УДК 532.542

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

А.В. Стрекалов

Тюменский государственный нефтегазовый университет
E-mail: darlex77@mail.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, пласты.
Key words:
Hydraulic, systems, nonlinear, networks, layers.

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 рассматриваются возможности повышения уровня контроля и управления систем ППД посредством создания универсальной модели, с помощью которой стало бы возможно контролировать систему и предсказывать ее поведение при внесении каких-либо изменений. Использование этой модели прежде всего, позволило бы увеличить энергосбережение систем и точность соответствия технологическим режимам заводнения за счет комплексной оптимизации.

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 перепада 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 $\Delta z_i=\rho g(z_{j_{ib}}-z_{j_{ie}})$; 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:

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

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 $\Delta p_i'$ 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:

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

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. Если гидростатический перепад исключается справа, то суммирование слева берется согласно формуле (2).

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, рис. 1.

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

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

Рис. 1. *Вектора: 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 относительно вектора неизвестных расходов – $\overline{Q}$.

$$\begin{cases} A\overline{Q} = 0 \\ B\overline{Y'} = \overline{E} + \overline{U} \end{cases}, \qquad (5)$$

где $\boldsymbol{A}$ – прямоугольная матрица (mn) 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.

Автором был впервые разработан алгоритм поиска оптимальной матрицы $\boldsymbol{B}$ [3].

Из матрицы $\boldsymbol{A}$ исключаются строки, соответствующие активным узлам для обеспечения энергетического баланса гидравлических энергий (4): 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 конечном виде.

Метод «узловой увязки» потокораспределения. Основой для записи системы уравнений является материальный баланс в транзитивных узлах, выраженный через зависимости q_i=S_i (Δp_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 $f(q)$–Δp_0=0 относительно неизвестного расхода q.

Выразив неизвестные расходы в (3) через функции q_i=$S_i(\Delta p_i)$ и заменив Δp_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.

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

Причем, давления в транзитивных узлах является неизвестными, а давления в активных узлах константами или функциями от времени, которые рассчитываются в модели гидросистемы продуктивных пластов.

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

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

где $F_j(p_1,p_2,...,p_j,...,p_m)$ функции 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 автором получены эмпирические зависимости

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

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

где p – безразмерное давление равновеликое абсолютному, 1 д.е.=1 МПа; T – температура равновеликая абсолютной, 1 д.е.=°С; ρ – плотность, кг/м^3; ν – кинематическая вязкость, мм^2/с. Эмпирические константы берутся с соответствующей размерностью.

Здесь 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

$$\sum_{i\in j} a_{ji} S_i'(p_{j_{ib}}, p_{j_{ie}}, z_{j_{ib}}, z_{j_{ie}}) = 0, \qquad (8)$$

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 – $\overline{V}=(z_1,z_2,...,z_j,...,z_m)$, то в матрично-векторном представлении (8) будет

$$A\cdot\overline{S}'(\overline{P},\overline{V})=0. \qquad (9)$$

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. 2).

На каждом малом участке звена – $\Delta l=l/N$ будем полагать величины плотности и кинематической вязкости постоянными, т. е. независящими от изменения давления. Рассматривая функцию зависимости перепада давления на участке Dl 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

$$w_i(M_i) = \sum_{k=1}^{N} f_i(M_i, \rho_k, \nu_k, \Delta l, \Delta z_k) =$$
$$= p_0 - p_N = p_{j_{ib}} - p_{j_{ie}}, \qquad (10)$$

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

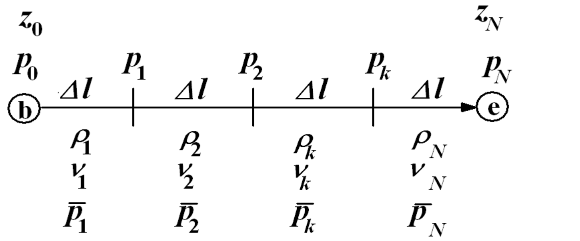

Рис. 2. *Схема расчета для условий сжимаемости текучей среды*

Здесь $\overline{p}_k=(p_k+p_{k-1})/2$ – 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 (10) в момент нахождения входящих в (7–9) $S_i'(p_{j_{ib}},p_{j_{ie}},z_{j_{ib}},z_{j_{ie}})$ 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 потокораспределения в ходе численного решения (8), (9).

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

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

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 $\Delta T_{i_k}^{(m,\Delta l)}$.

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

где C_v – удельная теплоемкость текучей среды, Дж/(кг.К).

Изменение температуры вследствие теплопередачи с окружающей средой на участке k длиной Δl звена i – $\Delta T_{i_k}^{(m,\Delta l)} = \dfrac{G_i[M_i, \Delta l, \gamma, \psi, \Delta t_k]}{M_i C_v}$, 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: $T_{i_k} = T_{i_{jb}} + \sum_{c=1}^{k}(\Delta T_{i_c}^{(g,\Delta l)} + \Delta T_{i_c}^{(m,\Delta l)})$, 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:

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

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

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

где T_M – температура окружающей среды звена i на участке k; γ – коэффициент теплопередачи, Вт/(м^{2}К); $\psi = \pi\Delta l d$ – поверхность контакта потока и внешней среды для труб круглого сечения, м^2.

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

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

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

$$\theta_i(M_i, T_{j_{i0}}) =$$
$$= \sum_{k=1}^{N}\left\{\begin{aligned}&H_i(\Delta lk) + [T_{i_{k-1}} - H_i(\Delta lk)]e^{\frac{-\Delta l\pi\gamma d}{M_i C_v}} + \\ &+ \frac{1}{M_i C_v}\left[1 - \Omega\left(\frac{q_{i_k}}{\psi}\right)\right]\Delta p_{i_k} q_{i_k}\end{aligned}\right\}. \quad (11)$$

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 термораспределения 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 термораспределения: температуры в активных узлах, в которых происходит приток (при данном потокораспределении) в гидросистему. На основании зависимостей (11) для каждого звена *i* возможно рассчитать распределение температуры во всей системе.

Для этого вводятся функции температуры τ_j $(T_1, T_2, ..., T_j, ..., T_m)$, определяющие на основании (11) всех звеньев, зависимость температуры в узле *j* от температуры во всех узлах.

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

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 система нелинейных алгебраических уравнений, решаемая методом простой итерации:

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

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

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

При пересчете комплексного потокораспределения – КПР во времени будем иметь динамику термогидравлического состояния ТГС в виде комплексных функции КПР(*t*), зависящих, как от внутренних свойств ТГС так и от состояния ГПП.

Отличием предлагаемой модели от известных аналогов является полноценный учет потоко- и теплораспределения в гидросистемах произвольного вида, т. е. структуры и характеристик элементов, описываемых в виде функций полных гидравлических характеристик. В известных моделях не учитывается двусторонняя взаимосвязь физических свойств жидкости с теплораспределением. Т. е. изменяемая температура потока по длине звеньев меняет плотность и вязкость среды и наоборот изменение вязкости и плотности изменяет характеристики теплопередачи и температуру. Также вследствие перехода части гидравлической энергии в тепловую происходит дополнительный нагрев среды, который в свою очередь ведет к изменению ее вязкости и плотности, что далее приводит к изменению режима течения и потерь давления на трение.

Математическое описание данной модели, позволяет сократить размерность основной системы уравнений в два раза, что позволяет решить ее с большей точностью, скоростью и надежностью сходимости численного метода.

В работе [2] детально отражена разработанная автором модель ГПП с учетом условий динамической взаимосвязи с рассмотренными здесь моделями ТГС.

Разработанные автором модели были реализованы в виде программного комплекса Hydra'Sym [4], который внедрен на ряде нефтегазодобывающих предприятий Западной Сибири.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Поступила 27.05.2010 г.