

ФИЗИКА

*Анатолий Александрович КИСЛИЦЫН —
профессор кафедры механики
многофазных систем,
д. физ.-мат. н.*

*Максим Владиславович ЗУБОВ —
аспирант кафедры механики
многофазных систем*

*Виктор Андреевич ГОРБАТИКОВ —
ведущий научный сотрудник,
референт ОАО «Гипротюменнефтегаз»,
к. тех. н.*

УДК 519. 683

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ ДИСКРЕТНЫХ ЗАКАЧЕК В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

АННОТАЦИЯ. Разработана математическая модель и создан пакет программ для контроля и управления процессами дискретных закачек в системах поддержания пластового давления (ППД), позволяющий исследовать возможности реальной системы гидравлических цепей сложной структуры по выполнению заданий закачки воды в пласт.

The mathematical model of the discrete pump technology in reservoir support pressure systems is worked out and the code for numerical simulation of those is designed. This code enables to investigate the resources of a real hydraulic chain with complicated structure to fulfil a plan of water pumping in reservoir.

Введение.

В настоящее время закачка воды в пласт является основным способом поддержания пластового давления при разработке нефтяных месторождений, а системы поддержания пластового давления (ППД) — наиболее крупными потребителями электроэнергии в нефтедобыче. Система ППД состоит из нагнетательных скважин, кустовых насосных станций (КНС) и сети водоводов (труб) высокого давления (сеть ВД). Упрощенная древовидная схема такой системы изображена на рис. 1.

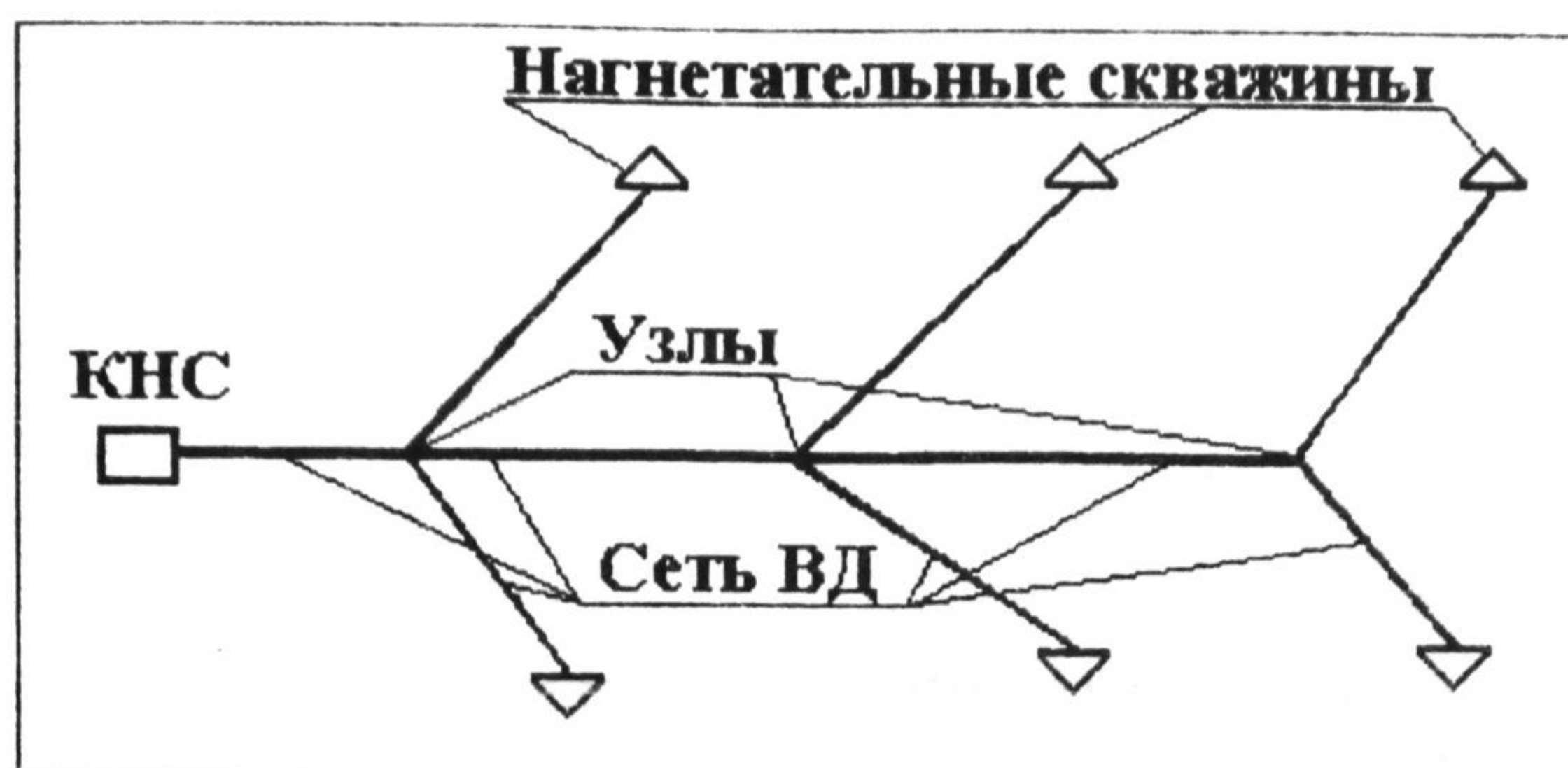


Рис. 1.

В реальной системе ППД количество нагнетательных скважин может достигать нескольких десятков и даже сотен, а сеть ВД может содержать внутренние кольца и внешние переемы с другими системами ППД. Рациональное расходование энергии в системах ППД и повышение эффективности этих систем относятся к наиболее актуальным проблемам нефтедобычи. В новых условиях (к ним относятся снижение качества запасов по вновь вводимым месторождениям, поздние стадии разработки и осложненные условия добычи по основным действующим месторождениям) закачка воды в пласт, как основное средство воздействия на эксплуатационный объект, должно стать максимально управляемым и эффективным.

Новым условиям разработки и требованиям энергосбережения в наибольшей мере отвечает технология дискретных закачек (ТДЗ), разработанная в ОАО «Гипротюменнефтегаз» [1]. Эта технология содержит следующие основные элементы:

1. Устанавливается продолжительность цикла (например, сутки) и поскважинные задания по объемам закачки (эти данные формируются службой разработки).

2. В начале цикла все скважины открываются, расход воды в системе устанавливается на максимальном уровне, при этом основная масса закачиваемой воды поступает в высокоприемистые скважины.

3. По мере выполнения заданий по объемам закачки скважины закрываются, расход уменьшается, и в конечной части цикла в работе остаются наименее приемистые скважины, а также скважины, работающие постоянно. К концу цикла все задания по объемам закачки в каждую скважину должны быть выполнены, и система переходит к новому циклу.

ТДЗ в наибольшей степени отвечает новым условиям и требованиям к системам ППД как в области разработки, так и в области эксплуатации самих систем. В области разработки — это расширение диапазона воздействий на пласт, оперативное поскважинное управление процессом закачки, изменение давлений во всем диапазоне возможностей системы, организация системных воздействий на пласт с участием всех скважин участка. В области эксплуатации — это экономичность, оптимизация режимов работы по минимуму удельных (на 1 м^3 закачки) энергозатрат [2].

Назначение математической модели системы ППД.

Для реализации возможностей ТДЗ требуется:

- 1) Оснащение нагнетательных скважин техническими средствами контроля и автоматизации (телеуправляемые приводные задвижки, счетчики жидкости, манометры), а также возможность выполнения функций контроля и управления непосредственно из диспетчерского пункта.

- 2) Кустовые насосные станции (КНС) должны обеспечивать требуемый диапазон регулирования производительности, а насосное оборудование на КНС

должно быть приспособлено для работы с сетью водоводов с изменяющимися во времени характеристиками сети.

3) Специализированное программное обеспечение, основой которого является математическая модель системы ППД.

Созданная нами ранее имитационная модель системы ППД описана в [3]. Доработка имитационной модели привела к созданию математической модели технологии дискретных закачек в системе ППД и программного обеспечения, действующего на основе этой модели. Созданный нами пакет программ предназначен для:

- выполнения функций оперативного контроля и управления процессом закачки в течение цикла как в автоматическом, так и в диспетчерском (ручном) режимах;
- расчета оптимального графика нагрузки на предстоящий цикл из условий выполнения поскважинных заданий по закачкам, обеспечения непрерывности процесса при переходе от цикла к циклу и минимума удельных (на 1 м^3) энергозатрат на закачку;
- сбора и обработки информации, ведения баз данных (основные характеристики и динамика их изменений) по нагнетательным скважинам, по насосному оборудованию, по состоянию и гидравлическим характеристикам систем водоводов;
- выявления и локализации утечек и порывов в сети водоводов путем сопоставления данных гидравлического расчета сети и данных по показаниям телеметрического оборудования (счетчики жидкости и манометры);
- обнаружения отклонений в работе насосного оборудования, нагнетательных скважин, систем водоводов в результате сопоставления данных гидравлического расчета сети с данными за предыдущие циклы для последующего анализа.

Описание математической модели системы ППД.

Разработанный нами пакет программ для моделирования системы ППД содержит: блок построения схемы гидравлической системы ППД, блок ввода параметров этой системы и задания исходных данных, блок гидравлических расчетов (БГР), блок графического и табличного отображения состава и состояния системы, а также внешний интерфейс для просмотра результатов расчетов как в табличной, так и в графической форме.

Математическая модель системы ППД состоит из уравнений баланса потоков и уравнений, описывающих гидравлический режим участков сети ВД, а также формул для приемистости скважин, эмпирических формул для коэффициентов гидравлического сопротивления водоводов и характеристик насосных агрегатов.

Пусть система ППД содержит m узлов. Тогда уравнения баланса потоков дадут систему из m алгебраических уравнений:

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

где n_1, n_2, \dots, n_m — количество труб ВД, пересекающихся в j -м (1-м, 2-м, ..., m -м) узле, Q_{ji} — расход жидкости по этим трубам (входящий поток считается положительным, выходящий — отрицательным). В свою очередь расход жидкости по каждой трубе является функцией (вообще говоря, нелинейной) от перепада давлений в данном узле и в соседних узлах сети ВД, поэтому система уравнений (1) может быть записана в виде:

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

В качестве функции связи между расходами и давлениями на участках сети ВД принята формула Дарси-Вейсбаха [4]:

$$\Delta P_{ji} = k \frac{L_{ji} \cdot \lambda_{ji} \cdot \rho \cdot Q_{ji}^2}{d_{ji}^5}, \quad (3)$$

где ΔP_{ji} — перепад давления между j -м и соседним i -м узлами, L_{ji} — длина, d_{ji} — диаметр, λ_{ji} — коэффициент гидравлического сопротивления участка водовода между j -м и i -м узлами; ρ — плотность жидкости, k — эмпирический коэффициент пропорциональности. Коэффициент гидравлического сопротивления для каждого участка трубопровода определяется по эмпирическим формулам, в которых учитываются: режим течения (турбулентный или ламинарный), потери давления на местные сопротивления, зависящие от конструктивных особенностей труб, состояние поверхности (коэффициенты эквивалентной шероховатости, коррозии и солеотложений в трубопроводах); кроме этого, в математической модели заложена возможность учета промерзания трубопроводов.

Работа нагнетательных скважин описывается на основе формулы Дюпюи с учетом ее конструкции и с учетом параметров нефтесодержащего пласта по данным схемы разработки или промысловых испытаний:

$$Q = 2 \pi 10^3 E \{P_3 - P_{\Pi}\} / \ln(R_k / R_0), \quad (4)$$

где Q — приемистость нагнетательной скважины ($\text{м}^3/\text{сут}$), P_3, P_{Π} — давление на забое скважины и пластовое давление (МПа), E — коэффициент гидропроводности, R_k и R_0 — среднее расстояние между скважинами и приведенный радиус скважины (м).

Работа КНС описывается при помощи аппроксимации экспериментальных данных зависимостью следующего вида:

$$P = aQ + bQ^2, \quad (5)$$

где a и b — эмпирические константы.

Таким образом, для определения полной картины распределения расходов и давлений по скважинам и участкам сети ВД получена замкнутая система нелинейных алгебраических уравнений, решение которой принципиальных трудностей не представляет. Для ее решения нами был использован метод итераций, так как данный метод хотя и имеет медленную сходимость, но не требует вычисления производных, а также позволяет получить достаточно высокую точ-

ность, так как не накапливается ошибка округления. Обоснование выбора метода и его описание приведены в статье [3].

Исходные данные и результаты моделирования.

При проведении расчетов исходными данными являются технические характеристики системы:

— по трубопроводам — их длины, диаметры и конструктивные особенности (повороты и сужения, наличие запорной арматуры, счетчиков жидкости);

— по скважинам — глубины, диаметры насосно-компрессорных труб, наличие штуцеров для регулирования давления;

— по КНС — число насосных агрегатов и их тип (марка);

а также гидравлические параметры системы: давление на входе в сеть, пластическое давление, плотность закачиваемого агента, коэффициенты приемистости скважин. Для учета темпов коррозии используются данные о сроках введения системы в эксплуатацию.

Результатами расчета являются:

— полная гидравлическая картина системы ППД: распределение давлений в узлах сети; расходы и скорость потока по всем участкам сети; расчетная приемистость нагнетательных скважин;

— нахождение рабочей точки системы, лежащей на пересечении графиков $P(Q)$ характеристик сети водоводов и КНС, то есть режима работы системы ППД в целом.

Апробация модели проводилась путем расчета участков систем ППД реальных месторождений. Полученные расчетные значения сопоставлялись с промысловыми данными по участкам сетей ППД трех месторождений различной структуры, масштаба, срока эксплуатации:

— Система ППД Северо-Варьеганского месторождения. Это крупное месторождение, срок эксплуатации около 10 лет, структура сети сложная, причем до кустов нагнетательных скважин превалируют достаточно длинные расстояния (до 10 км).

— Система ППД Кочевского месторождения — мелкое месторождение, срок эксплуатации 1-2 года, структура простая древовидная, линейная.

— Участок системы ППД Северо-Покурского месторождения. Рассматриваемый участок системы ППД характеризуется достаточно разветвленной сетью водоводов и наличием участков высоконапорных водоводов протяженностью более 10 км. Фонд нагнетательных скважин приблизительно 80 единиц. На рассматриваемом участке в системе ППД действуют две КНС, к каждой из них подключено 6 направлений трубопроводов, на одно направление приходится по 6-10 скважин. Срок эксплуатации системы высоконапорных трубопроводов в среднем около 10 лет. Присутствуют кольцевые участки между направлениями.

Для сопоставления различных вариантов расчета моделирование осуществлялось как для всей системы целиком (одновременно по всем направлениям), так и отдельно по направлениям работы КНС. В результате расчета расхождение полученных данных (давление в узлах и расход по участкам системы, приемистость нагнетательных скважин) с фактическими составило для системы ППД Кочевского месторождения 1,7%, для Северо-Варьеганского месторождения — около 10%, для Северо-Покурского месторождения в сред-

нем по рассматриваемому участку системы ППД — 3%. Высокая точность результатов моделирования системы ППД Кочевского месторождения объясняется простотой этой системы, а также малым сроком ее эксплуатации. Наименьшая точность получена для Северо-Варьеганского месторождения. Объясняется это длительным сроком эксплуатации данного месторождения, недостаточным количеством телеметрических датчиков расхода и давления и вследствие этого — низкой точностью промысловых данных.

Выводы.

Разработана математическая модель и создан пакет программ для моделирования систем ППД сложной древовидной структуры, позволяющий определять полную картину распределения давлений и расходов в сети при подаче на вход сети заданного давления, а также рассчитать рабочую точку системы, лежащую на пересечении графиков $P(Q)$ характеристик сети водоводов и КНС. Разработан внешний интерфейс с возможностью построения схемы системы ППД, задания исходных данных, а также просмотра результатов, как в табличной, так и в графической форме.

Модель позволяет исследовать возможности системы по выполнению заданий по закачке с учетом характеристик нагнетательных скважин и таких параметров, как давление водяного столба в стволе скважины, пластовое давление, потери давления на трение в стволе скважины, падение давления на штуцере нагнетательной скважины. Кроме этого, учитываются темпы коррозии и солеотложения в высоконапорных водоводах.

Апробация блока гидравлических расчетов проводилась путем моделирования участков систем ППД реальных месторождений различной структуры, размеров, сроков эксплуатации. При наличии промысловых данных по участкам сетей ППД осуществлялось их сопоставление с полученными расчетными значениями. Среднее расхождение расчетных данных с промысловыми составило 5%, а максимальное не превысило 10%, что является приемлемым для использования в практических целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбатиков В. А., Пальянов А. П. Контроль и управление закачками воды в нагнетательные скважины системы ППД // В кн. «Обустройство нефтяных месторождений Западной Сибири». Тр. ин-та Гипротюменнефтегаз. Вып. 3. Тюмень, 1995. С. 211-215.
2. Горбатиков В. А., Пальянов А. П. Технология дискретных закачек в системах ППД, контроль и управление системой // Изв. вузов. Нефть и газ. 2001. № 1. С. 33-40.
3. Зубов М. В., Кислицын А. А., Горбатиков В. А. Имитационная модель системы поддержания пластового давления // В кн. «Теплофизика, гидродинамика, теплотехника»: Сб. ст. Вып. 2. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2004. С. 68-76.
4. Меренков А. П., Хасилев В. Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985.
5. Методика расчета гидравлических сопротивлений в стволах и ВВД нагнетательных скважин / Под рук. Р. И. Медведского. Тюмень: СибНИИНП, 1975.