,6 |
| 2           | 6,48                        | 6,48                      | 0,0 | 2        | 7,82                        | 8,50                      | 8,0 | 2        | 13,80                       | 13,00                     | 5,8 |
| 3           | 8,31                        | 7,80                      | 6,1 | 3        | 8,24                        | 8,12                      | 2,1 | 3        | 9,63                        | 8,83                      | 8,3 |
| 4           | 7,23                        | 6,79                      | 6,1 | 4        | 7,77                        | 8,42                      | 7,7 | 4        | 8,20                        | 8,11                      | 1,1 |
| 5           | 8,52                        | 9,00                      | 5,3 | 5        | 8,00                        | 8,42                      | 5,0 | 5        | 10,69                       | 10,56                     | 1,2 |
| 6           | 8,38                        | 8,50                      | 1,4 | 6        | 8,68                        | 8,42                      | 3,0 | 6        | 8,06                        | 7,86                      | 2,5 |
| 7           | 9,11                        | 8,54                      | 6,2 | 7        | 9,48                        | 8,64                      | 8,8 | 7        | 9,88                        | 9,69                      | 1,9 |
| 8           | 7,50                        | 7,11                      | 5,2 | 8        | 7,86                        | 8,56                      | 8,2 | 8        | 8,47                        | 7,74                      | 8,6 |
| 9           | 8,21                        | 7,76                      | 5,5 | 9        | 8,12                        | 8,42                      | 3,5 | 9        | 9,78                        | 9,08                      | 7,1 |
| 10          | 8,84                        | 9,55                      | 7,4 | 10       | 9,06                        | 8,50                      | 6,2 | 10       | 9,13                        | 8,63                      | 5,5 |
| 11          | 10,56                       | 9,53                      | 9,7 | 11       | 8,82                        | 8,67                      | 1,7 | 11       | 9,33                        | 9,14                      | 2,0 |
| 12          | 7,32                        | 7,72                      | 5,2 | 12       | 7,94                        | 8,74                      | 9,1 | 12       | 8,54                        | 8,04                      | 5,3 |
| 13          | 9,46                        | 9,53                      | 0,7 | 13       | 9,12                        | 8,74                      | 4,1 | 13       | 9,15                        | 9,25                      | 1,1 |
| 14          | 8,66                        | 9,18                      | 5,6 | 14       | 8,88                        | 8,74                      | 1,6 | 14       | 8,98                        | 9,68                      | 7,2 |
| 15          | 8,88                        | 8,35                      | 5,9 | 15       | 8,64                        | 8,74                      | 1,1 | 15       | 8,96                        | 8,43                      | 5,9 |
| 16          | 10,21                       | 10,08                     | 1,3 | 16       | 8,55                        | 8,74                      | 2,2 | 16       | 8,54                        | 8,04                      | 5,8 |
| 17          | 6,24                        | 6,16                      | 1,3 | 17       | 6,86                        | 6,56                      | 4,4 | 17       | 5,90                        | 5,60                      | 5,1 |
| 18          | 6,26                        | 6,53                      | 4,1 | 18       | 6,12                        | 6,56                      | 6,7 | 18       | 8,00                        | 7,42                      | 5,7 |
| 19          | 6,40                        | 5,89                      | 7,9 | 19       | 6,32                        | 6,11                      | 3,3 | 19       | 8,06                        | 7,36                      | 2,5 |
| 20          | 6,44                        | 8,89                      | 8,5 | 20       | 6,78                        | 6,70                      | 1,2 | 20       | 9,17                        | 8,88                      | 3,1 |
| 21          | 7,24                        | 7,04                      | 2,7 | 21       | 6,84                        | 6,70                      | 2,0 | 21       | 9,06                        | 9,25                      | 2,0 |
| 22          | 6,35                        | 6,42                      | 1,1 | 22       | 6,56                        | 6,70                      | 2,1 | 22       | 8,20                        | 8,11                      | 1,1 |
| 23          | 14,46                       | 13,57                     | 6,1 | 23       | 13,60                       | 12,29                     | 9,6 | 23       | 12,87                       | 12,05                     | 6,4 |
| 24          | 9,62                        | 9,53                      | 0,9 | 24       | 10,36                       | 9,53                      | 7,9 | 24       | 10,00                       | 10,50                     | 4,7 |

Таблица 6.26

| № № скважин |                           |                         |     |          |                           |                         |     |          |                           |                         |      |
|-------------|---------------------------|-------------------------|-----|----------|---------------------------|-------------------------|-----|----------|---------------------------|-------------------------|------|
| 1736        |                           |                         |     | 1723     |                           |                         |     | 1706     |                           |                         |      |
| № №<br>ш    | Q <sub>исх</sub><br>т/сут | Q <sub>н</sub><br>т/сут | %   | № №<br>ш | Q <sub>исх</sub><br>т/сут | Q <sub>н</sub><br>т/сут | %   | № №<br>ш | Q <sub>исх</sub><br>т/сут | Q <sub>н</sub><br>т/сут | Δ %  |
| 25          | 12,25                     | 12,18                   | 0,6 | 25       | 5,55                      | 6,16                    | 9,9 | 25       | 10,64                     | 9,92                    | 6,7  |
| 26          | 15,46                     | 14,58                   | 5,7 | 26       | 6,32                      | 6,09                    | 3,6 | 26       | 12,67                     | 11,81                   | 6,8  |
| 27          | 13,84                     | 14,58                   | 5,1 | 27       | 6,81                      | 6,70                    | 1,6 | 27       | 12,15                     | 11,36                   | 6,5  |
| 28          | 12,70                     | 12,29                   | 3,8 | 28       | 6,94                      | 6,46                    | 6,9 | 28       | 10,00                     | 9,72                    | 2,8  |
| 29          | 15,36                     | 14,58                   | 5,3 | 29       | 6,73                      | 7,00                    | 3,8 | 29       | 9,87                      | 9,69                    | 1,8  |
| 30          | 10,64                     | 11,14                   | 4,5 | 30       | 8,14                      | 7,42                    | 8,8 | 30       | 10,55                     | 10,08                   | 4,4  |
| 31          | 10,21                     | 10,36                   | 1,4 | 31       | 11,12                     | 10,52                   | 5,4 | 31       | 11,93                     | 11,36                   | 4,8  |
| 32          | 12,56                     | 12,29                   | 2,1 | 32       | 11,35                     | 12,29                   | 3,6 | 32       | 11,06                     | 11,00                   | 0,5  |
| 33          | 9,68                      | 10,53                   | 8,1 | 33       | 8,94                      | 8,35                    | 6,6 | 33       | 11,52                     | 10,50                   | 8,8  |
| 34          | 10,91                     | 10,25                   | 6,0 | 34       | 8,31                      | 8,35                    | 0,5 | 34       | 11,55                     | 11,81                   | 2,2  |
| 35          | 12,34                     | 11,52                   | 6,6 | 35       | 8,42                      | 8,35                    | 0,8 | 35       | 11,81                     | 11,45                   | 3,0  |
| 36          | 10,84                     | 10,08                   | 7,0 | 36       | 8,24                      | 8,35                    | 1,3 | 36       | 11,25                     | 11,58                   | 2,8  |
| 37          | 10,32                     | 10,08                   | 2,3 | 37       | 7,25                      | 7,86                    | 7,7 | 37       | 9,85                      | 9,25                    | 6,1  |
| 38          | 11,11                     | 11,14                   | 0,2 | 38       | 7,84                      | 7,80                    | 0,5 | 38       | 9,78                      | 9,68                    | 1,0  |
| 39          | 14,28                     | 14,50                   | 1,5 | 39       | 11,31                     | 12,29                   | 8,0 | 39       | 10,32                     | 10,50                   | 1,7  |
| 40          | 13,77                     | 13,81                   | 0,3 | 40       | 13,54                     | 14,64                   | 7,5 | 40       | 11,54                     | 11,08                   | 4,0  |
| 41          | 11,08                     | 11,70                   | 5,3 | 41       | 10,66                     | 11,14                   | 4,3 | 41       | 11,76                     | 11,52                   | 2,0  |
| 42          | 12,21                     | 11,42                   | 6,5 | 42       | 12,79                     | 13,40                   | 4,5 | 42       | 12,13                     | 11,28                   | 7,0  |
| 43          | 10,17                     | 9,47                    | 6,9 | 43       | 10,34                     | 10,17                   | 1,6 | 43       | 11,97                     | 11,28                   | 5,7  |
| 44          | 11,00                     | 10,08                   | 8,3 | 44       | 9,38                      | 9,36                    | 0,2 | 44       | 10,43                     | 10,14                   | 2,8  |
| 45          | 14,22                     | 13,68                   | 3,8 | 45       | 10,41                     | 10,17                   | 2,3 | 45       | 11,51                     | 10,56                   | 8,2  |
| 46          | 12,24                     | 12,40                   | 1,3 | 46       | 10,50                     | 10,17                   | 3,1 | 46       | 10,74                     | 10,08                   | 6,1  |
| 47          | 11,11                     | 10,17                   | 8,4 | 47       | 12,72                     | 13,10                   | 2,9 | 47       | 10,76                     | 9,68                    | 10,0 |
| 48          | 9,68                      | 9,35                    | 3,4 | 48       | 12,87                     | 13,10                   | 1,7 | 48       | 10,58                     | 9,68                    | 8,5  |

Таблица 6.27

| №<br>п/п | $\frac{Q_{исх}}{T_{сут}}$ | $\frac{Q^*}{T_{сут}}$ | $\Delta \%$ | №<br>п/п | $\frac{Q_{исх}}{T_{сут}}$ | $\frac{Q^*}{T_{сут}}$ | $\Delta \%$ |
|----------|---------------------------|-----------------------|-------------|----------|---------------------------|-----------------------|-------------|
| I        | 6,72                      | 6,72                  | 0,0         | 25       | 5,32                      | 5,25                  | 1,3         |
| 2        | 6,93                      | 6,45                  | 6,9         | 26       | 7,00                      | 6,37                  | 9,0         |
| 3        | 6,16                      | 6,62                  | 6,9         | 27       | 6,55                      | 6,37                  | 2,7         |
| 4        | 6,00                      | 6,50                  | 7,7         | 28       | 6,16                      | 6,42                  | 4,0         |
| 5        | 6,24                      | 6,11                  | 2,1         | 29       | 6,96                      | 6,40                  | 8,0         |
| 6        | 6,80                      | 6,40                  | 5,9         | 30       | 6,71                      | 6,71                  | 0,0         |
| 7        | 7,05                      | 6,56                  | 6,9         | 31       | 8,66                      | 8,15                  | 5,9         |
| 8        | 7,00                      | 6,61                  | 5,6         | 32       | 7,94                      | 7,96                  | 0,2         |
| 9        | 8,20                      | 7,69                  | 6,2         | 33       | 7,00                      | 7,30                  | 4,3         |
| 10       | 9,11                      | 8,29                  | 9,0         | 34       | 7,11                      | 7,28                  | 2,3         |
| 11       | 9,24                      | 8,32                  | 9,9         | 35       | 7,15                      | 7,43                  | 3,8         |
| 12       | 9,13                      | 8,44                  | 7,5         | 36       | 7,25                      | 7,58                  | 4,3         |
| 13       | 8,78                      | 8,35                  | 4,9         | 37       | 8,32                      | 8,47                  | 1,8         |
| 14       | 8,94                      | 8,32                  | 6,9         | 38       | 7,11                      | 7,63                  | 6,8         |
| 15       | 8,18                      | 8,18                  | 0,0         | 39       | 6,76                      | 7,10                  | 4,8         |
| 16       | 8,88                      | 8,03                  | 9,6         | 40       | 6,98                      | 6,40                  | 8,3         |
| 17       | 8,06                      | 7,53                  | 6,6         | 41       | 6,55                      | 6,38                  | 2,6         |
| 18       | 7,93                      | 7,20                  | 9,2         | 42       | 6,08                      | 6,43                  | 5,4         |
| 19       | 7,20                      | 7,15                  | 0,7         | 43       | 6,31                      | 6,43                  | 1,8         |
| 20       | 7,17                      | 7,21                  | 0,5         | 44       | 6,28                      | 6,48                  | 3,1         |
| 21       | 7,15                      | 7,17                  | 0,3         | 45       | 6,30                      | 6,43                  | 2,0         |
| 22       | 7,21                      | 7,23                  | 0,3         | 46       | 6,32                      | 6,48                  | 2,5         |
| 23       | 7,64                      | 7,31                  | 5,6         | 47       | 6,25                      | 6,43                  | 2,8         |
| 24       | 5,26                      | 5,61                  | 6,2         | 48       | 6,48                      | 4,48                  | 0,0         |

Таблица 6.28

| №<br>п/п | $Q_{H,исх}$<br>т/сут | $Q_{H}^*$<br>т/сут | $\Delta$ % | №<br>п/п | $Q_{H,исх}$<br>т/сут | $Q_{H}^*$<br>т/сут | $\Delta$ % |
|----------|----------------------|--------------------|------------|----------|----------------------|--------------------|------------|
| I        | 5,88                 | 6,25               | 5,9        | 25       | 6,15                 | 6,44               | 4,5        |
| 2        | 5,96                 | 6,21               | 4,0        | 26       | 6,67                 | 6,81               | 2,0        |
| 3        | 6,31                 | 6,76               | 6,6        | 27       | 6,17                 | 6,19               | 0,3        |
| 4        | 6,12                 | 6,61               | 7,4        | 28       | 6,21                 | 6,66               | 6,7        |
| 5        | 6,77                 | 6,33               | 6,5        | 29       | 5,44                 | 5,59               | 2,7        |
| 6        | 5,90                 | 6,09               | 3,6        | 30       | 4,93                 | 4,93               | 0,0        |
| 7        | 6,66                 | 6,63               | 0,4        | 31       | 4,33                 | 4,23               | 2,3        |
| 8        | 6,15                 | 6,04               | 1,8        | 32       | 4,18                 | 4,22               | 0,9        |
| 9        | 6,12                 | 6,14               | 0,3        | 33       | 4,21                 | 4,29               | 1,8        |
| 10       | 6,00                 | 6,13               | 2,1        | 34       | 4,49                 | 4,62               | 2,8        |
| 11       | 6,24                 | 6,44               | 3,1        | 35       | 4,66                 | 4,64               | 0,4        |
| 12       | 6,65                 | 6,42               | 3,4        | 36       | 4,85                 | 4,57               | 5,8        |
| 13       | 6,66                 | 6,75               | 1,3        | 37       | 4,66                 | 4,30               | 7,7        |
| 14       | 6,94                 | 7,05               | 1,5        | 38       | 4,17                 | 4,17               | 0,0        |
| 15       | 7,20                 | 7,18               | 0,3        | 39       | 3,94                 | 4,10               | 3,9        |
| 16       | 6,38                 | 6,68               | 4,5        | 40       | 4,35                 | 4,14               | 4,8        |
| 17       | 6,44                 | 6,74               | 4,4        | 41       | 6,71                 | 6,19               | 7,7        |
| 18       | 6,87                 | 6,73               | 2,0        | 42       | 7,26                 | 7,06               | 2,7        |
| 19       | 6,93                 | 6,61               | 4,6        | 43       | 8,20                 | 8,07               | 1,6        |
| 20       | 6,55                 | 6,52               | 0,4        | 44       | 8,40                 | 8,50               | 1,2        |
| 21       | 6,31                 | 6,48               | 2,6        | 45       | 8,45                 | 8,25               | 2,3        |
| 22       | 6,12                 | 5,97               | 2,4        | 46       | 6,34                 | 6,88               | 7,8        |
| 23       | 5,61                 | 5,90               | 4,9        | 47       | 6,11                 | 6,46               | 5,4        |
| 24       | 4,97                 | 5,39               | 7,8        | 48       | 6,35                 | 6,18               | 2,7        |

Таблица 6.29

| №<br>п/п | $Q_{\text{исх}}$<br>т/сут | $Q^*$<br>т/сут | $\Delta$ % | №<br>ш | $Q_{\text{исх}}$<br>т/сут | $Q^*$<br>т/сут | $\Delta$ % |
|----------|---------------------------|----------------|------------|--------|---------------------------|----------------|------------|
| I        | 4,85                      | 5,32           | 8,8        | 25     | 4,56                      | 4,80           | 5,0        |
| 2        | 4,80                      | 4,70           | 2,1        | 26     | 5,24                      | 5,39           | 2,8        |
| 3        | 5,10                      | 4,69           | 8,0        | 27     | 6,52                      | 6,07           | 6,9        |
| 4        | 4,45                      | 4,45           | 0,0        | 28     | 7,36                      | 7,65           | 3,8        |
| 5        | 4,54                      | 4,30           | 5,3        | 29     | 7,12                      | 7,42           | 4,0        |
| 6        | 4,50                      | 4,59           | 1,9        | 30     | 5,15                      | 4,79           | 7,0        |
| 7        | 4,60                      | 4,57           | 0,6        | 31     | 5,15                      | 5,45           | 5,5        |
| 8        | 4,73                      | 4,57           | 3,4        | 32     | 6,00                      | 6,03           | 0,5        |
| 9        | 4,60                      | 4,31           | 6,3        | 33     | 6,00                      | 6,10           | 1,6        |
| 10       | 4,12                      | 4,22           | 2,3        | 34     | 6,40                      | 6,44           | 0,6        |
| 11       | 4,06                      | 4,10           | 1,0        | 35     | 6,75                      | 6,48           | 4,0        |
| 12       | 4,00                      | 4,13           | 3,1        | 36     | 6,60                      | 6,37           | 3,5        |
| 13       | 3,61                      | 3,90           | 7,4        | 37     | 5,93                      | 6,32           | 6,2        |
| 14       | 4,33                      | 4,21           | 2,8        | 38     | 6,65                      | 6,43           | 3,3        |
| 15       | 4,90                      | 5,00           | 2,0        | 39     | 6,00                      | 6,32           | 5,0        |
| 16       | 5,54                      | 5,34           | 3,6        | 40     | 7,00                      | 7,37           | 5,0        |
| 17       | 5,92                      | 5,88           | 0,7        | 41     | 7,12                      | 7,37           | 3,4        |
| 18       | 6,86                      | 6,69           | 2,5        | 42     | 6,78                      | 7,05           | 3,8        |
| 19       | 6,74                      | 6,68           | 0,9        | 43     | 6,44                      | 6,55           | 1,7        |
| 20       | 6,90                      | 6,81           | 1,3        | 44     | 4,50                      | 4,85           | 6,2        |
| 21       | 6,24                      | 6,74           | 7,4        | 45     | 5,12                      | 4,77           | 6,8        |
| 22       | 5,90                      | 6,22           | 5,1        | 46     | 4,31                      | 4,77           | 9,6        |
| 23       | 5,75                      | 5,84           | 1,5        | 47     | 5,50                      | 5,22           | 5,1        |
| 24       | 4,24                      | 4,71           | 10,0       | 48     | 5,50                      | 5,31           | 3,4        |

Таблица 6.30

| № №<br>ВН | Q, мсх<br>т/сут | Q <sub>н</sub><br>т/сут | Δ % | № №<br>ВН | Q, мсх<br>т/сут | Q <sub>н</sub><br>т/сут | Δ %  |
|-----------|-----------------|-------------------------|-----|-----------|-----------------|-------------------------|------|
| 1         | 12,80           | 12,00                   | 6,2 | 25        | 16,70           | 15,80                   | 5,4  |
| 2         | 9,86            | 9,50                    | 3,6 | 26        | 17,24           | 16,82                   | 2,4  |
| 3         | 8,50            | 8,04                    | 5,4 | 27        | 18,52           | 18,23                   | 1,5  |
| 4         | 10,46           | 10,79                   | 3,0 | 28        | 15,10           | 13,87                   | 8,1  |
| 5         | 11,00           | 10,85                   | 1,3 | 29        | 19,85           | 19,54                   | 1,5  |
| 6         | 11,82           | 11,07                   | 6,3 | 30        | 16,05           | 14,50                   | 7,1  |
| 7         | 12,06           | 12,24                   | 1,5 | 31        | 20,55           | 20,87                   | 1,5  |
| 8         | 12,25           | 12,81                   | 4,3 | 32        | 8,46            | 8,26                    | 2,3  |
| 9         | 15,43           | 15,06                   | 2,7 | 33        | 8,48            | 8,02                    | 5,4  |
| 10        | 15,24           | 15,45                   | 1,3 | 34        | 8,00            | 7,47                    | 6,6  |
| 11        | 12,18           | 12,51                   | 2,6 | 35        | 20,00           | 19,49                   | 2,5  |
| 12        | 11,78           | 11,55                   | 1,9 | 36        | 23,23           | 22,06                   | 5,0  |
| 13        | 10,20           | 10,15                   | 0,5 | 37        | 18,60           | 17,43                   | 6,3  |
| 14        | 12,70           | 12,81                   | 0,8 | 38        | 17,00           | 16,14                   | 5,0  |
| 15        | 14,50           | 14,09                   | 2,8 | 39        | 15,10           | 14,04                   | 7,0  |
| 16        | 17,55           | 17,06                   | 2,8 | 40        | 23,25           | 21,70                   | 6,6  |
| 17        | 21,78           | 23,13                   | 5,8 | 41        | 20,56           | 20,05                   | 2,5  |
| 18        | 21,30           | 22,72                   | 6,2 | 42        | 29,60           | 27,11                   | 8,4  |
| 19        | 22,60           | 22,72                   | 0,3 | 43        | 30,12           | 27,11                   | 10,0 |
| 20        | 18,50           | 19,15                   | 3,4 | 44        | 27,78           | 27,11                   | 2,4  |
| 21        | 18,50           | 18,96                   | 2,4 | 45        | 20,62           | 20,05                   | 2,7  |
| 22        | 15,24           | 14,35                   | 5,8 | 46        | 16,12           | 15,85                   | 1,7  |
| 23        | 15,00           | 13,87                   | 7,5 | 47        | 15,43           | 15,58                   | 0,6  |
| 24        | 10,48           | 17,10                   | 7,1 | 48        | 12,00           | 12,50                   | 4,0  |

Проверим возможность использования формулы (6.15) для оценки среднесуточного измерения количества нефти в продукции скважины при использовании в расчетах среднесуточных значений расхода закачиваемого агента и рабочего давления в задачах <sup>оптимизации</sup> работы компрессорных скважин. Приведем пример расчета для скважины I736.

Среднесуточные значения показателей, рассчитанные по данным табл. 6.1 следующие :

$$Q_{н\text{ ср.}} = 10,1 \text{ (т./сут)}, \quad Q_{г\text{ ср.}} = 45,18 \text{ (м}^3\text{/час)}, \quad P_{\text{раб. ср.}} = 40,94 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$$

По формуле (6.15) получаем :

$$Q_{н\text{ ср.}} = 4,61 + P_{\text{раб}} Q_{г} (0,39 \cdot 10^{-5} P_{\text{раб}} Q_{г} - 0,0042) = 4,61 + 40,94 \cdot 45,18 (0,39 \cdot 10^{-5} \cdot 40,94 \cdot 45,18 - 0,0042) = 10,16$$

Относительная погрешность оценки равна

$$\delta = \frac{|Q_{н\text{ ср.}} - Q_{н\text{ ср.}}^*|}{Q_{н\text{ ср.}}} \cdot 100\% = \frac{|10,8 - 9,81|}{10,8} \cdot 100\% = 9,2\%$$

Как следует из таблицы 6.31 прогнозирующая способность формулы (6.15) по отношению к среднесуточным измерениям количества нефти вполне приемлемая (погрешность не превышает 6 % по всем скважинам).

Оценим чувствительность (величину возможной ошибки) формулы (6.15) в зависимости от точности измерений входных параметров.

С этой целью продифференцируем выражение (6.15) по каждому из переменных и запишем величину полного дифференциала

$$dQ_{н} = (2 \cdot 0,39 \cdot 10^{-5} P_{г}^2 - 0,0042 Q_{г}) dP_{\text{раб}} + (2 \cdot 0,39 \cdot 10^{-5} P^2 Q - 0,0042 P) dQ_{г} \quad (6.17)$$



Таблица 6.31

| $Q_{H,ср.} \vdots$ | $Q_{Г,ср.} \vdots$ | $\frac{I723}{P_{раб.,ср.}} \vdots$ | $Q_H \vdots$ | $\Delta \%$ |
|--------------------|--------------------|------------------------------------|--------------|-------------|
| 8,98               | 45,04              | 37,13                              | 8,49         | 5,4         |
| $Q_{H,ср.} \vdots$ | $Q_{Г,ср.} \vdots$ | $\frac{I706}{P_{раб.,ср.}} \vdots$ | $Q_H \vdots$ | $\Delta \%$ |
| 10,22              | 39,46              | 45,43                              | 9,61         | 6,0         |
| $Q_{H,ср.} \vdots$ | $Q_{Г,ср.} \vdots$ | $\frac{I736}{P_{раб.,ср.}} \vdots$ | $Q_H \vdots$ | $\Delta \%$ |
| 10,19              | 45,12              | 40,94                              | 10,16        | 0,3         |
| $Q_{H,ср.} \vdots$ | $Q_{Г,ср.} \vdots$ | $\frac{I655}{P_{раб.,ср.}} \vdots$ | $Q_H \vdots$ | $\Delta \%$ |
| 7,18               | 43,97              | 33,92                              | 7,02         | 2,2         |
| $Q_{H,ср.} \vdots$ | $Q_{Г,ср.} \vdots$ | $\frac{I660}{P_{раб.,ср.}} \vdots$ | $Q_H \vdots$ | $\Delta \%$ |
| 6,02               | 32,79              | 41,87                              | 6,19         | 2,7         |
| $Q_{H,ср.} \vdots$ | $Q_{Г,ср.} \vdots$ | $\frac{I717}{P_{раб.,ср.}} \vdots$ | $Q_H \vdots$ | $\Delta \%$ |
| 5,54               | 33,23              | 37,36                              | 5,41         | 2,3         |
| $Q_{H,ср.} \vdots$ | $Q_{Г,ср.} \vdots$ | $\frac{I669}{P_{раб.,ср.}} \vdots$ | $Q_H \vdots$ | $\Delta \%$ |
| 16,44              | 55,23              | 40,05                              | 15,54        | 5,5         |

Преобразуем выражение (6.17) следующим образом

$$\begin{aligned} \frac{dQ_n}{Q_n} &= \frac{(2 \cdot 0,39 \cdot 10^{-5} P_{\text{раб}} Q_{\Gamma}^2 - 0,0042 Q_{\Gamma} P_{\text{раб}})}{4,61 + P_{\text{раб}} Q_{\Gamma} (0,39 \cdot 10^{-5} P_{\text{раб}} Q_{\Gamma} - 0,0042)} \frac{dP_{\text{раб}}}{P_{\text{раб}}} \\ &+ \frac{(2 \cdot 0,39 \cdot 10^{-5} P_{\text{раб}} Q_{\Gamma} - 0,0042)}{4,61 + P_{\text{раб}} Q_{\Gamma} (0,39 \cdot 10^{-5} P_{\text{раб}} Q_{\Gamma} - 0,0042)} \frac{dQ_{\Gamma}}{Q_{\Gamma}} \\ &= \frac{(2 \cdot 0,39 \cdot 10^{-5} P Q - 0,0042) P Q}{4,61 + (0,39 \cdot 10^{-5} P Q - 0,0042) PQ} \left( \frac{dP}{P} + \frac{dQ}{Q} \right) \end{aligned}$$

Подставляя вместо  $P_{\text{раб}}$  и  $Q_{\Gamma}$  их средние значения получим оценку для относительной погрешности  $\delta_n$  измерения количества нефти, в зависимости от величин  $\delta_{\text{раб}}$  и  $\delta_{\Gamma}$ . Так для окважины I736 имеем :

$$\delta_n \leq 1,84 (\delta_{\text{раб}} + \delta_{\Gamma}) \quad (6.18)$$

Таким образом результаты расчетов, приведенных в табл. 6.15-6.31 (этапы II, III) совместно с выражениями (6.18) могут ослужить для полной оценки точности измеряемых и прогнозируемых параметров.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Приложение. Таблица I.I.

| $n_2$      | $n_1$ |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|            | II    | I2 | I3 | I4 | I5 | I6 | I7 | I8 | I9 | 20 | 2I | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| $P = 0,05$ |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| II         | 6     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| I2         | 6     | 6  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| I3         | 6     | 6  | 6  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| I4         | 7     | 7  | 6  | 6  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| I5         | 7     | 7  | 6  | 6  | 6  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| I6         | 7     | 7  | 7  | 7  | 6  | 6  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| I7         | 7     | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| I8         | 7     | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  |    |    |    |    |    |    |    |    |
| I9         | 7     | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  |    |    |    |    |    |    |    |
| 20         | 7     | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  |    |    |    |    |    |    |
| 2I         | 8     | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  |    |    |    |    |    |
| 22         | 8     | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  |    |    |    |    |
| 23         | 8     | 8  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  |    |    |    |
| 24         | 8     | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 7  | 7  | 7  | 7  |    |
| 25         | 8     | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  |
| 26         | 8     | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  |

Приложение.  
Таблица I.2.

| $n_2$      | $n_1$ |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|            | 11    | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| $P = 0,05$ |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 11         | 9     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 12         | 9     | 9  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 13         | 9     | 9  | 9  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 14         | 9     | 9  | 9  | 9  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 15         | 9     | 9  | 9  | 9  | 9  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 16         | 9     | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 17         | 10    | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 18         | 10    | 10 | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 19         | 10    | 10 | 10 | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  |    |    |    |    |    |    |    |
| 20         | 10    | 10 | 10 | 10 | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  |    |    |    |    |    |    |
| 21         | 11    | 10 | 10 | 10 | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  |    |    |    |    |    |
| 22         | 11    | 11 | 10 | 10 | 10 | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  |    |    |    |    |
| 23         | 11    | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  |    |    |    |
| 24         | 12    | 11 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  |    |    |
| 25         | 12    | 11 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  |    |
| 26         | 12    | 12 | 11 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  | 9  |

## Приложение.

Таблица 2.1.

| $f_2$ | Уровень значимости 0,01 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|       | 1                       | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 8    | 12   | 24   |      |
| 1     | 4052                    | 4999 | 5403 | 5625 | 5764 | 5859 | 5981 | 6106 | 6334 | 6366 |
| 2     | 98,5                    | 99,0 | 99,2 | 99,3 | 99,3 | 99,4 | 99,3 | 99,4 | 99,5 | 99,5 |
| 3     | 34,1                    | 30,8 | 29,5 | 28,7 | 28,2 | 27,9 | 27,5 | 27,1 | 26,6 | 26,1 |
| 4     | 21,2                    | 18,0 | 16,7 | 16,0 | 15,5 | 15,2 | 14,8 | 14,4 | 13,9 | 13,5 |
| 5     | 16,3                    | 13,3 | 12,1 | 11,4 | 11,0 | 10,7 | 10,3 | 9,9  | 9,5  | 9,0  |
| 6     | 13,7                    | 10,9 | 9,8  | 9,2  | 8,8  | 8,5  | 8,1  | 7,7  | 7,3  | 6,9  |
| 7     | 12,3                    | 9,6  | 8,5  | 7,9  | 7,5  | 7,2  | 6,8  | 6,5  | 6,1  | 5,7  |
| 8     | 11,3                    | 8,7  | 7,6  | 7,0  | 6,6  | 6,4  | 6,0  | 5,7  | 5,3  | 4,9  |
| 9     | 10,6                    | 8,0  | 7,0  | 6,4  | 6,1  | 5,8  | 5,5  | 5,1  | 4,7  | 4,3  |
| 10    | 10,0                    | 7,6  | 6,6  | 6,0  | 5,6  | 5,4  | 5,1  | 4,7  | 4,3  | 3,9  |
| 11    | 9,7                     | 7,2  | 6,2  | 5,7  | 5,3  | 5,1  | 4,7  | 4,4  | 4,0  | 3,5  |
| 12    | 9,3                     | 6,9  | 6,0  | 5,4  | 5,1  | 4,8  | 4,5  | 4,2  | 3,8  | 3,4  |
| 13    | 9,1                     | 6,7  | 5,7  | 5,2  | 4,9  | 4,6  | 4,3  | 4,0  | 3,6  | 3,2  |
| 14    | 8,9                     | 6,5  | 5,6  | 5,0  | 4,7  | 4,5  | 4,1  | 3,8  | 3,4  | 3,0  |
| 15    | 8,7                     | 6,4  | 5,4  | 4,9  | 4,6  | 4,3  | 4,0  | 3,7  | 3,3  | 2,9  |
| 16    | 8,5                     | 6,2  | 5,3  | 4,8  | 4,4  | 4,2  | 3,9  | 3,6  | 3,2  | 2,8  |
| 17    | 8,4                     | 6,1  | 5,2  | 4,7  | 4,3  | 4,1  | 3,8  | 3,5  | 3,1  | 2,7  |
| 18    | 8,3                     | 6,0  | 5,1  | 4,6  | 4,3  | 4,0  | 3,7  | 3,4  | 3,0  | 2,6  |
| 19    | 8,2                     | 5,9  | 5,0  | 4,5  | 4,2  | 3,9  | 3,6  | 3,3  | 2,9  | 2,4  |
| 20    | 8,1                     | 5,9  | 4,9  | 4,4  | 4,1  | 3,9  | 3,6  | 3,2  | 2,9  | 2,4  |
| 22    | 7,9                     | 5,7  | 4,8  | 4,3  | 4,0  | 3,8  | 3,5  | 3,1  | 2,8  | 2,3  |
| 24    | 7,8                     | 5,6  | 4,7  | 4,2  | 3,9  | 3,7  | 3,3  | 3,0  | 2,7  | 2,2  |
| 26    | 7,7                     | 5,5  | 4,6  | 4,1  | 3,8  | 3,6  | 3,3  | 3,0  | 2,6  | 2,1  |
| 28    | 7,5                     | 5,5  | 4,6  | 4,1  | 3,8  | 3,5  | 3,2  | 2,9  | 2,5  | 2,1  |
| 30    | 7,6                     | 5,4  | 4,5  | 4,0  | 3,7  | 3,5  | 3,2  | 2,8  | 2,5  | 2,0  |
| 40    | 7,3                     | 5,2  | 4,3  | 3,8  | 3,5  | 3,3  | 3,0  | 2,7  | 2,3  | 1,8  |
| 60    | 7,1                     | 5,0  | 4,1  | 3,7  | 3,3  | 3,1  | 2,8  | 2,5  | 2,1  | 1,6  |
| 120   | 6,9                     | 4,8  | 4,0  | 3,5  | 3,2  | 3,0  | 2,7  | 2,3  | 2,0  | 1,4  |
|       | 6,6                     | 4,6  | 3,8  | 3,3  | 3,0  | 2,8  | 2,5  | 2,2  | 1,8  | 1,0  |

Приложение.  
Таблица 2.2.

| $f_2$ | $f_1$ | Уровень значимости 0,05 |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |
|-------|-------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|
|       |       | 1                       | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 12    | 24    |       |  |  |
| I     |       | 164,4                   | 199,5 | 215,7 | 224,6 | 230,2 | 234,0 | 244,9 | 249,0 | 254,3 |  |  |
| 2     |       | 18,5                    | 19,2  | 19,2  | 19,3  | 19,3  | 19,3  | 19,4  | 19,5  | 19,5  |  |  |
| 3     |       | 10,1                    | 9,6   | 9,3   | 9,1   | 9,0   | 8,9   | 8,7   | 8,6   | 8,5   |  |  |
| 4     |       | 7,7                     | 6,9   | 6,6   | 6,4   | 6,3   | 6,2   | 5,9   | 5,8   | 5,6   |  |  |
| 5     |       | 6,6                     | 5,8   | 5,4   | 5,2   | 5,1   | 5,0   | 4,7   | 4,5   | 4,4   |  |  |
| 6     |       | 6,0                     | 5,1   | 4,8   | 4,5   | 4,4   | 4,3   | 4,0   | 3,8   | 3,7   |  |  |
| 7     |       | 5,6                     | 4,7   | 4,4   | 4,1   | 4,0   | 3,9   | 3,6   | 3,4   | 3,2   |  |  |
| 8     |       | 5,3                     | 4,5   | 4,1   | 3,8   | 3,7   | 3,6   | 3,3   | 3,1   | 2,9   |  |  |
| 9     |       | 5,1                     | 4,3   | 3,9   | 3,6   | 3,5   | 3,4   | 3,1   | 2,9   | 2,7   |  |  |
| 10    |       | 5,0                     | 4,1   | 3,7   | 3,5   | 3,3   | 3,2   | 2,9   | 2,7   | 2,5   |  |  |
| 11    |       | 4,8                     | 4,0   | 3,6   | 3,4   | 3,2   | 3,1   | 2,8   | 2,6   | 2,4   |  |  |
| 12    |       | 4,8                     | 3,9   | 3,5   | 3,3   | 3,1   | 3,0   | 2,7   | 2,5   | 2,3   |  |  |
| 13    |       | 4,7                     | 3,8   | 3,4   | 3,2   | 3,0   | 2,9   | 2,6   | 2,4   | 2,2   |  |  |
| 14    |       | 4,6                     | 3,7   | 3,3   | 3,1   | 3,0   | 2,9   | 2,5   | 2,3   | 2,1   |  |  |
| 15    |       | 4,5                     | 3,7   | 3,3   | 3,1   | 2,9   | 2,8   | 2,5   | 2,3   | 2,1   |  |  |
| 16    |       | 4,5                     | 3,6   | 3,2   | 3,0   | 2,9   | 2,7   | 2,4   | 2,2   | 2,0   |  |  |
| 17    |       | 4,5                     | 3,6   | 3,2   | 3,0   | 2,8   | 2,7   | 2,4   | 2,2   | 2,0   |  |  |
| 18    |       | 4,4                     | 3,6   | 3,2   | 2,9   | 2,8   | 2,7   | 2,3   | 2,1   | 1,9   |  |  |
| 19    |       | 4,4                     | 3,5   | 3,1   | 2,9   | 2,7   | 2,6   | 2,3   | 2,1   | 1,8   |  |  |
| 20    |       | 4,4                     | 3,5   | 3,1   | 2,9   | 2,7   | 2,6   | 2,3   | 2,1   | 1,8   |  |  |
| 22    |       | 4,3                     | 3,4   | 3,1   | 2,8   | 2,7   | 2,6   | 2,2   | 2,0   | 1,8   |  |  |
| 24    |       | 4,3                     | 3,4   | 3,0   | 2,8   | 2,6   | 2,5   | 2,2   | 2,0   | 1,7   |  |  |
| 26    |       | 4,2                     | 3,4   | 3,0   | 2,7   | 2,6   | 2,4   | 2,1   | 1,9   | 1,7   |  |  |
| 28    |       | 4,2                     | 3,3   | 2,9   | 2,7   | 2,6   | 2,4   | 2,1   | 1,9   | 1,6   |  |  |
| 30    |       | 4,2                     | 3,3   | 2,9   | 2,7   | 2,5   | 2,4   | 2,1   | 1,9   | 1,6   |  |  |
| 40    |       | 4,1                     | 3,2   | 2,9   | 2,6   | 2,5   | 2,3   | 2,0   | 1,8   | 1,5   |  |  |
| 60    |       | 4,0                     | 3,2   | 2,8   | 2,5   | 2,4   | 2,3   | 1,9   | 1,7   | 1,4   |  |  |
| 120   |       | 3,9                     | 3,1   | 2,7   | 2,5   | 2,3   | 2,2   | 1,8   | 1,6   | 1,3   |  |  |
|       |       | 3,8                     | 3,0   | 2,6   | 2,4   | 2,2   | 2,1   | 1,8   | 1,5   | 1,0   |  |  |

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Дж.Бокс, Г.Дженкис - "Анализ временных рядов. Прогноз и управление", выпуск I "Мир", М., 1974.
2. А.Н.Большев, Н.В. Смирнов - "Таблицы математической статистики", "Наука", М., 1965.
3. В.Н.Кульчицкий, С.Г. Патереу, О.В.Шулудько - " Модифицированный, упрощенный алгоритм по методу группового учета аргументов", Киев, РФАП при СКБ ин-титета кибернетики АН УССР, 1976.
4. П.М.Огибалов, А.Х.Мирзеджанзаде - "Механика физических процессов". Изд. МГУ, М., 1976.



|  | стр. |
|--|------|
| 1. Введение .. .. .  | 2    |
| 2. Определение пластового давления по данным гидродинамических исследований скважин .. .. .  | 6    |
| 2.1. Оценка пластового давления по недовосстановленной КВД на основе метода самоорганизующихся моделей .. .. .                             | 6    |
| 2.2. Прогнозирование технологических показателей разработки на основе моделей авторегрессии и интегрированного скользящего среднего ..     | 10   |
| 2.2.1. Основные понятия о процессе АРПСС .. ..   | 10   |
| 2.2.2. Пример расчёта пластового давления на основе использования моделей АРПСС .. .. .  | 16   |
| 3. Диагностика состояния призабойной зоны пласта и выбор фильтрационной модели .. .. .   | 20   |
| 3.1. Теоретические основы диагностического принципа выбора по данным гидродинамических исследований скважин .. .. .                        | 20   |
| 3.2. Методика вычисления детерминированных моментов давления .. .. .   | 24   |
| 3.3. Уточнение интервалов диагностирования .. ..   | 29   |
| 4. Методы оценки технологических показателей работы скважин и пластов без проведения специальных гидродинамических исследований .. .. .    | 32   |
| 4.1. Определение коэффициента продуктивности скважины по результатам корреляционного анализа временных колебаний дебита и давления .. .. . | 32   |
| 4.2. Метод оценки величины текущего пластового давления и коэффициента продуктивности по данным эксплуатации скважин .. .. .               | 31   |
| 5. Диагностирование проявления неьютоновских свойств пластовыми системами по данным взаимодействия скважин                                 |      |
| 5.1. Краткие теоретические основы метода .. ..   | 44   |
| 6. Выбор оптимального режима работы компрессорных скважин  | 50   |
| Приложение .. .. .   | 96   |
| Литература .. ..   | 101  |