УДК 622.276.43, 532.542

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Стрекалов А.В., Королев М.С., Фоминых О.В.
Тюменский государственный нефтегазовый университет
email: fov@tsogu.ru

Рассмотрены возможности повышения уровня контроля и управления систем поддержания пластового давления посредством создания и использования унифицированной модели. Модель позволяет контролировать произвольную гидросистему и предсказывать реакции гидравлических режимов ее элементов при внесении каких-либо технических изменений. Практическое применение предложенной модели позволило увеличить энергосбережение в гидросистемах и повысить точность соответствия технологическим режимам заводнения за счет комплексной оптимизации.

Ключевые слова: *гидравлические, системы, нелинейные, сети, модели, пласты*

Особенный интерес для разработок в области моделирования представляют сложные системы с развитой структурой и состоящие из множества элементов, которые объединяют процессы движения жидкостей в наземных трубопроводных сетях, скважинах с фильтрационно-энергетическими процессами пластовых систем. Целевые параметры такого рода систем обычно трудно предсказуемы и сильно изменяются при изменении свойств хотя бы одного элемента системы [1].

В связи с тем, что наибольший уровень воздействия на пластовую систему и наибольшую энергоемкость имеют системы заводнения, основным аспектом практического применения описанных здесь моделей является повышение эффективности систем поддержания пластового давления (ППД) с позиции минимизации энергетических затрат и максимизации эффективности процесса нефтеизвлечения.

Большинство ограничений в известных моделях теории гидравлических цепей (ТГЦ) [1] связаны с фиктивными граничными условиями, ограничениями на вид структуры системы, требованиями к виду функций (замыкающих отношений), отсутствие взаимосвязи между гидравлическими режимами и важными техническими показателями элементов (например, взаимодействие с природными системами, перемерзание участков, аварийные режимы работы насосных агрегатов, изменение состояния обратных клапанов, переход гидравлической энергии в тепловую и т.п.).

В данной статье рассматривается возможность повышения уровня контроля и управления систем ППД посредством создания и использования более универсальной модели, с помощью которой стало бы возможно контролировать систему и предсказывать ее поведение при внесении каких-либо изменений. Использование такой модели, прежде всего, позволит увеличить к.п.д. гидросистем ППД и точность соответствия фактических режимов технологическим режимам нагнетания жидкости в пласты.

Итак, рассматривается ТГС с произвольной структурой [2, 3], состоящей из m узлов, из которых t узлов являются транзитивными, n звеньев и c путей возможного перемещения текучей среды между активными узлами. Будем считать, что для каждого звена $i \in [j_{ib}, j_{ie}]$ (звена i принадлежащего узлам j_{ib} и j_{ie}), где j_{ib} и j_{ie} его начальный и конечный узлы, задан закон гидравлического воздействия, связывающий перепад давления $\Delta p_i'$ (обусловленный техническими свойствами элемента i) на концах звена и установившийся расход q_i:

$$\Delta p_i' = f_i(q_i) \,. \tag{1}$$

Функции $f_i(q_i)$ – замыкающие отношения – характеризуют взаимосвязь пе-репада давления от расхода обусловленную внутренними параметрами звена i. Вид $f_i(q_i)$ например, зависит от параметров гидравлического сопротивления трубопроводной арматуры, производительности насосов и т.д.

Полный перепад давления на концах звена i будет зависеть от функции $f_i(q_i)$ и гидростатического перепада, при условии нахождения ТГС в поле гравитации:

$$\Delta p_i = \Delta p_i' - \Delta z_i = f_i(q_i) - \Delta z_i \,, \tag{2}$$

где Δz_i – гидростатический перепад давления $\Delta z_i = \rho g (z_{j_{ib}} - z_{j_{ie}})$, где ρ – плотность текучей среды, g – ускорение свободного падения, $z_{j_{ib}}$ и $z_{j_{ie}}$ – высоты узлов j_{ib} и j_{ie} над уровнем моря. Влияние факторов «гидростатического парадокса» во внимание не принимается.

Метод «путевой увязки» потокораспределения. Согласно данному методу для любого потокораспределения должны выполняться следующие условия. Во-первых, в каждом транзитивном (соединенным с более чем одним звеном) узле j должен соблюдаться материальный баланс, отвечающий принципу неразрывности (сплошности) потока текучей среды:

$$\sum_{i\in j} q_i = 0,\ j = 1,2,\dots t\,, \tag{3}$$

где слева стоит алгебраическая сумма расходов по всем звеньям, имеющим общий (независимо от того, конечный это или начальный) транзитивный узел j. Причем, если звено входит в узел, то знак перед q_i берется положительным, а если выходит – отрицательным. Для активных узлов уравнения материального баланса не записываются.

Во-вторых, сумма перепадов давления $\varDelta p_i'$ на концах звеньев, входящих в путь r, должна быть равна сумме гидростатических перепадов давления на концах звеньев, входящих в этот путь и перепадов давления между узлом начала пути и узлом конца пути. Ими являются активные узлы, символизирующие накопители текучей среды (НТС), давление в которых задано на момент расчета. Для пути r можно записать:

$$\sum_r \varDelta p_i' = \sum_r f_i(q_i) = P_{rb} - P_{re} + \sum_r \varDelta z_i\,, \tag{4}$$

где слева стоит алгебраическая сумма перепадов давления (обусловленных техническими свойствами объектов) на концах звеньев, входящих в путь r, справа – разность давлений в активных узлах, образующих путь (P_{rb} – давление в узле начала обхода пути, P_{re} – давление в узле конца обхода) и сумма гидростатических перепадов давления на концах звеньев, входящих в путь.

Направление «обхода» пути задается выбором одного из пары активных узлов начальным, а другого конечным. Т.е. как и в звеньях, но уже для цепочки от одного НТС до другого. Поскольку активные узлы отражают элемент НТС, то согласно первому свойству НТС, значения P_{rb} и P_{re}, характеризующие стабилизированный потенциал текучей среды, должны быть заданы на текущий момент времени (давления в точках возможного притока/оттока – в реках, озерах, емкостях, пластах и т.д.). Введем вектор $\overline{Q}$ расходов, вектор перепадов давлений $\overline{Y'}$, обусловленных внутренними свойствами элементов, вектор полных перепадов давлений $\overline{Y}$, вектор $\overline{P}$ давлений во всех узлах модели и вектор $\overline{Z}$ гидростатических перепадов давлений на концах всех звеньев:

$$\overline{Q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_i \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}; \quad \overline{Y}' = \begin{bmatrix} y_1' \\ y_2' \\ y_i' \\ \vdots \\ y_n' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta p_1' \\ \Delta p_2' \\ \Delta p_i' \\ \vdots \\ \Delta p_n' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(q) \\ f_2(q) \\ f_i(q_i) \\ \vdots \\ f_n(q_n) \end{bmatrix}; \quad \overline{P} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_j \\ \vdots \\ p_m \end{bmatrix},$$

$$\overline{Z} = \begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_i \\ \vdots \\ \Delta z_n \end{bmatrix}; \quad \overline{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_i \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \\ \Delta p_i \\ \vdots \\ \Delta p_n \end{bmatrix} = \overline{Y}' - \overline{Z} = \begin{bmatrix} \Delta p_1' \\ \Delta p_2' \\ \Delta p_i' \\ \vdots \\ \Delta p_n' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_i \\ \vdots \\ \Delta z_n \end{bmatrix},$$

где i – номер звена; n – количество звеньев в структурной схеме; j – номер узла; m – количество узлов в структурной схеме ТГС.

Система уравнений в общем матричном виде сведется к системе нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) относительно вектора неизвестных расходов – $\overline{Q}$.

$$\begin{cases} \boldsymbol{A} \cdot \overline{Q} = 0 \\ \boldsymbol{B} \cdot \overline{Y}' = \overline{E} + \overline{U} \end{cases}, \tag{5}$$

где $\boldsymbol{A}$ – прямоугольная матрица ($m \times n$) соединений m узлов и n звеньев, однозначно описывающая структуру системы [2];

$\boldsymbol{B}$ – прямоугольная матрица путей, где на пересечении столбца i, соответствующего звену i и строки r, соответствующей пути r, помещается элемент: 0, если звено i не соединено с узлом j; –1, если звено i исходит из узла j; +1, если узел i является для звена i конечным;

$\overline{E}$ – вектор, составленный из разностей давлений $P_{rb} - P_{re}$ между активными узлами соответствующего пути r;

$\overline{U}$ – вектор гидростатических перепадов между активными узлами, образующими путь.

Впервые алгоритм поиска оптимальной матрицы $\boldsymbol{B}$ был показан в работе [3].

Из матрицы $\boldsymbol{A}$ исключаются строки, соответствующие активным узлам для обеспечения энергетического баланса гидравлических энергий: разность суммы гидравлических энергий в единицу времени, поступающих в активные узлы извне, и суммы гидравлических энергий в единицу времени, исходящих из активных узлов в рассматриваемой гидросистеме, должна равняться сумме гидравлических мощностей N_s звеньев гидросистемы:

$$N_s = \sum_{i=1}^{n} \Delta p_i q_i = \sum_{i=1}^{n} f_i(q_i) q_i - \Delta z_i q_i \,.$$

Единственным недостатком исходной системы уравнений (5) является необходимость поиска системы из $c = n - m$ линейно-независимых путей. Решение системы (5) осуществляется численным методом Ньютона при нулевом начальном приближении с коррекцией приращений для определения частных производных замыкающих отношений (1) в конечно-разностном виде.

Метод «узловой увязки» потокораспределения. Основой для записи системы уравнений является материальный баланс в транзитивных узлах, выраженный через зависимости $q_i = S_i(\Delta p_i)$ расхода в звене i от перепада давления на его концах. Функция $S(\Delta p)$ является обратной функции $f(q)$, т.е. для ее определения в произвольной точке – Δp_0 необходимо в общем случае решить нелинейное уравнение $f(q) - \Delta p_0 = 0$ относительно неизвестного расхода q.

Выразив неизвестные расходы в (3) через функции $q_i = S_i(\Delta p_i)$ и заменив $\Delta p_i = p_{j_{ib}} - p_{j_{ie}}$, получим уравнения для t транзитивных узлов, где в каждом уравнении суммируются $S_i(\Delta p_i)$ для звеньев, соединенных (смежных) с транзитивным узлом j.

$$\sum_{i \in j} S_i(p_{j_{ib}} - p_{j_{ie}}) = 0, \; j = 1, 2, \ldots t \,, \tag{6}$$

Причем, давления в транзитивных узлах являются неизвестными, а давления в активных узлах константами или функциями от времени, которые могут быть рассчитаны моделью гидросистемы продуктивных пластов.

После приведения (6) к более удобному для решения виду окончательно получим однородную СНАУ относительно неизвестных давлений в транзитивных узлах:

$$\begin{cases} F_1(p_1, p_2, .., p_j, p_m) = 0 \\ \vdots \\ F_j(p_1, p_2, .., p_j, p_m) = 0 \\ \vdots \\ F_t(p_1, p_2, .., p_j, p_m) = 0 \end{cases} , \tag{7}$$

где $F_j(p_1, p_2, .., p_j, .., p_m)$ – функция зависимости суммы массовых или объемных расходов потоков, сходящихся в транзитивном узле j от давлений в смежных с ним узлах (в том числе и активных).

Для описания условий сжимаемости текучей среды необходимо функционально определить зависимость физических свойств среды, влияющих на распределение потоков от давления. Для этого зададимся функциями $\rho(p)$ – зависимости плотности от давления и $\nu(p)$ – зависимости кинематической вязкости от давления. Для воды систем ППД можно использовать эмпирические зависимости [3]:

$$\rho(p,T)=1000{,}26-0{,}009\,T^{1{,}837-0{,}0002135\,p}+0{,}4306\,p\,, \tag{8}$$

$$\nu(p,T)=0{,}1846+\frac{1{,}5778}{e^{0{,}03131\cdot T}}-p\frac{0{,}00138}{T^{0{,}238}}\,, \tag{9}$$

где p – безразмерное давление равновеликое размерной величине в МПа; T – безразмерная температура равновеликая размерной величине в °С; ρ – плотность, кг/м^3; ν – кинематическая вязкость, мм^2/с. Эмпирические константы берутся с соответствующей размерностью.

Для сжимаемых сред необходимы другие замыкающие отношения: функции $S_i'(p_{j_{ib}},p_{j_{ie}},z_{j_{ib}},z_{j_{ie}})$, связывающие массовый расход M_i, давления и отметки высот концов звеньев. Подставив данные функции в (6) получим систему из уравнений вида

$$\sum_{i\in j} a_{ji} S_i'(p_{j_{ib}},p_{j_{ie}},z_{j_{ib}},z_{j_{ie}})=0\,, \tag{10}$$

где $z_{j_{ib}}$, $z_{j_{ie}}$ – абсолютные отметки положения узлов начала и конца звена i относительно отсчетной плоскости. Задавшись вектором абсолютных отметок всех узлов – $\overline{V}=(z_1,z_2,\ldots,z_j,\ldots,z_m)$, то в матрично-векторном представлении (10) будет

$$\boldsymbol{A}\cdot\overline{S'}(\overline{P},\overline{V})=0\,. \tag{11}$$

Для нахождения зависимостей $S_i'(p_{j_{ib}},p_{j_{ie}},z_{j_{ib}},z_{j_{ie}})$ при формировании модели каждого звена необходимо численно решить уравнение, связывающее массовый расход в звене i с давлениями на его концах. Разделим звено i на N частей. Будем нумеровать каждый участок звена индексом k, начиная от узла начала (рис. 1).

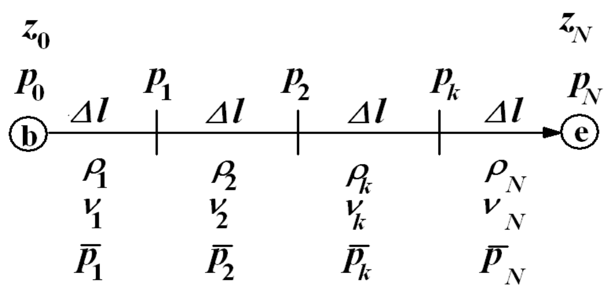

Рисунок 1. Схема расчета для условий сжимаемости текучей среды

На каждом малом участке звена – $\Delta l = \frac{l}{N}$ будем полагать величины плотности и кинематической вязкости постоянными, т.е. независящими от изменения давления. Рассматривая функцию зависимости перепада давления на участке Δl звена i от массового расхода в звене M_i, плотности ρ и кинематической вязкости ν на этом участке в виде функции $f_i(M_i, \rho, \nu, \Delta l)$, получим следующее соотношение

$$w_i(M_i) = \sum_{k=1}^{N} f_i(M_i, \rho_k, \nu_k, \Delta l, \Delta z_k) = p_0 - p_N = p_{j_{ib}} - p_{j_{ie}}, \tag{12}$$

где $M_i = q_{i_k}\rho_k$ – массовый расход в звене равный произведению объемного расхода на участке k на плотность; $\rho_k = \rho\left(\overline{p_k}\right)$ – средняя плотность на участке k; $\nu_k = \nu\left(\overline{p_k}\right)$ – средняя кинематическая вязкость на участке k; $\Delta z_k = \frac{z_0 - z_N}{N}\rho_k g =$ $= \Delta l \frac{z_0 - z_N}{l}\rho_k g$ – гидростатический перепад давления на участке k.

Здесь $\overline{p}_k = \frac{p_k + p_{k-1}}{2}$ – среднее давление на участке k. Давления к началу следующего участка определяются последовательно, на основании замыкающих отношений (1) для несжимаемой ТС:

$$p_k = p_{k-1} - f_i(q_{i_k}, \rho_k, \nu_k, \Delta l) + \Delta z_k .$$

При решении (12) в момент нахождения входящих в (10 - 11) $S_i'(p_{j_{ib}}, p_{j_{ie}}, z_{j_{ib}}, z_{j_{ie}})$ величины p_0, z_0 и p_N, z_N являются константами, однозначно определяющими вид зависимости от M_i слева. Таким образом, функцию $w_i(M_i)$ посредством численного решения можно обратить, т.е. решить относительно неизвестных давлений в виде функции $M_i = S_i'(p_{j_{ib}}, p_{j_{ie}}, z_{j_{ib}}, z_{j_{ie}})$.

Порядок расчета $w_i(M_i)$ зависит от соотношения направления потока и ориентации звена. Так, при противоположной ориентации звена потоку последовательность расчета p_k следует начинать с узла – конца звена, так как причинно-следственная связь прослеживается согласно направлению потока. Вследствие такой неоднозначности, вид функций $S_i'(p_{j_{ib}}, p_{j_{ie}}, z_{j_{ib}}, z_{j_{ie}})$ будет несколько изменяться при последовательном приближении к корню – потокораспределению в ходе численного решения (10 - 11).

Для систем ППД учет теплового обмена важен, вследствие необходимости учета изменения свойств текучей среды и выявления возможных фактов перемерзания участков ТГС.

Допустим, что для каждого звена i известно распределение температуры окружающей среды по длине звена l, описываемое функциональной зависимостью $H_i(l)$. Такие зависимости могут быть представлены в произвольном виде: алгебраически, табулированного множества $[H_k, l_k]$, в виде констант, интерполяционной зависимостью эмпирических данных и т.д. Предполагается, что теплопередача между текучей средой в звене и окружающей это звено средой происходит под действием перепада температуры потока и окружающей среды и может быть описана для каждого участка Δl звена, исходя из его морфологических свойств (например, площади поверхности контакта сред – ψ), свойств материала (например, коэффициент теплопередачи – γ), свойств текучей среды и перепада температуры между потоком и окружающей средой – Δt в виде функций $G_i(M_i, \Delta l, \gamma, \psi, \Delta t)$.

Также предполагается, что нагрев потока обусловлен переходом части гидравлической энергии потока в тепловую («термогидравлический» переход) вследствие гидравлического сопротивления, а также, вследствие кинетического воздействия активных элементов насосов на поток. Для трубопроводной арматуры, термогидравлический переход энергии будет описываться, исходя из потерь гидравлической энергии в звене i на участке Δl для несжимаемой жидкости в единицу времени, как

$$g_i(M_i, \Delta l) = f_i\left(\frac{M_i}{\rho}, \Delta l\right)\frac{M_i}{\rho}, \text{ Вт.} \qquad (13)$$

Для участка k длиной Δl звена i изменение температуры будет складываться из двух составляющих: рост температуры вследствие гидротермического перехода $\Delta T_{i_k}^{(g,\Delta l)}$ и рост или падение температуры вследствие передачи тепла между потоком и окружающей средой $\Delta T_{i_k}^{(m,\Delta l)}$.

$$\Delta T_{i_k}^{(g,\Delta l)} = \frac{g_i(M_i,\Delta l)}{M_i C_v} = \frac{\left[1-\Omega(\omega)\right] f_i\left(\frac{M_i}{\rho},\Delta l\right)\frac{M_i}{\rho}}{M_i C_v} = \frac{\left[1-\Omega(\omega)\right] f_i\left(\frac{M_i}{\rho},\Delta l\right)}{\rho C_v},$$

где C_v – удельная теплоемкость текучей среды, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot K}$.

Изменение температуры вследствие теплопередачи с окружающей средой на участке k длиной Δl звена i – $\Delta T_{i_k}^{(m,\Delta l)} = \frac{G_i[M_i,\Delta l,\gamma,\psi,\Delta t_k]}{M_i C_v}$, где $\Delta t_k = T_k - H_i(l_k)$ – разность температур потока и окружающей среды в звене i на участке k. Таким образом, для нахождения температуры потока на участке k звена i, необходимо суммировать все приращения температуры на участках c от 1 до k: $T_{i_k} = T_{i_{jb}} + \sum_{c=1}^{k}\left(\Delta T_{i_c}^{(g,\Delta l)} + \Delta T_{i_c}^{(m,\Delta l)}\right)$, причем, если полагать постоянство вязкости и плотности на участке, то величина $\Delta T_{i_k}^{(g,\Delta l)}$ по звену изменяться не будет. Здесь $T_{i_{jb}}$ – температура в узле (он может быть начальным или конечным для звена), в котором поток входит в звено. Для определения температуры на выходе из звена:

$$T_{i_{je}} = T_{i_{jb}} + \sum_{k=1}^{N}\left(\Delta T_{i_k}^{(g,\Delta l)} + \Delta T_{i_k}^{(m,\Delta l)}\right). \quad (14)$$

Для трубопроводов без учета гидротермического перехода в зависимости от температуры потока предыдущего участка k

$$T_{i_{k+1}} = T_M + (T_{i_k} - T_M)e^{\frac{-\psi\cdot\gamma\cdot}{M_i C_v}}, \quad (15)$$

где T_M – температура окружающей среды звена i на участке k; γ – коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{м^2 K}$; $\psi = \pi\cdot\Delta l\cdot d_г$ – поверхность контакта потока и внешней среды для труб круглого сечения, м^2.

Таким образом, после замены T_M на $H_i(\Delta l \cdot k)$, окончательно получим формулу для определения температуры потока в звене – круглом трубопроводе для несжимаемой жидкости на участке k относительно участка k–1:

$$T_{i_k} = H_i(\Delta l \cdot k) + \left[T_{i_{k-1}} - H_i(\Delta l \cdot k) \right] \cdot e^{\frac{-\Delta l \cdot \pi \cdot \gamma \cdot d}{M_i \cdot C_v}} + \\ + \left[1 - \Omega(\omega) \cdot f_i\left(\frac{M_i}{\rho}, \Delta l \right) \right] , \quad (16)$$

где $\Omega(\omega)$ – функция, описывающая долю рассеиваемой части гидравлической энергии, которая не переходит в тепловую, в зависимости от скорости потока ω.

Для расчета комплексного потокораспределения при неизотермическом течении сжимаемой или несжимаемой жидкости необходимо совместить потоко- и теплораспределение в системе. Для этого описанные выше зависимости для каждого звена i интегрируются в функции $\Delta T_i = \theta_i(M_i, T_{j_{i0}})$, описывающие перепад температуры ΔT_i потока между температурой на входе $T_{j_{i0}}$ и выходе из звена. Например, для трубопровода этой функцией будет:

$$\Theta_i\left({}_i M, T_{j_{i0}}\right) = \sum_{k=q} \left\{ \begin{array}{l} H_i(\Delta l \cdot k) + \left[T_{i_{k-1}} - H_i(\Delta l \cdot k) \right] \cdot e^{\frac{-\Delta l \cdot \pi \cdot \gamma \cdot d}{M_i \cdot C_v}} + \\ + \dfrac{1}{M_i C_v} \left[1 - \Omega\left(\dfrac{q_{i_k}}{\psi} \right) \right] \Delta p_{i_k} q_{i_k} \end{array} \right\} . \quad (17)$$

Причем, здесь при $k = 0$: $T_{i_0} = T_{j_{i0}}$, т.е. температура на входе в звено.

Во избежание возникновения ситуации бесконечного ΔT_i при $M_i = 0$, будем полагать, что при нулевом массовом расходе распределение температуры потока по длине звена будет эквивалентно распределению температуры внешней среды, т.е. согласно $H_i(l_i)$.

Рассмотрим задачу терморaспределения при текущем найденном потокораспределении. Допустим, после решения (11) имеем распределение давлений $\overline{P}$ и массовых расходов $\overline{M}$ для всех узлов и звеньев модели. Также заданы граничные условия терморaспределения: температуры в активных узлах, в которых происходит приток (при данном потокораспределении) в гидросистему. На основании зависимостей (17) для каждого звена i возможно рассчитать распределение температуры во всей системе.

Для этого вводятся функции температуры $\tau_j(T_1, T_2, \ldots, T_j, \ldots, T_m)$, определяющие на основании (17) всех звеньев, зависимость температуры в узле *j* от температуры во всех узлах:

$$\tau_j(T_{k1\in j}, T_{k2\in j}, \ldots, T_{kn\in j}) = \frac{\sum_{k\in j}^{n} |M_{i\in k}| \cdot \left[T_k + \theta_{i\in k}(M_{i\in k}, T_k)\right]}{\sum_{k\in j}^{n} M_{i\in k}}, \tag{18}$$

где $k\in j$ – индексы узлов инцидентных узлу *j*, из которых в узел *j* есть приток;

$i\in k$ – индексы звеньев соединяющих узлы *k* и узел *j*;

n – количество узлов инцидентных узлу *j*, из которых в узел *j* есть приток.

Причем задающими температуру в узле *j* считаются узлы, смежные с ним, из которых в узел *j* имеет место приток.

Для нахождения температур T_j в узлах предлагается следующая СНАУ, решаемая методом простой итерации:

$$\begin{cases} \tau_1(T_{k1\in 1}, T_{k2\in 1}, \ldots, T_{kn\in 1}) = \dfrac{\sum_{k\in 1}^{n} |M_{i\in k}| \cdot \left[T_k + \theta_{i\in k}(M_{i\in k}, T_k)\right] + x_1\varepsilon_1}{\sum_{k\in 1}^{n} M_{i\in k} + x_1} \\ \vdots \\ \tau_m(T_{k1\in m}, T_{k2\in m}, \ldots, T_{kn\in m}) = \dfrac{\sum_{k\in m}^{n} |M_{i\in k}| \cdot \left[T_k + \theta_{i\in k}(M_{i\in k}, T_k)\right] + x_m\varepsilon_m}{\sum_{k\in m}^{n} M_{i\in k} + x_m} \end{cases}. \tag{19}$$

Для использования комплексной модели системы ППД необходимо объединение граничных условий модели ТГС (МТГС) и модели ГПП. С этой целью для МТГС удобно в наиболее простой схеме рассматривать давление в активных узлах в виде зависимости от времени – $P(t)$, которая будет обуславливаться моделью ГПП, а для модели ГПП в качестве граничного условия удобно задаться зависимостью $Q(t)$ – приемистости от времени для каждого звена – скважины.

Необходимо также учитывать динамику проводимостей или замыкающих отношений $f(q)$ для призабойных зон пласта (ПЗП) нагнетательных скважин. Следует полагать, что проницаемость ПЗП также должна описываться зависимостью $k(t)$, которая будет рассчитываться в модели ГПП на каждом шаге времени.

Описанная выше модель является инструментом для планирования различного рода регулирующих мероприятий. При этом любое воздействие на систему выражается в изменении функций замыкающих отношений $f_i(q)$, а результатом будет новое потоко- и терляраспределение.

В связи с тем, что при регулировании системы отдельные, и довольно крупные (по количеству элементов), ее части не изменяются, а постоянный (в ходе поиска оптимального состояния) пересчет потокораспределения является ресурсоемкой задачей, требуется группировать некоторые участки структуры в блоки и рассчитывать их отдельно от всей структуры. При этом по результатам расчета блока в различных условиях на границах, возможно получить замыкающее отношение $f_{\text{В}}(q)$, которое будет являться зависимостью перепада давления на условных концах блока от расхода жидкости поступающего в блок или истекающего из него.

Рассмотрим пример гидросистемы на рис. 2, состоящей из трех трубопроводов и одного насоса – всего 4 звена. Давления в активных узлах – 0, 2 и 5 будем считать заданными.

Если предполагается сгруппировать данную гидросистему, то необходимо определить узел, относительно которого будет находиться остальная часть системы.

Допустим остальная часть ТГС находится по левую строну от узла 0, тогда участок на рис. 3 можно сгруппировать в виде одного звена, соединяющего узел 0 и фиктивный активный узел с нулевым давлением. Данное звено будет иметь некоторое замыкающее отношение $f_{\text{В}}(q) = P_0 - P_{\text{ф}}$, которое можно получить, отделив данный участок ТГС от остальной части приняв узел 0 активным и перебирая значения давления P_0 в этом узле получить посредством решения задачи потокораспределения величины расхода q жидкости в звене, соединенным с данным узлом. Таким образом, получим табулированную зависимость P_0 - q (см. рис. 3).

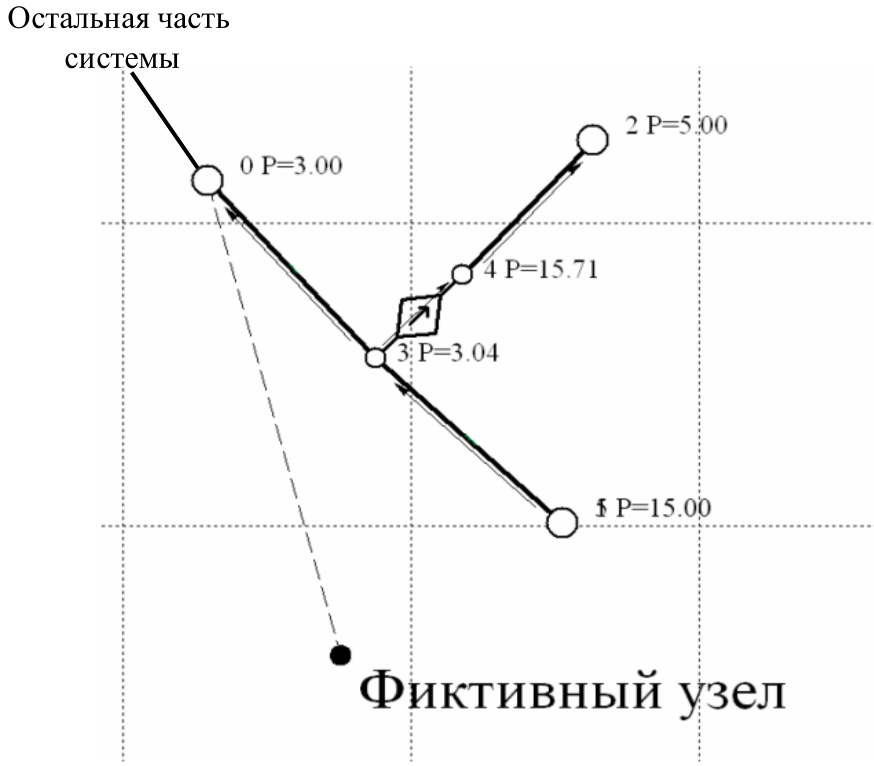

Рисунок 2. Пример участка ТГС на границе структуры

Так как давление $P_ф$ в фиктивном узле равно нулю, искомая зависимость $f_В(q) = \Delta p_{0-ф} = P_0$. Подытоживая вышесказанное, выделим этапы группировки звеньев участков гидросистемы в блоки:

1. Выделить участок гидросистемы, причем участок должен находиться на периферии структуры;

2. Выбрать узел, разделяющий основную гидросистему от выделенного участка;

3. Рассчитать потокораспределение выделенного участка, как если он был отдельной гидросистемой, причем выбранный узел должен быть активным, а давление в нем должно перебираться, хотя и в допустимых, но максимально возможных пределах;

Полученная зависимость $f_В(q)$ давления от расхода жидкости будет соответствовать гидравлической характеристике звена, которое может заместить выделенный участок от выбранного узла до фиктивного с нулевым давлением.

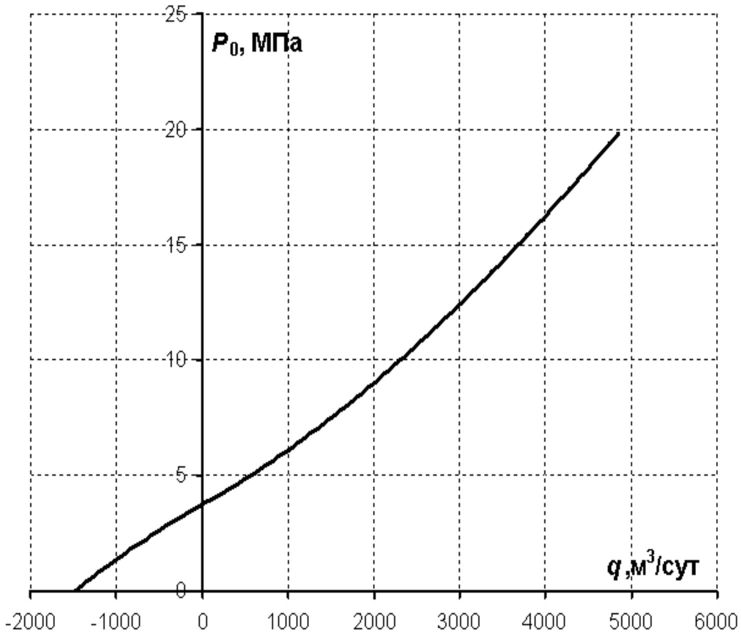

Рисунок 3. Гидравлическая характеристика блока

Таким образом, предложенная в данной статье модель позволяет прогнозировать распределение потоков в гидросистемах с произвольной структурой и свойствами элементов в условиях установившегося неизотермического течения сжимаемых сред. Также она может быть использована как инструмент планирования мероприятий по регулированию и оптимизации гидросистем поддержания пластового давления. Результаты ее применения показали совпадение с фактическими данными телеметрии в системах ППД ряда месторождений Западной Сибири – в пределах 3 - 8 %.

Литература

1. Меренков А.П., Хасилев В.Я. «Теория гидравлических цепей». – М.: Наука, 1985. – 276 с.

2. Стрекалов А.В. Системный анализ и моделирование гидросистем поддержания пластового давления. – Тюмень.: ИФ «Слово», 2002. – 324 с.

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

4. Стрекалов А.В. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2002611864. Комплекс универсального моделирования технических гидравлических систем поддержания пластового давления (Hydra'Sym). 2002.

5. Хасилев В.Я. Линейные и линеаризованные преобразования схем гидравлических цепей. – Изв. АН СССР, 270 с.