

*На правах рукописи*

ЗУБОВ Максим Владиславович

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ПОДДЕРЖАНИЯ  
ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ТЕХНОЛОГИИ ДИСКРЕТНЫХ ЗАКАЧЕК

05.13.18 – Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень – 2006

Работа выполнена на кафедре механики многофазных систем Тюменского государственного университета

Научный руководитель доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Кислицын Анатолий Александрович**

Научный консультант кандидат технических наук  
**Горбатилов Виктор Андреевич**

Официальные оппоненты доктор технических наук,  
профессор  
**Файзуллин Рашид Тагирович**  
кандидат физико-математических наук,  
доцент  
**Мусакаев Наиль Габсалимович**

Ведущая организация ОАО «СибНИИ НП»

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2006 г., в «\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета К 212.274.01 при Тюменском государственном университете по адресу 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15А, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Бутакова Н.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

В настоящее время приобретают особую актуальность проблемы повышения эффективности разработки месторождений – увеличение добычи нефти и снижение ее обводненности, повышение нефтеотдачи пластов, достижение экономической эффективности.

Заводнение является основным способом поддержания пластового давления при разработке нефтяных месторождений, а системы поддержания пластового давления (системы ППД) – одним из наиболее крупных потребителей электроэнергии в нефтедобыче, поэтому в общей проблеме повышения эффективности разработки одним из основных аспектов является совершенствование технологий заводнения и модернизация систем ППД.

Применяемая технология заводнения – технология непрерывных закачек (ТНЗ) не соответствует новым требованиям вследствие ее низкого уровня управляемости и информативности, а ориентированные на нее системы ППД не отвечают новым повышенным требованиям как в части эффективности заводнения (маневренность, избирательность, набор, диапазон и виды воздействий) так и в части собственной энергоэффективности.

Разработанная в институте ОАО «Гипротюменнефтегаз» технология дискретных закачек - ТДЗ (патент на изобретение №2186954, приоритет от 19.07.2000) не имеет недостатков присущих технологии непрерывных закачек. При технологии дискретных закачек заводнение, как основной способ воздействия на эксплуатационный объект, приобретает ряд дополнительных возможностей как в сфере разработки - расширение диапазона воздействий до пределов технических возможностей системы ППД с их дифференциацией по скважинам (объемы закачки, расходы, давления, режимы закачки - непрерывный, прерывистый, импульсный, волновой), так и в области эксплуатации самих систем ППД – исключение непроизводительных затрат энергии, оптимизация режимов работы систем по минимуму энергозатрат ( $\mathcal{E}_{min}$ ) на выполнение технологического задания (энергосбережение).

Реализация данной технологии в полном объеме и достижение высоких показателей, как в эффективности заводнения, так и в энергосбережении, возможны только при наличии соответствующего программного обеспечения – имитационной модели (ИМ), позволяющей моделировать работу систем ППД и решать задачи контроля и управления системой ППД.

Перечень основных задач по контролю и управлению системами ППД при ТДЗ, решаемых на имитационной модели:

- 1) Оценка суточного задания по закачкам  $W_{зад} = \sum w_{зад.i}$  на техническую возможность выполнения и на величину энергетических затрат.
- 2) Расчет оптимального по  $\mathcal{E}_{min}$  графика закачек на сутки (цикл) для данного  $W_{зад} = \sum w_{зад.i}$ .
- 3) Контроль исправности сети водоводов высокого давления (ВВД) – обнаружение и локализация порывов и утечек.
- 4) Получение в процессе эксплуатации данных по характеристикам скважин, трубопроводов, насосных агрегатов и отображение динамики их изменения, ведение баз данных (БД) по этим показателям.
- 5) Оперативный контроль состояния систем ППД.

Здесь же и оперативное решение таких задач текущей эксплуатации, как определение и устранение узких мест сети высоконапорных водоводов путем введения колец и лупингов.

Современный уровень разработки и эксплуатации месторождений связан с постоянно действующими геолого-технологическими моделями (ПД ГТМ) эксплуатационных объектов, для формирования и использования которых нужны управляемые воздействия, что в полной мере и обеспечивается новой технологией. Имитационная модель с ее базами данных по нагнетательным скважинам является источником дополнительных данных для ПД ГТМ с возможностью оперативно отслеживать динамику их изменений.

При технологии дискретных закачек с использованием имитационной модели характеристики скважин могут быть получены прямо в процессе эксплуатации без прекращения закачки и проведения специальных исследований.

### **Цели и задачи:**

- 1) Проанализировать существующие методы и алгоритмы гидравлического расчета трубопроводных систем и выбрать наиболее приемлемые для реализации в имитационной модели.
- 2) Разработать математическую модель системы ППД и на ее основе - программный комплекс для моделирования режимов работы систем ППД при ТДЗ.
- 3) Разработать методику определения оптимального графика закачки.
- 4) Разработать методику определения местоположения (локализации) утечек в сети высоконапорных водоводов.

### **Методы решения задач:**

- Метод математического моделирования для разработки имитационной модели.
- Методы последовательных приближений.
- Метод оптимизации при определении режимов работы систем ППД.

### **Научная новизна результатов полученных в работе:**

1. Разработана имитационная модель систем ППД. Модель реализована в виде пакета программ, который позволяет выполнять гидравлические расчеты систем ППД и моделирование режимов их функционирования.
2. Выбраны рациональные алгоритмы гидравлического расчета систем: для систем древовидной структуры – алгоритм на основе метода простой итерации; для систем с наличием кольцевых участков – метод узловых давлений. Оба метода адаптированы для расчета систем ППД.
3. Разработана методика настройки имитационной модели на конкретную реальную систему ППД, включающая процедуру расчета фактических значений коэффициента эквивалентной шероховатости для водоводов сети.
4. Разработана процедура определения оптимального графика закачек.

5. Разработана методика обнаружения и локализации утечек в сети водоводов и нарушений работы нагнетательных скважин.
6. Смоделированы режимы работы в цикле для реальных систем ППД с определением оптимального из них.

#### **Практическая ценность работы.**

Разработка имитационной модели дает возможность организовать управление ТДЗ с реализацией в полной мере ее возможностей и преимуществ: высокая управляемость воздействий на пласт, оптимизация режимов закачки и энергоэффективность, а также возможность получения в процессе эксплуатации оперативной информации об объекте разработки (информативность).

#### **Апробация работы.**

Основные материалы и результаты представленной диссертационной работы докладывались на Всероссийских и международных конференциях и семинарах: VI Всероссийский семинар «Моделирование неравновесных систем» (ИВМ СО РАН, г. Красноярск, 2003 г.), международная научно-техническая конференция, посвященная 40-летию ТюмГНГУ (ТюмГНГУ, г.Тюмень, 2003 г.), 27-я Научно-практическая конференция ОАО «Гипротюменнефтегаз» (ОАО «Гипротюменнефтегаз», г. Тюмень, 2003 г.), межотраслевой научно-методический семинар «Теплофизика, гидродинамика, теплотехника» (ТюмГУ, г. Тюмень, 2004 г.), V Научно-практическая конференция молодых специалистов организаций, осуществляющих виды деятельности, связанной с пользованием участками недр на территории ХМАО Югры, (ЮГУ, г. Ханты-Мансийск, 2005 г.).

Кроме того, данная работа обсуждалась на семинарах, проводимых на физическом факультете в ТюмГУ и в ТФ ИТПМ СО РАН.

Данная работа была поддержана грантом министерства образования РФ, министерства промышленности, науки и технологий РФ и РАН в 2003 году по федеральной целевой программе «Интеграция науки и высшего образования России на 2002-2006 годы» (гос. контракт от 01 октября 2003 г. № 3 3016).

**Публикации:** По результатам диссертации опубликовано 8 научных работ, перечень которых представлен в конце автореферата.

## ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

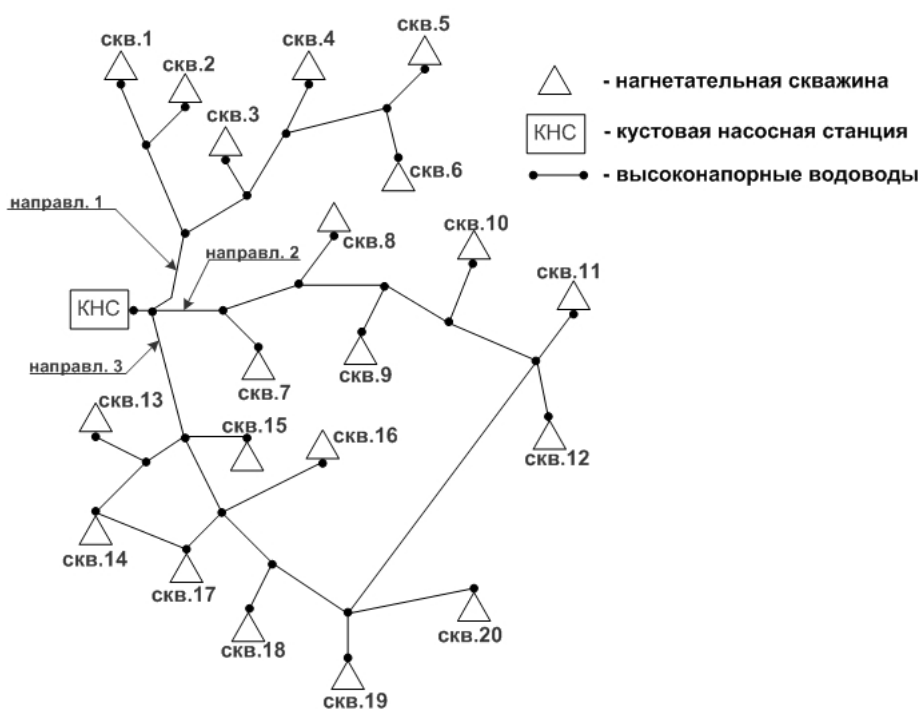
**Во введении** обоснована актуальность темы, определены основные цели и задачи исследования, сформулирована научная новизна и практическая ценность проведенных работ.

**В первой главе** рассматриваются гидравлические сети, их составляющие элементы и их математическое описание, обзор основных подходов и методов решения задач гидравлического расчета – методы поконтурной увязки перепадов давлений (иногда его называют методом Лобачева-Кросса), метод поузловой увязки расходов, экстремальный подход.

Также приводится описание некоторых имеющихся программных продуктов для решения задач проектирования и текущей эксплуатации трубопроводных систем посредством гидравлического расчета.

**Во второй главе** поясняется основное назначение систем поддержания пластового давления при разработке нефтяных месторождений и краткое описание применяемой технологии заводнения – технологии непрерывных закачек с указанием недостатков присущих данной технологии.

Структурная схема системы ППД представлена в виде графа на (рис. 1).



**Рис.1.** Структурная схема системы ППД.

Также в этой главе освещается суть новой технологии дискретных закачек (ТДЗ), разработанной в институте ОАО «Гипротюменнефтегаз». Определяются состав и структура имитационной модели систем ППД как неотъемлемого элемента при реализации ТДЗ, позволяющего моделировать работу систем ППД и решать задачи контроля и управления системой.

Формируется математическая модель системы ППД. В основе решения большинства задач, решаемых посредством имитационной модели, лежит задача гидравлического расчета (или определения потокораспределения) сложных трубопроводных систем с установившимся изотермическим движением однофазной среды.

В работе реализовано два метода решения задачи гидравлического расчета: метод узловых давлений (МУД); алгоритм, основанный на методе простой итерации. Основная идея реализации двух методов заключается в следующем: для расчета систем ППД, имеющих кольцевые участки, оправдано использование метода узловых давлений, так как при применении метода простой итерации итерационный процесс расходится. Но при расчете древовидных систем за счет того, что сама суть МУД подразумевает линеаризацию нелинейных уравнений, точность метода ниже по сравнению с методом итераций. Поэтому для расчета систем не кольцевой структуры используется метод простой итерации при решении системы нелинейных уравнений. Помимо этого, при использовании метода простой итерации не накапливается ошибка округления, хотя скорость сходимости ниже, чем у метода узловых давлений.

Используемые методы были адаптированы для расчета систем ППД.

Метод узловых давлений. Данный метод обобщает известный электротехнический метод узловых напряжений и сочетает преобразования Максвелла к узловым величинам с методом Ньютона. Исходной является система  $m$  уравнений, составленных из условий материального баланса по каждому узлу (в сети  $m$  узлов).



$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n_1} Q_{1i} = 0 \text{ для } 1\text{-го узла,} \\ \sum_{i=1}^{n_2} Q_{2i} = 0 \text{ для } 2\text{-го узла,} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{n_m} Q_{mi} = 0 \text{ для } m\text{-го узла,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $n_1, n_2, \dots, n_m$  - количество водоводов, пересекающихся в  $j$ -м ( $1$ -м,  $2$ -м, ...,  $m$ -м) узле причем  $\{n_1, n_2, \dots, n_m\} \in [1 \dots n]$ , а  $Q_{ji}$  - расход жидкости по этим водоводам (входящий поток считается положительным, выходящий - отрицательным).

В векторной форме ее можно записать как  $Aq = Q$ ,  $\overline{A^T P} = H + SQq$ , (2) где  $A$  - матрица соединений ( $A^T$  - транспонированная матрица соединений).

Процесс последовательных приближений в методе узловых давлений сводится к последовательным поправкам узловых давлений, определяемых через невязки расходов на ветвях. Для математического описания этого процесса необходимо иметь взаимосвязь двух векторов приращений:  $\Delta P$  и  $\Delta q$ . С этой целью проведя линеаризацию уравнений системы (2) и соответствующие преобразования, система уравнений по узлам сети сведется к системе линейных уравнений относительно  $m-1$  узла и  $m-1$  неизвестных  $\Delta P_j$  ( $j = 1, \dots, m-1$ ):

$$A[SQ^{(N)}]^{-1} A^T \Delta P^{(N)} = -2\Delta Q^{(N)}, \quad (3)$$

где  $A[SQ^{(N)}]^{-1} A^T = M^{(N)}$  - квадратная матрица Максвелла (4)

Далее имеем итерационный процесс для определения вектора давлений  $P$ , решаем систему из  $m$  линейных уравнений (3) и производим уточнение вектора  $P$  путем определения небалансов давлений  $\Delta P$  по узлам сети через невязки расходов  $\Delta Q$  на ветвях. Условием для прекращения данного процесса является выполнение заданной точности расчета.

Алгоритм на основе метода простой итерации. Данный метод предназначен для численного решения систем нелинейных уравнений. Для сети водоводов состоящей из  $m$  узлов имеем систему  $m$  нелинейных алгебраических уравнений (1) из условия материального баланса по узлам сети. В свою очередь, расход жидкости по каждому водоводу является функцией от перепада

давлений между его начальным и конечным узлами, поэтому система уравнений (1) может быть записана в виде:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n_1} f_{1i}(\Delta p_{1i}) = 0 \text{ для } 1\text{-го узла,} \\ \sum_{i=1}^{n_2} f_{2i}(\Delta p_{2i}) = 0 \text{ для } 2\text{-го узла,} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{n_m} f_{mi}(\Delta p_{mi}) = 0 \text{ для } m\text{-го узла.} \end{cases} \quad (5)$$

В каждом из уравнений системы (5) фигурирует величина  $\Delta P_{jv}$  характеризующая перепад давления на концах  $i$ -того водовода связанного с  $j$ -тым узлом ( $j=1 \dots m$ ). Приводим все уравнения системы к виду:

$$P_m = f(P_m) \quad (6)$$

И решаем их, подставляя в правую часть уравнений начальные приближения вектора давлений  $P^{(0)} = (P_1^{(0)} \dots P_m^{(0)})$  по узлам сети, нахождение начальных приближений является отдельной задачей.

$$P_m^1 = f(P_m^0) \quad (7)$$

Получаем уточненное значение вектора давлений по узлам сети и далее используем их как начальное на следующем шаге (итерации). Итерационный процесс повторяется  $n$ -тое число раз,  $P_m^n = f(P_m^{n-1})$  до тех пор, пока не будет выполняться конечное условие. Конечным условием для прекращения итерационного является также обеспечение заданной точности расчета.

Таким образом, в результате вычислений получаем значения вектора давлений  $P$  в исследуемой сети водоводов высокого давления. Далее, используя конечные зависимости, определяем значения вектора расходов  $Q$  по системе, соответствующие вычисленному вектору давлений  $P$ .

Вид «узловых» уравнений системы (1) определяется в зависимости от того, какие элементы сети примыкают к данному узлу. Уравнение материального баланса по каждому узлу включает сумму конечных зависимостей взаимосвязи  $P$  и  $Q$ , описывающих работу элементов непосредственно связанных с узлом (нагнетательная скважина, водоводы, кустовая насосная станция).

Водоводы высокого давления. В качестве функции связи между расходами и давлениями на участках сети ВВД принята формула Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P_{ji} = k \frac{L_{ji} \cdot \lambda_{ji} \cdot \rho \cdot Q_{ji}^2}{d_{ji}^5}, \quad (8)$$

где  $\Delta P_{ji}$  - перепад давления между  $j$ -м и соседним  $i$ -м узлами (МПа),  $Q_{ji}$  - расход жидкости ( $м^3/сут$ ),  $L_{ji}$  - длина (м),  $d_{ji}$  - диаметр (мм),  $\lambda_{ji}$  - коэффициент гидравлического сопротивления участка водовода между  $j$ -м и  $i$ -м узлами;  $\rho$  - плотность жидкости ( $кг/м^3$ ),  $k$  - эмпирический коэффициент пропорциональности.

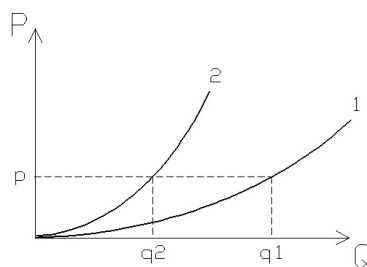
Коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  в зависимости от установившегося режима течения жидкости в водоводе вычисляется по следующим формулам:

- При ламинарном течении -  $\lambda = \frac{64}{Re}$  (формула Стокса); (9)

- При турбулентном течении использована упрощенная универсальная формула для условий наиболее вероятных в практике расчета трубопроводов:  $\lambda_i = 0.11 \cdot \left( \frac{K\epsilon_i}{d_i} + \frac{68}{Re_i} \right)^{0.25}$  (формула Альтшуля), (10)

где  $K\epsilon$  – коэффициент эквивалентной шероховатости (мм),  $d$  – внутренний диаметр водовода (мм). На пределах формула Альтшуля переходит в известные и хорошо отвечающие опытам зависимости для коэффициента гидравлического сопротивления.

В координатах  $P, Q$  характеристика водоводов сети имеет вид (рис. 2), где кривые 1,2 характеризуют падение давления от расхода жидкости для водоводов одного диаметра и прочих равных условий, но разной длины.



**Рис.2.**  $P(Q)$  характеристика водовода

Нагнетательные скважины. Характеристика работы нагнетательных скважин принята линейной, но возможно использование и нелинейной зависимости. При моделировании работы нагнетательной скважины и ее характеристики в координатах  $P, Q$ , имеющей линейный вид, следует, что в пласте установилась фильтрация воды по линейному закону Дарси и работа нагнетательных скважин (т.е. определение количества жидкости поступающей к забою скважины и закачиваемое в пласт) описывается по уравнению Дюпюи (уравнение установившейся приемистости нагнетательной скважины при закачке воды в пласт):

$$Q = \frac{2\pi kh(P_{заб} - P_{пл})}{\mu \cdot Ln\left(\frac{R_k}{R_0}\right)} \quad (11)$$

где  $Q$  - приемистость скважины ( $m^3/сек$ );  $\mu$  - вязкость жидкости ( $Па \cdot с$ );  $R_k$  - радиус контура питания ( $m$ );  $k$  - коэффициент проницаемости пласта ( $m^2$ );  $h$  - толщина продуктивного пласта ( $m$ );  $R_0$  - радиус скважины ( $m$ ).

При этом если  $K = \frac{2\pi kh}{\mu \cdot Ln\left(\frac{R_k}{R_0}\right)}$  то уравнение Дюпюи примет вид:

$$Q = K(P_{заб} - P_{пл}) = KP. \quad (12)$$

А это есть уравнение индикаторной диаграммы, получаемое в результате исследований скважины. Здесь  $K$  - коэффициент приемистости нагнетательной скважины, его размерность -  $m^3/(сут \cdot МПа)$ . Коэффициент приемистости скважины, прежде всего, определяет поглощающую способность пластов, и определяется как отношение расхода закачиваемой в пласт воды к давлению на забое скважины (разность между пластовым и забойным давлениями).

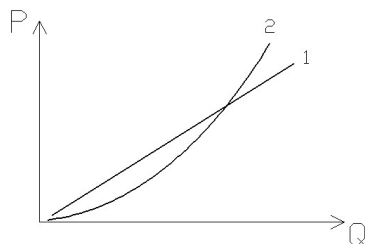
$$K = \frac{Q}{P_{заб} - P_{пл}} = \frac{Q}{P} \quad (13)$$

При соблюдении линейного закона фильтрации жидкости на всех режимах работы скважины коэффициент приемистости - величина постоянная.

При эксплуатации нагнетательных скважин коэффициент приемистости со

временем изменяется, его уменьшение обуславливается множеством факторов.

Характеристика нагнетательной скважины в координатах  $P, Q$  как уже было отмечено, может быть линейной - 1 или нелинейной - 2 (рис. 3).



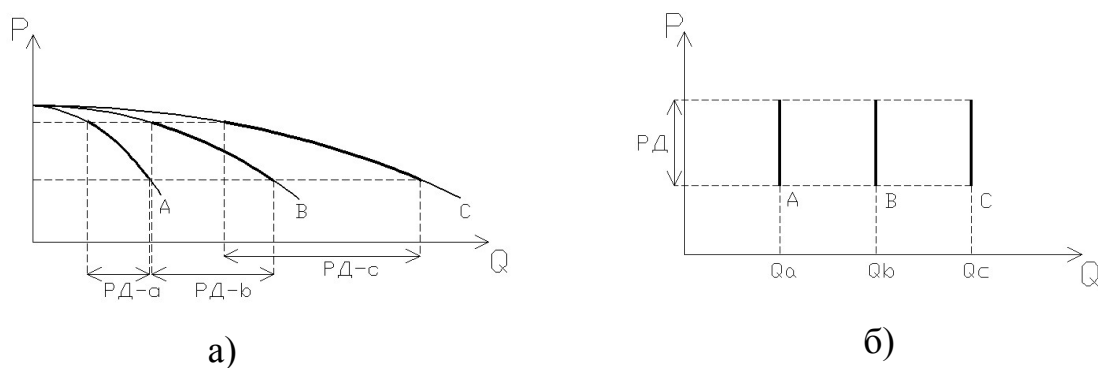
**Рис.3.**  $P(Q)$  характеристики нагнетательной скважины

Кустовые насосные станции. Для характеристики работы насосных агрегатов КНС используется их суммарная напорная характеристика. Напорная характеристика насосного агрегата -  $P(Q)$  зависимость, т.е. соотношение, отображающее как изменяется давление на выходе насоса при изменении расхода среды, транспортируемой насосом.  $P(Q)$  характеристика насосного агрегата получена путем аппроксимации экспериментальных данных. Для центробежных насосов (ЦН) напорная характеристика хорошо аппроксимируется полиномиальным уравнением второй степени:

$$P(Q) = aQ^2 + bQ + c \quad (14)$$

где  $a, b, c$  - рассчитываемые коэффициенты полинома.

Суммарная напорная характеристика КНС в случае оснащения центробежными насосами и при различном их числе приведена на (рис. 4а), плунжерными насосами (ПН) – на (рис. 4б).



**Рис.4.**  $P(Q)$  характеристика КНС при различном оснащении и числе рабочих насосов: а) КНС оснащена ЦН, б) КНС оснащена ПН

При этом на  $P(Q)$  характеристике есть область, соответствующая максимальному К.П.Д. насоса, в которой обеспечивается нормальная эксплуатация насоса – рабочий диапазон (РД).

По мере увеличения срока службы насоса происходит изменение напорной характеристики  $P(Q)$  в сторону уменьшения параметров (давление на выходе насоса, К.П.Д.). Для учета этого фактора в имитационной модели были использованы данные технических паспортов представленных заводами изготовителями насосных агрегатов. Поправка  $P(Q)$  характеристики осуществляется с учетом срока эксплуатации насосов и средней величины снижения напора.

При проведении расчётов исходными данными являются следующие характеристики системы:

- *трубопроводы*: длина, внешний диаметр, толщина стенки, год введения в эксплуатацию;
- *КНС*: число насосов, их тип и  $P(Q)$  характеристика, срок эксплуатации;
- *нагнетательные скважины*: внутренний диаметр и длина колонны насосно-компрессорных труб (НКТ), коэффициент приемистости, диаметр штуцера (если есть), задание по объему закачки.

Также, в этой главе представлены результаты тестирования имитационной модели. Тестирование осуществлялось путем расчета систем ППД реальных месторождений. Для тестирования использовались данные по системам ППД различной структуры, масштаба. Результаты тестирования хорошо согласуются с фактическими данными, в пределах достоверности последних.

**В третьей главе** освещаются основные алгоритмы и методики для решения задач, поставленных перед имитационной моделью.

Настройка модели на реальную систему. В большинстве случаев при расчете реальных систем ППД будет иметь место ситуация, когда расчетные значения имитационной модели расходятся с фактическими данными, в этом случае необходима настройка модели на конкретную систему. Настройка подразумевает максимальное приближение значения коэффициента гидравлического сопротивления через поправки коэффициента эквивалентной

шероховатости  $Kэ$  по участкам сети высоконапорных водоводов к реальному для того, чтобы обеспечить заданную точность, соблюдение которой необходимо при решении поставленных перед имитационной моделью задач, в первую очередь для решения задачи контроля исправности сети высоконапорных водоводов.

Для настройки модели необходимо и достаточно знать: давления во всех узлах сети, расходы в начальных и конечных точках системы, что предусмотрено схемами контроля и управления системами ППД.

Как правило, в водоводах систем ППД имеет место турбулентный режим течения жидкости в трубе. В этом случае коэффициент гидравлического сопротивления зависит от числа Рейнольдса и коэффициента эквивалентной шероховатости -  $\lambda \approx f(Re, Kэ)$  (по мере увеличения числа  $Re$ , на величину  $\lambda$  преобладающее значение начинает оказывать  $Kэ$  при этом зависимость от  $Re$  уменьшается). Тогда алгоритм настройки сводится лишь к определению расходов на неизвестных участках и определению фактического коэффициента эквивалентной шероховатости по каждому водоводу системы воспользовавшись формулами Дарси-Вейсбаха (8) и Альтшуля (10).

Контроль исправности сети ВВД. Задача контроля исправности сети высоконапорных водоводов является достаточно актуальной и ее решение имеет большое технико-экономическое и практическое значение для своевременного оперативного определения мест аварийных повреждений (порывов) и утечек в сети водоводов, так как эти повреждения влекут за собой в первую очередь крупный экологический ущерб, так как в качестве рабочего агента для закачки в пласт используют пластовую воду, являющуюся высоко агрессивной средой.

При нарушении целостности водовода сети и как следствие – появлении утечки, происходит изменение режима течения транспортируемой среды. До аварии в сети был установившийся стационарный режим течения. Новый же установившийся режим с дополнительным расходом на утечку отличается от режима до появления утечки. Сравнение установившегося режима течения жидкости в водоводе сети после его повреждения с нормальным режимом (до

появления порыва), а также переходные процессы, проявившиеся вследствие аварии, позволяют судить о появлении утечки, о ее величине и месте нахождения.

Кроме того, при функционировании системы ППД возможен еще один вид нарушений нормальных режимов, связанный с работой нагнетательных скважин - это либо прорыв потока воды внутри пласта по направлению к добывающей скважине, сопровождающийся резким увеличением приемистости скважины, либо закупоривание поровых каналов призабойной зоны скважины, сопровождающееся - снижением приемистости скважины.

При появлении утечки в результате порыва водовода характерно значительное уменьшение коэффициента гидравлического сопротивления по данному участку (т.е.  $\lambda \rightarrow 0$ ), а появление утечки в скважине характеризуется резким и значительным увеличением ее коэффициента приемистости (т.е.  $K \rightarrow \infty$ ). Поэтому методика определения местоположения порывов и утечек в сети высоконапорных водоводов основана на сопоставлении фактического и расчетного значений коэффициента гидравлического сопротивления по всем водоводам сети. А определение факта нарушения режима работы скважины (появление утечки в скважине, либо снижение приемистости скважины) определяется путем отслеживания изменений коэффициента приемистости.

Для решения данной задачи необходимо оснащение трубопроводов сети высоконапорных водоводов соответствующими средствами контроля. Их количество и местоположение должно обеспечивать получение максимума информации о сети: каждый водовод должен быть оборудован одним датчиком расхода жидкости, каждый узел сети – датчиком давления.

На имитационной модели производилось моделирование систем ППД при наличии утечек, как в результате порыва водоводов, так и в результате прорыва потока жидкости в пласте, имитационная модель имеет хорошую чувствительность к изменению соответствующих параметров систем ППД и адекватно реагирует на достаточно малые изменения характеристик элементов ( $K, \lambda$ ).



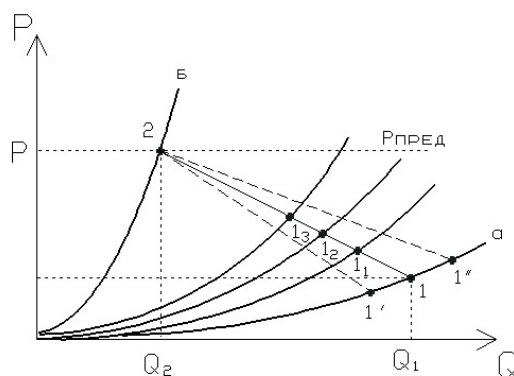
Расчет оптимального графика закачек. Технология дискретных закачек обеспечивает поквaziнное управление закачками с возможностью установить и реализовать для каждой скважины индивидуальное суточное задание по объему закачки и всем ее параметрам: расход  $q_i$  и давление  $p_i$  во всем диапазоне технических возможностей системы, продолжительность закачки и ее место в пределах суточного графика, режим закачки – непрерывный, прерывистый, периодический. Если задание не выходит за пределы технических возможностей системы ППД, то оно может быть выполнено практически неограниченным числом вариантов – соответственно будет изменяться и суточный график закачки и затраты энергии на него. Причем различия в затратах энергии могут быть весьма значительными.

Очевидно, что минимум затрат энергии на выполнение задания  $W = \sum_{i=1}^n w_{зад.i}$  будет в том случае, когда каждой скважине в пределах графика будет предоставлено максимально возможное время работы при минимально возможном для закачки давлении.

Поскольку системы ППД месторождений региона являются наиболее крупными потребителями электроэнергии (не менее 30% от общего электропотребления нефтедобычи), то в задачу управления системой при технологии дискретных закачек входит не только выполнение задания по закачке, но и обеспечение при этом наименьших затрат энергии – энергосбережение. Т.е. ставится задача выбрать из множества возможных вариантов графиков закачки оптимальный по критерию  $\mathcal{E}_{min}$ .

На основе имитационной модели системы ППД разработана методика расчета оптимального графика закачки при ТДЗ, последовательность операций которой приведена на (рис. 5).

Физическая суть оптимального графика закачки заключается в том, чтобы выбрать такое начальное значение расхода  $Q_1$ , когда все скважины открыты, которое без каких-либо управляющих воздействий обеспечило бы к концу цикла (суток) выполнение заданий  $w_{зад.i}$  по всем скважинам с полным использованием времени цикла (суток).



**Рис.5.** Оптимальный график закачки в координатах  $P, Q$

Для определения оптимального графика закачек в координатах  $P, Q$  с помощью имитационной модели построим характеристику сети при полностью открытых скважинах - характеристика  $a$  (рис. 5) и характеристику сети при работе неотключаемых малоприемистых скважинах – характеристика  $b$  (рис. 5).

Первая рабочая точка системы с расходом  $Q_1$  - точка  $1$  располагается на характеристике  $a$ , определение ее местоположения с учетом указанных выше условий и является целью расчета. Вторая рабочая точка – точка  $2$  лежит на пересечении характеристики сети при работе неотключаемых скважин с линией предельного давления  $P_{пред}$ . В качестве оптимальной траектории рабочей точки (ТРТ) системы принимается прямая  $1-2$  (оптимальность линейной траектории может быть проверена последующими расчетами). Положение точки  $1$ , соответствующее оптимальному режиму, находится методом последовательных приближений.

Экономия энергии при оптимизации графика оценивается в 5-7%.

Формирование БД по элементам систем ППД. В процессе эксплуатации систем ППД происходит изменение основных параметров работы составляющих ее элементов (нагнетательные скважины, водоводы сети, насосные агрегаты). При функционировании нагнетательных скважин системы

ППД, основной параметр, характеризующий их работу - коэффициент приемистости скважины. На практике коэффициент приемистости, как правило, величина не постоянная и может изменяться.

В процессе эксплуатации водоводов сети вследствие различных факторов происходит изменение: шероховатости внутренней поверхности водовода, его внутреннего диаметра - в результате коррозии и появлению солевых отложений, следовательно, будет изменяться значение коэффициента гидравлического сопротивления.

С течением времени по мере выработки основных узлов происходит изменение эксплуатационных характеристик насосных агрегатов КНС: подачи  $Q$  и развиваемого давления  $P$  (или напора  $H$ ) и др.

Учитывая все вышесказанное можно сказать, что в процессе работы систем ППД, вследствие динамического изменения основных эксплуатационных параметров ее составляющих элементов с течением времени, возникает необходимость фиксирования и сохранения этих параметров как для нужд эксплуатации самих систем ППД (контроля фактического состояния и нарушения в работе насосных агрегатов КНС и нагнетательных скважин и т.п.), так и для установления взаимосвязей между добывающими и нагнетательными скважинами, что позволит получать информацию о состоянии пласта (формирование постоянно действующей геолого-технологической модели пласта).

Формирование баз данных (БД) осуществляется по нагнетательным скважинам, водоводам сети, насосным агрегатам кустовой насосной станции.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Разработана имитационная модель для систем ППД, основанная на решении системы уравнений материального баланса по узлам сети с использованием функций связей между  $P$  и  $Q$  для элементов системы (водоводы, нагнетательные скважины, кустовые насосные станции). Модель реализована в виде пакета программ с соответствующим внешним интерфейсом, которые позволяют выполнять расчет гидравлических параметров систем ППД и моделирование режимов их функционирования.

2. Имитационная модель позволяет:
  - производить оценки суточного задания по закачкам  $W_{зад} = \sum w_{зад i}$  на возможность его выполнения системой ППД и на величину затрат энергии;
  - производить расчет оптимального графика закачек на цикл по критерию  $\mathcal{E}_{min}$  с учетом выполнения условий:  $W_{зад} = \sum w_{зад i}, t_{раб} = T_u$ ;
  - осуществлять оперативный контроль состояния элементов систем ППД (скважины, водоводы, КНС) с обнаружением и локализацией их неисправностей (утечки и порыва водоводов и нарушения в работе нагнетательных скважин);
  - формировать и вести базы данных по характеристикам элементов систем ППД.
3. Имитационная модель протестирована путем гидравлического расчета систем ППД реальных месторождений и получено хорошее совпадение расчетных данных с практическими значениями.
4. Смоделирован ряд аварийных ситуаций (порывы водоводов, нарушения в работе скважин) и показано, что с помощью имитационной модели можно оперативно и с хорошей точностью обнаруживать и локализовать места аварий.
5. Имитационная модель при некоторой доработке может быть использована в практике проектирования систем ППД как для вновь обустраиваемых месторождений, так и для реконструируемых (анализ сетей, определение узких мест, устранение этих мест путем введения колец и лупингов).

#### **ПУБЛИКАЦИИ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Создание системы управления гидродинамическими и теплофизическими процессами при движении многофазных сред в системах трубопроводного транспорта: Отчет по НИР (заключ.) / ТюмГУ; рук. А.А. Кислицын. – № 3 3016. – Тюмень. 2003. – 19 с.
2. Зубов М.В. Моделирование гидродинамических процессов в системах трубопроводного транспорта // Материалы VI Всероссийского семинара

- «Моделирование неравновесных систем» (Красноярск, 24-26 окт. 2003 г.). – Красноярск: ИВМ СО РАН, 2003. – С. 79.
3. Зубов М.В. Разработка имитационной модели для систем ППД // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 40-летию ТюмГНГУ «Нефть и газ Западной Сибири» (Тюмень, 12-13 нояб. 2003 г.). – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – Т.2. – С. 86-88.
  4. Разработка алгоритма опытного образца технического комплекса интеллектуальной системы поддержания пластового давления, разработка технологического процесса на основе технологии дискретных закачек, проведение испытаний и опытной эксплуатации опытного образца на Лонтынь-Яхском нефтяном месторождении: Отчет по НИР (1 этап) / ОАО «Гипротюменнефтегаз»; рук. В.А. Горбатиков. - №7186. – Тюмень. 2003. – 11 с.
  5. Горбатиков В.А., Зубов М.В., Кислицын А.А. Имитационная модель системы поддержания пластового давления // Теплофизика, гидродинамика, теплотехника: Сборник статей. – Тюмень: ТюмГУ, 2004. – Вып. 2. – С. 68-76.
  6. Зубов М.В. Моделирование систем ППД и реализация технологии дискретных закачек // Сб. тез. докл. V конференции молодых специалистов организаций осуществляющих виды деятельности связанной с пользованием участками недр на территории ХМАО – Югры (Ханты-Мансийск, 16-18 фев. 2005 г.). – Уфа: Изд-во “Монография”, 2005. – С. 237.
  7. Кислицын А.А., Зубов М.В., Горбатиков В.А. Математическая модель технологии дискретных закачек в системах поддержания пластового давления // Вестник ТюмГУ. – Тюмень: ТюмГУ, 2005. – №4. – С. 76-81.
  8. Горбатиков В.А., Зубов М.В., Кислицын А.А. Системы ППД в новых условиях, новые требования и пути их реализации // Нефтяное хозяйство. – 2006. - №1. – С. 73-75.