

КОНТРОЛЬ, РЕГУЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРОСИСТЕМ ЗАВОДНЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ

Стрекалов А.В., Королев М.С., Фоминых О.В.

Тюменский государственный нефтегазовый университет

email: fov@tsoгу.ru

Системы поддержания пластового давления (ППД), используемые в качестве гидросистем обеспечивающих технологию заводнения, имеют ряд особенностей в эксплуатации и управлении. Эти особенности, прежде всего, обусловлены гидравлической взаимосвязью наземной трубопроводной сети с гидросистемой продуктивных пластов. В данной статье рассматриваются методы использования модели гидросистем с учетом отраслевых аспектов для поиска оптимального состояния систем ППД.

Ключевые слова: *система ППД, оптимизация, заводнение*

Задаче оптимизации технических систем посвящено множество работ, направленных на решение подобных задач, связанных с поиском оптимального состояния сложных систем в различных отраслях энергетики [1, 2, 3, 4]. Системы поддержания пластового давления (ППД), используемые в качестве гидросистем обеспечивающих технологию заводнения, имеют ряд особенностей в эксплуатации и управлении. Эти особенности, прежде всего, обусловлены гидравлической взаимосвязью наземной трубопроводной сети с гидросистемой продуктивных пластов. В данной статье рассматриваются методы использования модели гидросистем [5] с учетом отраслевых аспектов для поиска оптимального состояния систем ППД.

Основным способом изменения состояния технической гидросистемы (ТГС) является изменение технических показателей (далее – тех-показатели) ее элементов, которые можно подобрать некоторым образом так, что работа системы: распределение гидравлических параметров (далее – гидропараметры) в ее элементах будет соответствовать определенным условиям.

Ранее в работе [6] предлагалось находить комплексный оптимум посредством решения задачи поиска экстремума функции – к.п.д. системы от тех-показателей для насосных агрегатов – kQ_i , $k dP_i$ (коэффициенты масштабирования гидравлической характеристики для насоса – звена i по оси расходов и давлений со-

ответственно) кустовых насосных станций (КНС) и d_i (диаметры) штуцеров на блоках гребенок (БГ).

Как показал опыт, предложенное ранее решение является неэффективным с точки зрения скорости и надежности расчета, так как задача поиска минимума осложняется тем, что функция к.п.д. системы

$$\psi_{\eta_{\Phi}}(d_{S_0}, \dots, d_{S_k}, \dots, d_{S_{N-1}}, kQ_{P_0}, \dots, kQ_{P_j}, \dots, kQ_{P_{M-1}}, kdP_{P_0}, \dots, kdP_{P_j}, \dots, kdP_{P_{M-1}}), \quad (1)$$

где $P_0, P_1, \dots, P_j, \dots, P_{M-1}$ – множества с номерами звеньев–насосных агрегатов, а $S_0, S_1, \dots, S_j, \dots, S_{M-1}$ – множества с номерами звеньев–штуцеров, имеет область определения, ограниченную зависимостями приемистостей скважин (n -мерными поверхностями):

$$\psi_{q_{S_i}}(d_{S_0}, \dots, d_{S_k}, \dots, d_{S_{N-1}}, kQ_{P_0}, \dots, kQ_{P_j}, \dots, kQ_{P_{M-1}}, kdP_{P_0}, \dots, kdP_{P_j}, \dots, kdP_{P_{M-1}}). \quad (2)$$

Здесь предлагается более четкая математическая формализация задачи и более эффективный метод ее решения: технико-технологической оптимизации, посредством нахождения максимума функции коэффициента эффективности – $K_{\text{эфф}}$ от тех-показателей, выбранных в качестве способа оптимизации.

Коэффициент эффективности $K_{\text{эфф}}$ может быть рассчитан как отношение совокупного к.п.д. системы к суммарному среднему отклонению текущих режимов нагнетательных скважин от номинальных значений.

В качестве регулирующих тех-показателей будем полагать диаметры штуцеров и коэффициенты коррекции гидравлических характеристик kQ_i, kdP_i для КНС и/или конкретных насосов.

Таким образом, задача технико-технологической оптимизации сводится к поиску максимума $(N+2M)$ -мерной функции

$$\psi_{K_{\text{эфф}}}(d_{S_0}, \dots, d_{S_k}, \dots, d_{S_{N-1}}, kQ_{P_0}, \dots, kQ_{P_j}, \dots, kQ_{P_{M-1}}, kdP_{P_0}, \dots, kdP_{P_j}, \dots, kdP_{P_{M-1}}), \quad (3)$$

где N – количество нагнетательных скважин и соответствующих им штуцеров или дросселирующих арматур;

M – количество кустовых насосных станции или насосов, работающих в единую сеть трубопроводов.

Область определения аргументов ограничена: $d_{S_k} \in [d_{\min}, d_{\max}]$, $kQ_{P_j} \in [kQ_{\min}, kQ_{\max}]$ и $kdP_{P_j} \in [kdP_{\min}, kdP_{\max}]$, где $d_{\min} = 0,001$ м; $d_{\max} = 0,050$ м; $kQ_{\min} = 0,1$; $kQ_{\max} = 20$; $kdP_{\min} = 0,1$; $kdP_{\max} = 20$.

Для формирования более четкого описания аргументы целевой функции необходимо нормировать:

$$\bar{d}_{S_k} = \frac{d_{S_k} - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}}, \quad \bar{kQ}_{P_j} = \frac{kQ_{P_j} - kQ_{\min}}{kQ_{\max} - kQ_{\min}}, \quad \bar{kdP}_{P_j} = \frac{kdP_{P_j} - kdP_{\min}}{kdP_{\max} - kdP_{\min}} \quad (4)$$

Таким образом, искомый оптимум достигается решением

$$\psi_{\bar{K}_{эфф}} \left\{ \begin{array}{l} \bar{d}_{S_0}, \dots, \bar{d}_{S_k}, \dots, \bar{d}_{S_{N-1}}, \\ \bar{kQ}_{P_0}, \dots, \bar{kQ}_{P_j}, \dots, \bar{kQ}_{P_{M-1}}, \\ \bar{kdP}_{P_0}, \dots, \bar{kdP}_{P_j}, \dots, \bar{kdP}_{P_{M-1}} \end{array} \right\} \rightarrow \max. \quad (5)$$

Здесь следует сделать некоторое уточнение: предполагается, что коэффициенты kQ и kdP , корректирующие гидравлическую характеристику насосных агрегатов, изменяют также кривые потребляемой мощности и к.п.д. В частности, кривая зависимости к.п.д. от расхода жидкости изменяется следующим образом

$$\eta'(q) = \eta(q \cdot kQ), \quad (6)$$

где $\eta'(q)$ – модифицированная кривая зависимости измененного к.п.д. насоса;

$\eta(q)$ – известная кривая зависимости к.п.д. насоса (например, с завода-изготовителя).

Кривая потребляемой электрической мощности модифицируется следующим образом

$$N'_s(q) = N_s(q \cdot kQ) \cdot kQ \cdot kdP, \quad (7)$$

где $N'_s(q)$ – модифицированная кривая зависимости потребляемой электрической мощности насоса;

$N_s(q)$ – известная кривая зависимости потребляемой электрической мощности насоса (например, завода-изготовителя).

Иначе модифицированную потребляемую электрическую мощность можно вычислить согласно известным функциям – $\eta'(q)$ и гидравлической характеристики – $f'_{ACГ}(q) = kdP \cdot f_{ACГ}(q \cdot kQ)$:

$$N'_s(q) = \frac{f'_{ACГ}(q) q}{\eta'(q)} = \frac{kdP \cdot f_{ACГ}(q \cdot kQ)}{\eta(q \cdot kQ)}. \quad (8)$$

Также важно отметить допущение, согласно которому предполагается, что к.п.д. насоса не зависит от коэффициента kdP . Это вполне правомерно, так как при последовательной установке центробежных насосов или установке дополни-

тельных секций совместный к.п.д. такой системы слабо меняется при работе на оптимальном режиме. Так как предполагается искать корректирующие коэффициенты исходя из взаимодействия насосов или насосных станций, этот оптимальный режим также будет отыскиваться при решении (5).

Для решения (5) придется постоянно решать задачу потокораспределения или комплексного потокораспределения для поиска значений целевой функции при текущих приближениях аргументов. На средних по расчетной производительности ПК скорость расчета потокораспределения для ТГС с количеством звеньев около 1500 составляет 1,5 с, поэтому поиск минимума или максимума целевой функции составляет порядка 1 - 4 часов, что в принципе, является приемлемым для задач такой сложности.

Методы решения задач (5) относятся к методам нелинейного программирования [7], а наиболее эффективным для описываемой задачи в плане стабильности и скорости решения является метод *L-BFGS*. Большинство методов оптимизации (поиска минимума или максимума целевой функции) основаны на методе Ньютона. Этот классический метод в курсе по методам оптимизации обычно идет первым, и послужил основой для создания целого ряда близких ему по сути методов, представителем которых является и метод *L-BFGS*. Классический метод Ньютона использует Гессиан функции. Шаг метода определяется произведением матрицы, обратной к Гессиану, на градиент функции. Если функция является положительно определенной квадратичной формой, то за один шаг данного метода отыскивается её минимум. В случае неопределенной квадратичной формы, у которой нет минимума, метод сойдется к седловой точке или к максимуму. Т.е. фактически метод ищет стационарную точку квадратичной формы.

Описанная целевая функция не имеет квадратичной формы, но является гладкой в окрестностях минимума и достаточно хорошо описывается квадратичной формой, что достаточно для того, чтобы метод Ньютона (или его вариация) сошелся к минимуму. Однако метод Ньютона с тем же успехом может сойтись к оказавшемуся рядом максимуму, совершив шаг в направлении возрастания функции вместо шага, уменьшающего значение функции. Модификации метода Ньютона решают эту проблему следующим образом: вместо Гессиана используется его положительно определенная аппроксимация. Если Гессиан положительно оп-

ределен, то шаг совершается по методу Ньютона. Если Гессиан не определен, то перед совершением шага по методу Ньютона модифицируется Гессиан так, чтобы он был положительно определен. Суть данного подхода в том, что шаг всегда совершается в направлении убывания функции. В случае, когда Гессиан положительно определен, он используется для построения квадратичной аппроксимации поверхности, что ускоряет сходимость. Если Гессиан не определен, то движение совершается в направлении убывания функции каким-либо другим способом.

Основная идея *L-BFGS* схемы обновления Гессиана состоит в следующем. Гессиан функции доступен не всегда, и гораздо чаще существует возможность вычислить только градиент функции. Поэтому здесь используется следующая схема работы: на основе n последовательных вычислений градиента строится Гессиан функции и совершается «Ньютоновский шаг». В данном методе используется BFGS-схема обновления, названная по первым буквам имен Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno.

Существует специальная формула, позволяющая итеративно получать аппроксимацию Гессиана, причем на каждом шаге аппроксимирующая матрица остается положительно определенной. Таким образом, эта формула строит не сам Гессиан, а обратную к нему матрицу таким образом, чтобы не затрачивать время на ее обращение.

Буква **L** в названии схемы происходит от слов «Limited memory» – ограниченная память. В случае больших размерностей целевой функции: количество штуцеров N плюс количество насосов M умноженное на два $R = N + 2M$, объем памяти порядка R^2 , требуемый для хранения гессиана, оказывается слишком большой вычислительной нагрузкой. Поэтому вместо использования R значений градиента для построения гессиана можно обойтись меньшим числом значений, позволяющим использовать объем памяти порядка $R \times S$. Обычно на практике $S \in [3..10]$, в наиболее сложных случаях можно увеличить эту константу до 25. В результате на каждом шаге n получается не сам Гессиан, а его аппроксимация. Естественно, при этом замедляется процесс сходимости, т.е. растет количество итераций, но скорость в целом работы может увеличиться, за счет сокращения времени работы ЭВМ с памятью и вычислениями. Данный метод разрабатывался специально для поиска минимума целевых функций с очень большим числом аргу-

ментов (сотни и тысячи), так как именно в этом случае увеличение числа итераций из-за пониженной точности аппроксимации Гесса полностью окупается снижением вычислительной нагрузки на его обновление.

Градиент целевой функции (5) может быть вычислен только по разностной схеме, причем для повышения точности можно использовать «четырёхточечную формулу». Если учитывать ограничения области определения аргументов, то можно использовать алгоритм *L-BFGSB*.

Рассмотрим результаты оптимизации согласно решению задачи (5) на примере МТГС, отображенной на рис. 1, комплексные показатели которой до и после оптимизации отражены в табл. 1. Номинальная приемистость скважин задана согласно требуемой по технологии заводнения: средней (по схеме) 1000 м³/сут, верхней 300 м³/сут, и нижней 200 м³/сут.

После оптимизации, т.е. решения задачи (5) имеем уже оптимизированное состояние модели ТГС (см. рис. 2) с искомыми диаметрами штуцеров (сверху вниз по схеме) – $d_1=0,0057$ м, $d_2=0,0111$ м, $d_3=0,0059$ м и корректирующими коэффициентами насосных агрегатов (сверху вниз по схеме) – $kQ_1=0,150$, $kdP_1=0,890$, $kQ_2=0,149$, $kdP_2=0,91$, $kQ_2=0,151$, $kdP_2=0,890$. Комплексные показатели оптимизированной ТГС приведены в табл. 1 (правая колонка).

Как видно из таблицы полный к.п.д. ТГС – η_ϕ существенно вырос: с 21,44 % до 37,57 %, а относительное отклонение S_v упало до пренебрежимо малого числа – 0,08 %. Потребляемая насосами электрическая мощность упала с 2973,26 до 550,68 кВт. Такие хорошие показатели являются руководством к соответствующей замене насосов и штуцеров. Причем гидравлическая характеристика заменяемых насосов должна соответствовать, полученной в результате подбора корректирующих коэффициентов kQ и kdP согласно (6 - 8).

На рис. 3 отражены гидравлические характеристики КНС и одного из насосных агрегатов (среднего) (см. рис. 1).

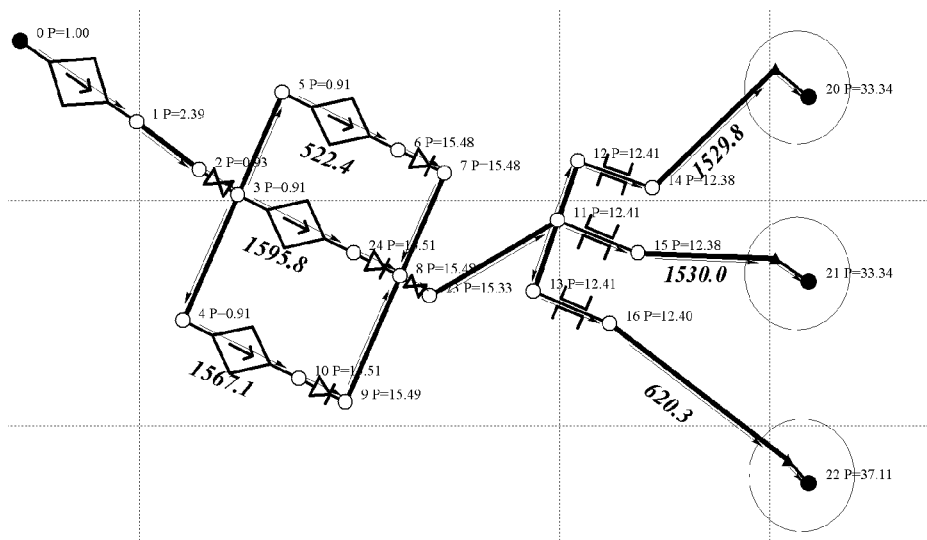


Рисунок 1. Пример модели небольшой ТГС –
потокораспределение до оптимизации

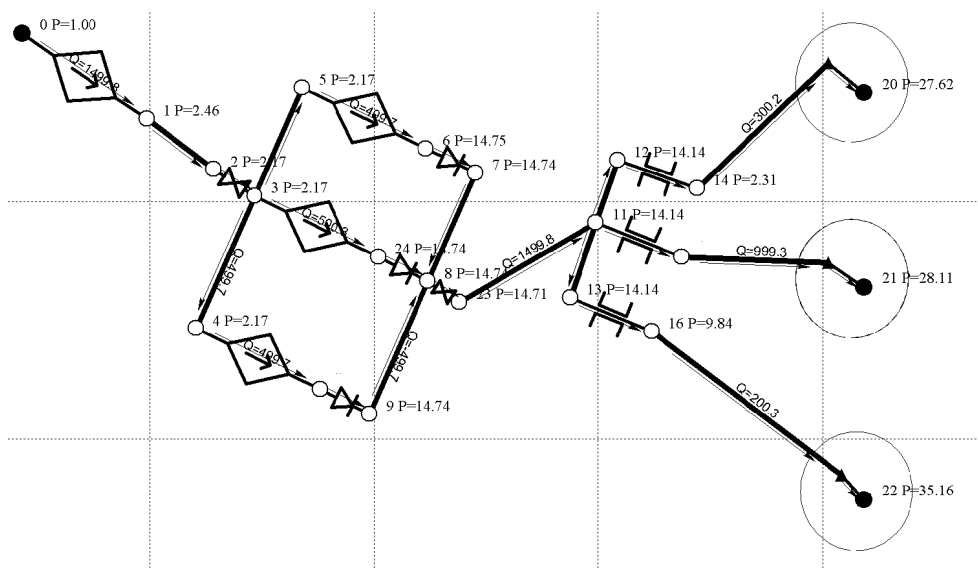


Рисунок 2. Схема потокораспределения модели ТГС после оптимизации

Таблица 1

Комплексных показателей ТГС до и после оптимизации

Величина	Ед. изм.	Значение до оптимизации	Значение после оптимизации
к.п.д. – $\eta_{фг}$	%	21,2	32,59
Отклонение – S_e	%	148,7	0,08
Коэффициент эффективности – $\bar{K}_{эфф}$	д.е.	$2,4 \cdot 10^{-4}$	0,38

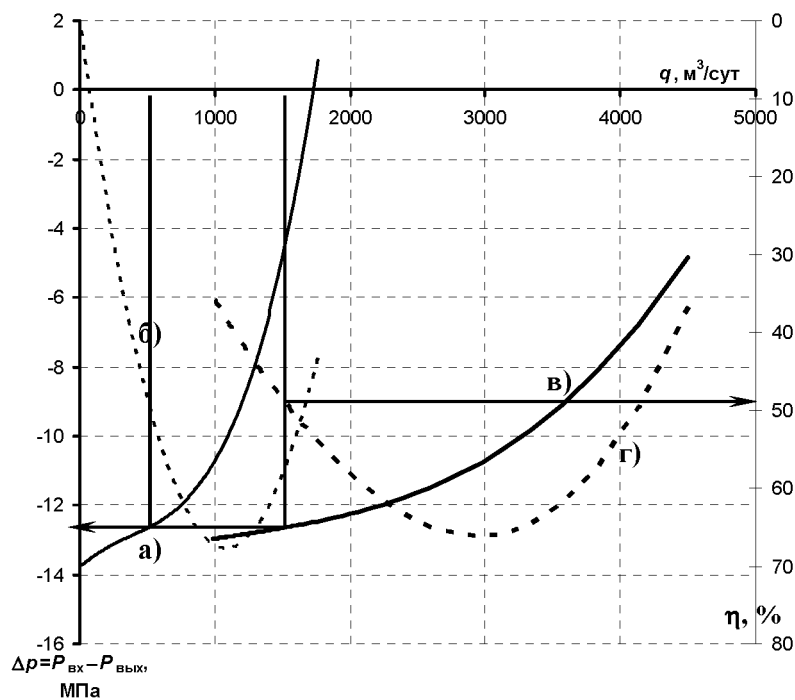


Рисунок 3. Гидравлические характеристики:

$a - \Delta p(q)$ отдельного насоса; $b - \eta(q)$ отдельного насоса; $в - \Delta p(q)$ КНС; $г - \eta(q)$

Как видно из графика (рис. 3г) оптимальный расход КНС составляет $\approx 3000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Однако в связи с тем, что необходимо распределенное управление закачкой, то приходится «зажимать» насосную станцию до $\approx 1500 \text{ м}^3/\text{сут}$, что соответствует к.п.д. КНС = 48.7 %.

Так как корректирующие коэффициенты kQ и kdP для всех АСГ примерно равны, то характеристики всех насосов на кустовой станции должны соответствовать найденной (оптимальной). На рис. 4 показаны кривые оптимальной гидравлической характеристики насосов, к которой необходимо привести их фактические характеристики для достижения оптимального состояния системы, т.е. комплексных показателей $\bar{K}_{эфф}$, $\eta_{ф}$.

Для более четкой постановки задачи оптимизации искомые корректирующие коэффициенты kQ , kdP должны относиться не к каждому насосу системы, а в целом для КНС. Т.е. искомой должна являться характеристика КНС (см. рис. 3в), при условии, что в середине интервала рабочего диапазона расходов $- q = Q_{\max}/2$ будет достигаться максимальный к.п.д. КНС. Также желательно, чтобы текущий

режим КНС соответствовал максимальному к.п.д., для чего необходимо, что бы перепад давления между приемом и выкидом КНС соответствовал текущему, при котором $K_{эфф} \rightarrow \max$.

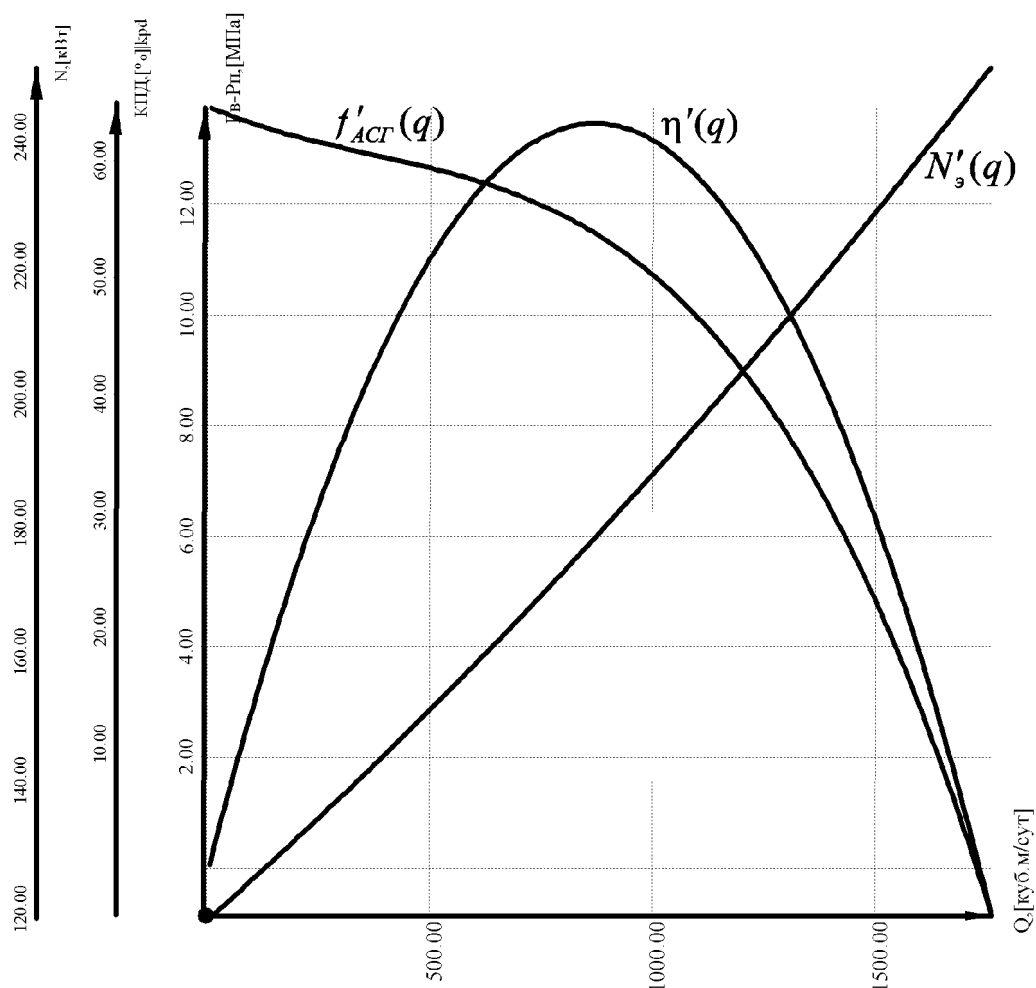


Рисунок 4. Пример кривых гидравлических характеристик насосов, полученных в результате оптимизации

Такая постановка задачи сокращает количество неизвестных коэффициентов kQ , kdP до минимума – количества КНС в системе ППД. Для решения задачи технико-технологической оптимизации в таком виде необходимо преобразовать схему модели на рис. 1 к виду на рис. 5 так, чтобы в системе был один насосный агрегат, который подразумевает КНС в целом.

Для вышеприведенного примера необходимо исключить два звена, соответствующих верхнему и нижнему насосу, а в звене среднего насоса вместо $kQ = 0,15$ указать $kQ = 0,45$, что соответствует трем установленным параллельно насосам с $kQ = 0,15$.

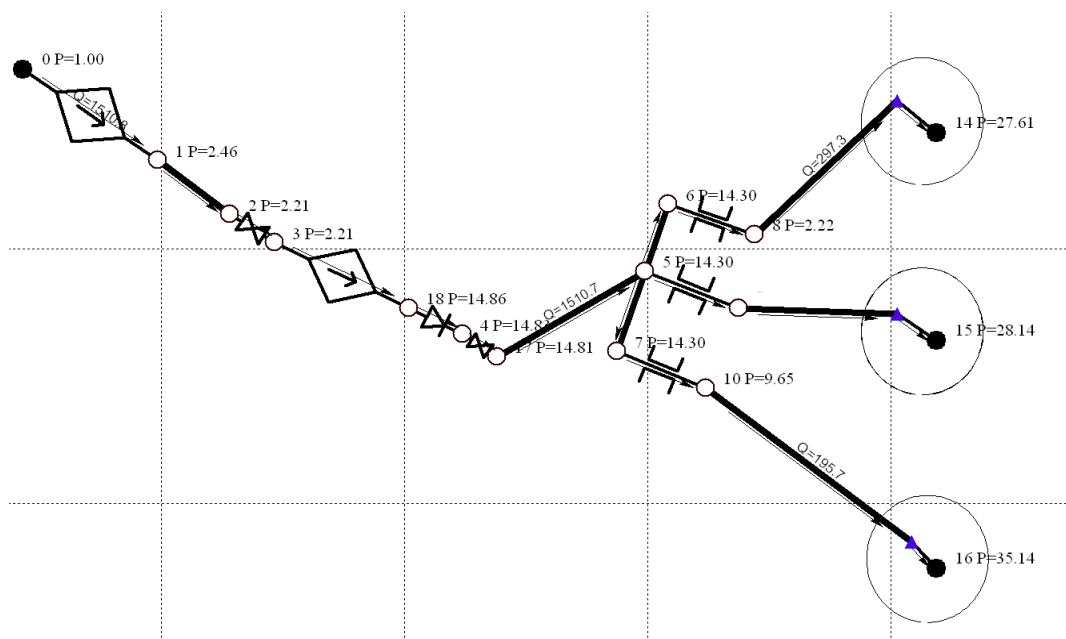


Рисунок 5. Схема модели ТГС с приведенной КНС к одному насосу

Как уже оговаривалось, задача поиска характеристики КНС фактически сводится к поиску коэффициентов kdP и kQ , которые корректируют исходную характеристику типового насосного агрегата, устанавливаемого на КНС.

Для достижения найденной (рис. 3в, г) характеристики КНС в наиболее общем случае ее необходимо подобрать посредством формирования структуры КНС и выборе насосных агрегатов из предлагаемых типоразмеров.

Задача подбора типоразмеров насосов и структуры КНС под требуемую (оптимальную) гидравлическую характеристику КНС сводится к расчетному выбору гидравлических характеристик насосов из предлагаемого заводами-изготовителями ряда, количества и структурной схемы их (насосов) подключения. Причем, значение коэффициента полезного действия КНС должно соответствовать тому, которое найдено при поиске оптимального состояния – $\eta_{КНС}^u$ при оптималь-

ном расходе через КНС – $Q_{КНС}^n$ и перепаде давления между приемом и выкидом – $\Delta p_{КНС}^n$, также соответствующим оптимальному состоянию.

Для наиболее простого варианта подбора, когда предполагается установка одинаковых насосов исключительно параллельно, задача решается следующим образом.

Допустим, из решения (5) известна гидравлическая характеристика КНС – $\Delta p_{КНС}^n = f_{КНС}(q)$, $\eta_{КНС}(q)$ и характеристика k -ого из списка T типоразмеров насосных агрегатов – $\Delta p = f_k(q)$, $\eta_k(q)$ тогда для достижения наилучшего совпадения между подбираемой и требуемой характеристикой КНС в точке $\Delta p_{КНС}^n(Q_{КНС}^n)$ необходимо решить задачу минимизации, относительно количества насосов N и номера функций характеристик k из некоторого множества, состоящего из T насосов, предлагаемых изготовителями:

$$\left| \frac{f_{КНС}(Q_{КНС}^n) - f_k\left(\frac{Q_{КНС}^n}{N}\right)}{f_{КНС}(Q_{КНС}^n)} \cdot \frac{\eta_{КНС}(Q_{КНС}^n) - \eta_k\left(\frac{Q_{КНС}^n}{N}\right)}{\eta_{КНС}(Q_{КНС}^n)} \right| \rightarrow \min. \quad (9)$$

Так как список типоразмеров насосов представляет собой дискретное множество, то задачу (9) можно решить «прогонкой» всех доступных T функций характеристик для различных значений N . При прогонке количество T предлагаемых изготовителем насосов ограничено и составляет порядка 20 - 30, а количество устанавливаемых на одну КНС насосов N можно ограничить константой R , т.е. $N = 1, 2, \dots, R$, которую можно задать равной 40. Таким образом, решение (9) требует максимум $T \times R = 30 \times 40 = 1200$ пересчетов, что вполне приемлемо.

В связи с тем, что параллельной установкой насосов не всегда можно добиться достаточно точного совпадения с требуемой, т.е. полученной из решения (5) характеристикой КНС, в наиболее общем случае структура КНС должна состоять из двух блоков (рис. 6). Предполагается, что насосы второго блока выдержат давление, подаваемое первым. Насосы, стоящие в первом блоке будут одинаковыми и соответствовать номеру k_1 из списка предлагаемых заводами, а насосы во втором блоке будут соответствовать номеру k_2 из того же списка. Количество насосов в первом блоке N_1 может отличаться от количества насосов во втором N_2 . Для выбора N_1, N_2, k_1, k_2 необходимо решить задачу аналогичную (9).

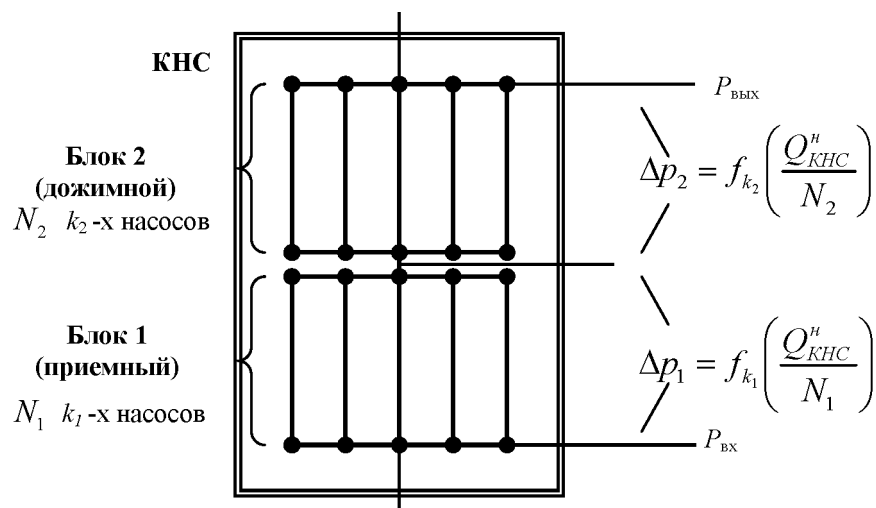


Рисунок 6. Структурная схема двухблочной КНС для подбора насосов

Для этого при искомым N_1, N_2, k_1, k_2 должно достигаться минимальное относительное отклонение требуемого перепада давления Δp_{KHC}^n при $Q_{KHC}^n - f_{KHC}(Q_{KHC}^n)$ от суммарного перепада давления в блоках:

$$\left| \frac{f_{KHC}(Q_{KHC}^n) - \left[f_{k_1} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \right) + f_{k_2} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \right) \right]}{f_{KHC}(Q_{KHC}^n)} \right| \rightarrow \min \quad (10)$$

Для совмещения с кривой $\eta_{KHC}(q)$ в точке Q_{KHC}^n необходимо рассчитать текущий к.п.д. КНС, соответствующий факторам N_1, N_2, k_1, k_2

$$\eta'_{KHC}(Q_{KHC}^n) = \frac{Q_{KHC}^n \cdot \left[f_{k_1} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \right) + f_{k_2} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \right) \right]}{f_{k_1} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \right) \frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \frac{N_1}{\eta_{k_1} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \right)} + f_{k_2} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \right) \frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \frac{N_2}{\eta_{k_2} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \right)}} \quad (11)$$

и минимизировать относительное отклонение $\eta'_{KHC}(Q_{KHC}^n)$ от $\eta_{KHC}(Q_{KHC}^n)$

в точке Q_{KHC}^n

$$\left| \frac{\eta_{KHC}(Q_{KHC}^n) - \eta'_{KHC}(Q_{KHC}^n)}{\eta_{KHC}(Q_{KHC}^n)} \right| =$$

$$\left[\frac{\eta_{KHC}(Q_{KHC}^n) \cdot \left[f_{k_1} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \right) + f_{k_2} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \right) \right]}{f_{k_1} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \right) \frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \eta_{k_1} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \right) + f_{k_2} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \right) \frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \eta_{k_2} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \right)} \right] \rightarrow \min \quad (12)$$

После совмещения (10) и (12) окончательно получим зависимость для подбора N_1+N_2 насосов в двух-блочную КНС

$$\left[\frac{f_{KHC}(Q_{KHC}^n) \cdot \left[f_{k_1} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \right) + f_{k_2} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \right) \right]}{f_{KHC}(Q_{KHC}^n)} \right] \times$$

$$\left[\frac{\eta_{KHC}(Q_{KHC}^n) \cdot \left[f_{k_1} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \right) + f_{k_2} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \right) \right]}{f_{k_1} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \right) \frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \eta_{k_1} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_1} \right) + f_{k_2} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \right) \frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \eta_{k_2} \left(\frac{Q_{KHC}^n}{N_2} \right)} \right] \rightarrow \min \quad (13)$$

Решение (13) аналогично (9) сводится к прогонке $T^2 \times R^2$ (максимум 1,44 млн.) раз для нахождения произведения относительных отклонений по $f_{KHC}(Q_{KHC}^n)$ и $\eta_{KHC}(Q_{KHC}^n)$ для различных $N_1 \in [1 \dots T]$, $N_2 \in [1 \dots T]$, $k_1 \in [1 \dots R]$, $k_2 \in [1 \dots R]$.

Естественно, точный подбор гидравлических характеристик насосов или КНС, соответствующих найденным при оптимизации, невозможен. Поэтому придется обойтись лишь стремлением к максимально точному приближению.

Таким образом, после нахождения тех-показателей d , kQ и kdP остается только сменить диаметры штуцеров на найденные и подобрать насосные агрегаты в соответствии с найденными оптимальными характеристиками в реальной ТГС для достижения комплексного оптимума: максимизации к.п.д. системы и мини-

мизации отклонений приемистостей нагнетательных скважин от требуемых по технологии заводнения.

Следует отметить, что в случае, когда предполагается оптимизировать ТГС, посредством корректирующих коэффициентов kQ и kdP для одной КНС, характеристику которой возможно привести к одному насосу с суммарной гидравлической характеристикой, то решение (5) будет более эффективным в плане скорости вычислений.

Например, для модели системы ППД Северо-Покурского месторождения, состоящей из 1461 звена и 1415 узлов время расчета комплексного потокораспределения составляет 1-1,5 секунд (для ПК – Intel 4000). Для решения (5) в среднем необходимо от 10 - 200 итераций. На каждой итерации необходимо вычисление градиентов регулировочных кривых, которое требует $(M \times 2 + N)^2 + 1$ (здесь N – количество скважин/штуцеров) вычислений текущего потокораспределения. Таким образом для системы ППД Северо-Покурского месторождения, в которой 239 нагнетательных скважин и две КНС (на 01.05.2006), время, необходимое для расчета корректирующих коэффициентов kQ , kdP и диаметров штуцеров, составит порядка 70860 с или 19,68 часов.

Необходимо заметить, что для решения задач такого порядка следует использовать параллельные вычислительные системы, кластеры, суперкомпьютеры, GRID-системы.

Решение описанной выше задачи несколько осложняется тем, что при поиске экстремума многомерной функции вес отдельных факторов (аргументов) может быть не учтен с достаточной точностью. В связи с этим ниже предлагается метод уточнения искомой характеристики КНС и искомых в (5) диаметров штуцеров.

После решения задачи оптимизации в виде (5), уточнение следует проводить в три этапа.

1. Задав в узлах перед штуцерами постоянный отток равный номинальной приемистости для каждой скважины необходимо исключить структуру системы после штуцеров – со стороны нагнетательных скважин, в результате чего получится схема на рис. 7. Далее необходимо рассчитать текущее потокораспределение [5]. В результате получим расход жидкости через КНС, который безусловно будет равен

сумме заданных номинальных приемистостей нагнетательных скважин –

$$Q_{КНС}^n = \sum_{k=1}^N Q_{S_k}^o, \text{ где } k - \text{ номер элемента в множестве } S, N - \text{ количество элементов}$$

множества S , т.е. скважин равное количеству штуцеров. Здесь также важно знать найденный перепад давления между приемом и выкидом КНС – $\Delta p_{КНС}^n$, который в нашем примере (рис. 7) равен $p_3 - p_9 = 2,21 - 14,87 = -12,66$ МПа.

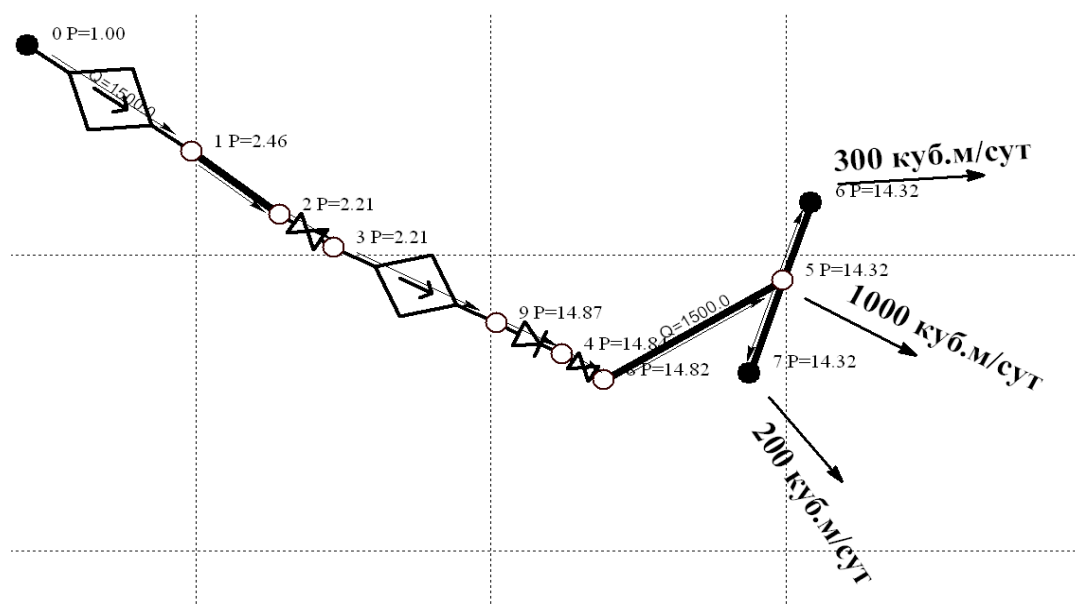


Рисунок 7. Усеченная схема модели ППД (с указанием вместо штуцеров и скважин фиксированных оттоков, равных требуемым приемистостям)

2. Необходимо с помощью коэффициентов kQ , kdP скорректировать ранее найденную характеристику КНС – $f_{КНС}(q)$ так, чтобы она проходила через точку $\Delta p_{КНС}^n(Q_{КНС}^n)$, а точка максимального к.п.д. – $\eta_{КНС}^{\max}$ соответствовала точке текущего расхода – $Q_{КНС}^n$.

Ранее найденные коэффициенты $kQ = 0,45$ (три насоса с $kQ = 0,15$) и $kdP = 0,9$. Характеристика КНС ранее найденная из решения (5) показана на рис. 8а. Из графиков видно, что при текущем расходе КНС не достигается максимальное значение к.п.д. и составляет порядка 48 %. После ремасштабирования данных характеристик посредством коррекции kQ и kdP получим окончательную характеристику КНС (рис. 8б), при которой достигается максимизация к.п.д. и

соответствие текущему режиму. Для уточненной характеристики КНС – $kQ = 0,25$, $kdP = 1,01$.

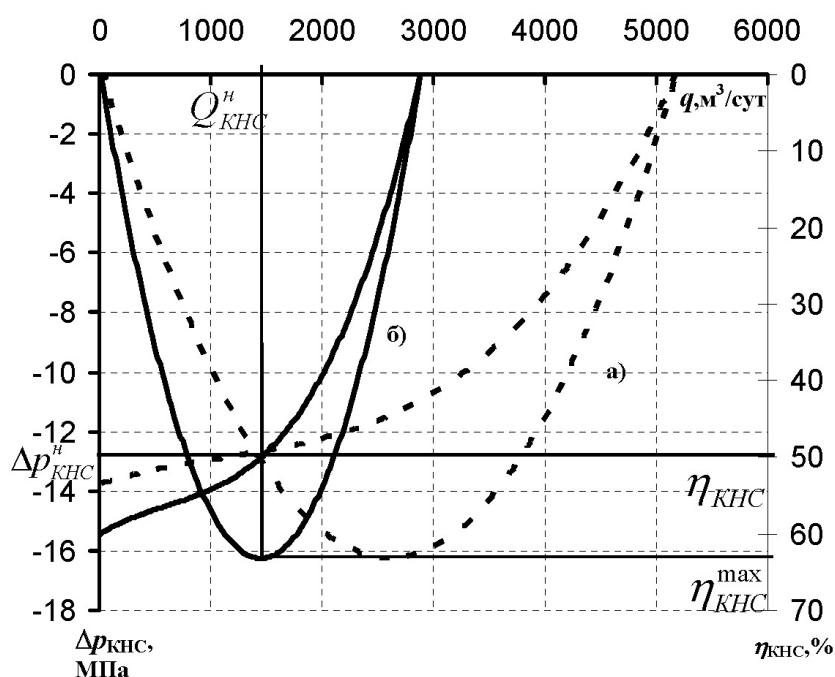


Рисунок 8. Оптимальная характеристика КНС:
а – до уточнения; б – после уточнения

3. Необходимо решить задачу подбора диаметров штуцеров в условиях заданных коэффициентов коррекции (ремасштабирования) гидравлической характеристики в полной схеме модели, т.е. с нагнетательными скважинами (рис. 9).

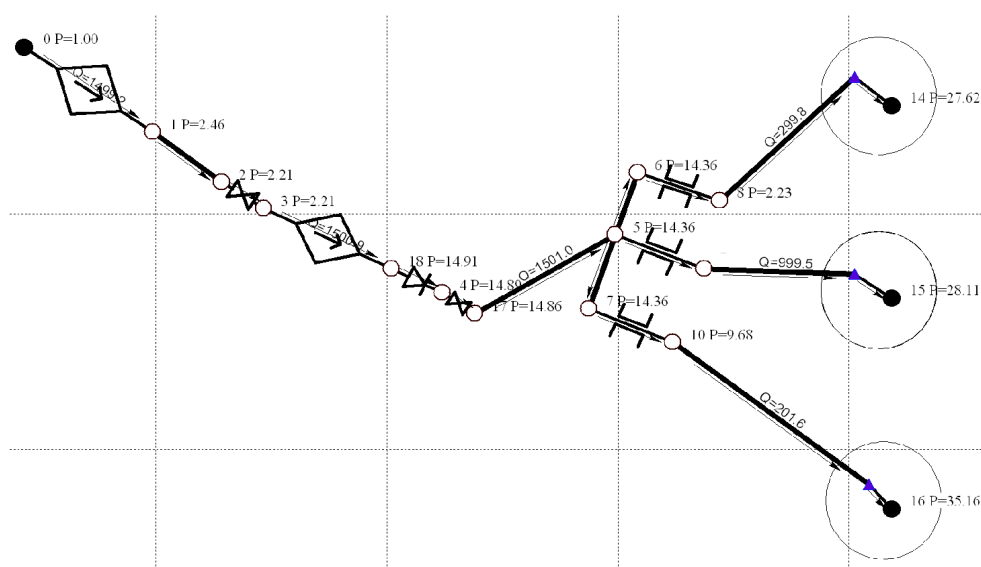


Рисунок 9. Потокораспределение в окончательно оптимизированной системе

Задача поиска диаметров N штуцеров для соблюдения равенства текущих приемистостей N нагнетательных скважин сводится к системе нелинейных уравнений вида

$$\begin{cases} \psi_{q_{S_0}}(d_{S_0}, d_{S_1}, \dots, d_{S_k}, \dots, d_{S_{N-1}}) = Q_{S_0}^o \\ \psi_{q_{S_1}}(d_{S_0}, d_{S_1}, \dots, d_{S_k}, \dots, d_{S_{N-1}}) = Q_{S_1}^o \\ \vdots \\ \psi_{q_{S_k}}(d_{S_0}, d_{S_1}, \dots, d_{S_k}, \dots, d_{S_{N-1}}) = Q_{S_k}^o \\ \vdots \\ \psi_{q_{S_{N-1}}}(d_{S_0}, d_{S_1}, \dots, d_{S_k}, \dots, d_{S_{N-1}}) = Q_{S_{N-1}}^o \end{cases}, \quad (14)$$

где S – множество с номерами, звеньев соответствующих скважинам или структурно (линейно) соединенным с ними штуцерам;

$Q_{S_k}^o$ – значение заданной по технологии заводнения приемистости скважины и расхода в линейно-связанным с ней штуцером-звеном – S_k (номинальный расход);

k – номер элемента в множестве S ;

N – количество элементов множества S , т.е. скважин, равное количеству штуцеров;

$\psi_{q_{S_i}}(d_{S_0}, d_{S_1}, \dots, d_{S_k}, \dots, d_{S_{N-1}})$ – функции РК, соответствующие зависимостям объемного расхода в скважинах от диаметров штуцеров линейно-связанных с ними (здесь и далее значения функции $\psi_{q_{S_i}}$ равны гидропараметру звена $S_k - q_{S_k}$).

Таким образом, в полученной системе коэффициент относительной эффективности – $K_{эфф} = 0,44$, а полный к.п.д. – $\eta_{ф} = 43,5\%$, что заметно – на 15 - 17 % выше, чем при первоначальной оптимизации (см. табл. 1).

Анализ реагирования гидросистем на изменение технических показателей показал, что системы поддержания пластового давления хорошо управляемы, и задача нахождения параметров системы соответствующих наиболее эффективно-му технико-технологическому состоянию, сводится к решению поиска максимума целевой n -мерной функции – это позволило достичь наилучших технических показателей (минимизации энергетических затрат) при соблюдении технологических параметров.

Литература

1. Беляев Л.С. Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределенности. Новосибирск: Наука, 1978, 128 с.

2. Беляев Л.С., Горский Ю.М., Крумм Л.А., Макаров А.А., Меренков А.П., Попырин Л.С., Руденко Ю.Н., Шер И.А. Оптимизация и управление большими системами энергетики (основные результаты исследований). Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1980, №3, с. 31–46.

3. Крумм Л.А. Методы оптимизации при управлении электроэнергетическими системами. – Новосибирск: Наука, 1981, 320 с.

4. Сумароков С.В., Меренкова Н.Н., Храмов А.В. и др. Проектирование систем групповых водопроводов с применением методов дискретной оптимизации. – Науч. труды Всесоюз. объединения Союзводпроект, 1981, №56, с. 62–68.

5. Стрекалов А.В. Математические модели гидравлических систем для управления системами поддержания пластового давления. Тюмень, 2007. ОАО Тюменский дом печати. 664 с.

6. Стрекалов А.В. Системный анализ и моделирование гидросистем поддержания пластового давления. Тюмень, ИФ «Слово», 2002.

7. Бочканов Сергей, Быстрицкий Владимир. ALGLIB User Guide - Одномерная и многомерная оптимизация. [Многоязыковая коллекция алгоритмов для решения проблем в области численного анализа и обработки данных]. URL: <http://alglib.sources.ru/optimization/> (дата обращения: 31.03.2010).