

С. И. Грачев, А. В. Стрекалов, А. Т. Хусаинов

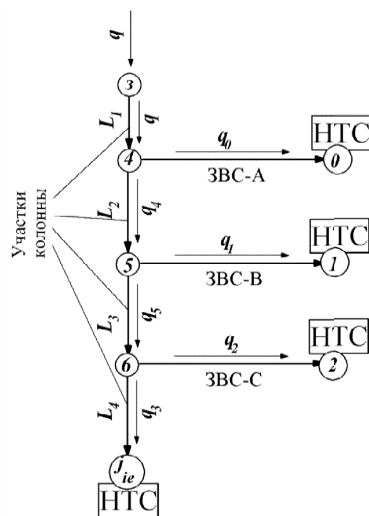
S. I. Grachev, A. V. Strekalov, A. T. Khusainov

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование; транспортная гидравлическая система (ТГС); фильтрация; трещины

Key words: hydrodynamic modeling; transport hydraulic system (THS); filtration; fractures

Расчет замыкающих отношений для скважин, вскрывающих более одного пласта, предлагается строить решением системы уравнений для распределения расходов и давлений (рис. 1).



Система (1) решается предложенным методом последовательных приближений с линеаризацией замыкающих отношений, входящих в схему звеньев, на каждом шаге. В результате полученная зависимость перепада давления между узлом забоя и любым узлом на контуре зоны воздействия скважины (ЗВС) от расхода жидкости, поступающей в узел (3).

$$\left\{ \begin{array}{l} q - q_0 - q_4 = 0 \\ q_4 - q_1 - q_5 = 0 \\ q_5 - q_2 - q_3 = 0 \\ -f_A(q_0) + f_4(q_4) + f_5(q_5) + f_3(q_3) = P_{n1}^A - p_{j_{18}} + \frac{Z_n^A + Z_{\kappa}^A}{2} - z_{j_{18}} \\ -f_B(q_1) + f_5(q_5) + f_3(q_3) = P_{n1}^B - p_{j_{18}} + \frac{Z_n^B + Z_{\kappa}^B}{2} - z_{j_{18}} \\ -f_C(q_2) + f_3(q_3) = P_{n1}^C - p_{j_{18}} + \frac{Z_n^C + Z_{\kappa}^C}{2} - z_{j_{18}} \end{array} \right. \quad (1)$$

**Рис. 1. Структурная схема
подсистемы скважины,
вскрывшей три пласта: А, В и С**

явлений практически произвольно, что снимает ограничения на дальнейшее развитие предлагаемой модели.

Предложенная в статье модель ГПП (рис. 2) относится к моделям конечно-разностных схем и элементов пластов при явном расчете пластовых давлений. Основным отличием предлагаемой модели от ранее известных является учет прямой взаимосвязи с ТГС и изменений пористости, проницаемости и формирования трещин от давления.

Так как данные модели входят в общую систему уравнений — модели гидросистемы, при желании их вид может быть изменен с целью описания новых

о, что снимает ограничения на дальнейшее развитие

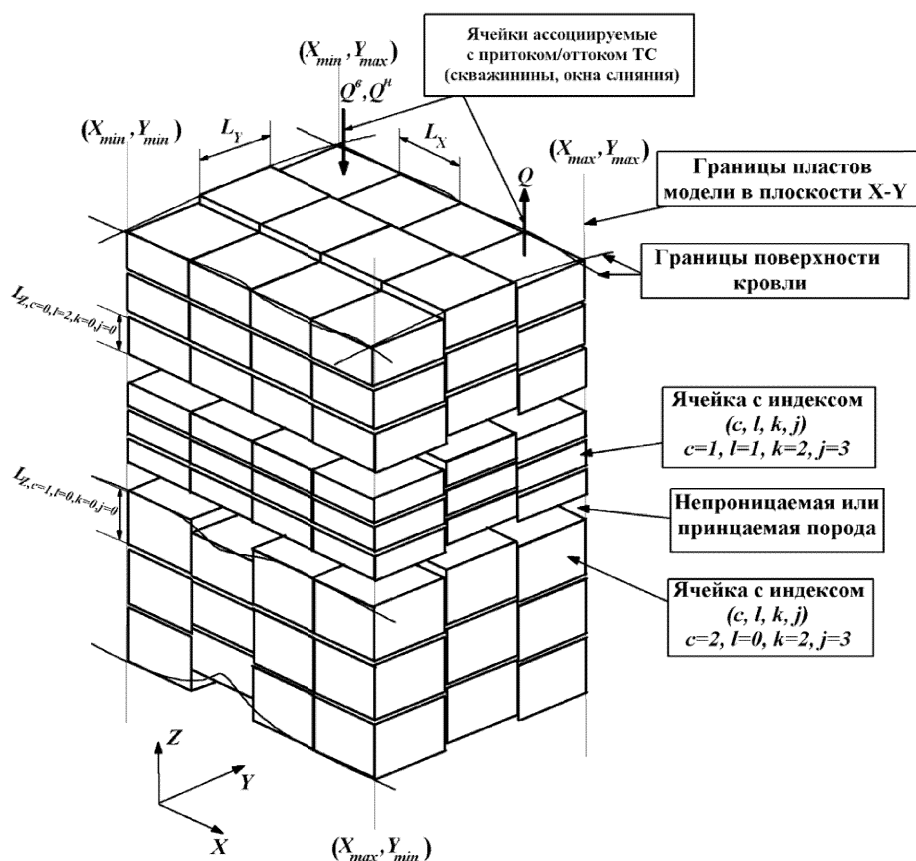


Рис. 2. Пример схемы предлагаемой модели ГПП, состоящей из трех пластов, разбитых по вертикали на 4 слоя, по оси X на 4 ячейки, по оси Y на 3 ячейки

На многих месторождениях Западной Сибири системы ППД вводятся в эксплуатацию с большим (до 10 лет) опозданием, вследствие чего для компенсации падения давления и отбора жидкости приходится нагнетать воду под большим давлением нагнетания (38–57 МПа), которое создает условия для спонтанного гидроразрыва. Вследствие высоких давлений в элементах пласта, входящих в зоны воздействия нагнетательных скважин, формируются существенные градиенты давлений, предполагающие нагрузку на породы, слагающие пласт в данных зонах. В связи с этим, макроэлементы пласта разрушаются именно из-за высоких перепадов давления между условными поверхностями, геологически отделяющими отдельные части пласта (прожилки иных пород, тектонические нарушения, барьеры давления и т. п.). Дополнительным фактором формирования трещин в зонах нагнетания также является запоздалый запуск закачки, вследствие чего пластовое давление может быть сильно снижено, что обуславливает тенденцию в направлении трещин от нагнетательных скважин к добывающим [1].

Учитывая хотя и конечные, но малые размеры ячеек, при моделировании трещинообразования будем полагать, что все трещины ячейки будут иметь прямоугольную форму. Возможен обратный процесс: смыкание трещины при условии, когда давление внутри трещины будет меньше давления в окружающей породе, то есть давление в центре ячейки меньше давлений на гранях по оси перпендикулярной плоскости трещины [2].

Согласно принятым допущениям: 1 — возможно формирование только вертикальных трещин в направлении двух перпендикулярных плоскостей — XZ, YZ; 2 — трещины могут формироваться от центра ячейки к одной из ее граней (полутрещины), при выполнении условия для ее формирования вдоль оси S ($S = X$ или $S = Y$)

$$gp_i^{(S-e)} = 2 \frac{|p_i - p_{S-e}|}{L_S} > gp_e^{(S)} \quad (2)$$

и противоположном направлении

$$gp_i^{(S-b)} = 2 \frac{|p_i - p_{S-b}|}{L_S} > gp_e^{(S)}, \quad (3)$$

где $gp_i^{(S-e)}, gp_i^{(S-b)}$ — текущие модули градиентов давления между давлением центра ячейки i и давлениями на ее гранях (e — вдоль оси, b — против оси), находящихся по направлению и против оси S , $gp_e^{(S)} \approx 2 \frac{|\Delta p_e|}{L_S}$ — предельный градиент разрыва (L_S — линейный размер ячейки по оси S).

Величина $gp_e^{(S)}$ будет зависеть как от прочностных свойств породы, так и от напряжений сформированных литологическими условиями. Далее употребляя gp_e , будем полагать градиент разрыва относящийся к соответствующему направлению. Будем считать gp_e известным для всех направлений и ячеек модели ГПП [3].

В зависимости от текущих давлений на гранях ячейки $p_{Xe}, p_{Xb}, p_{Ye}, p_{Yb}$ и выполнения условий (2–3), в ячейке могут быть образованы трещины в нескольких комбинациях (рис. 3), то есть совместные трещины.

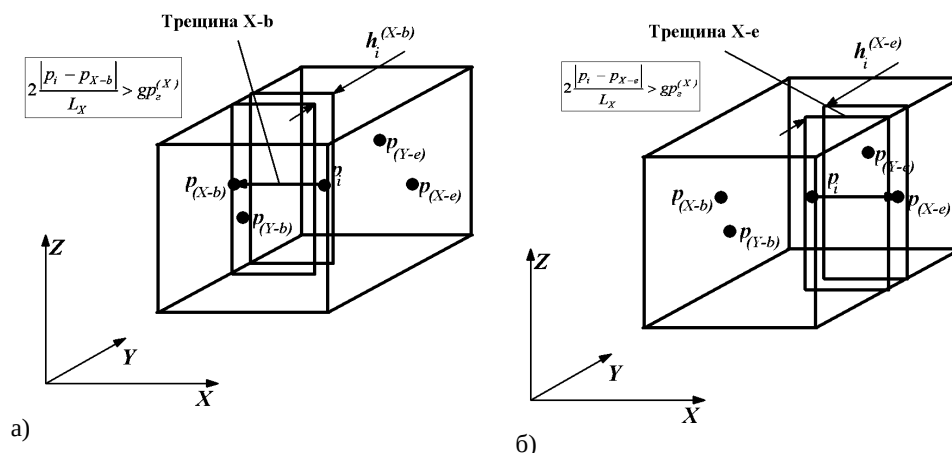


Рис. 3. Возможные вариации образования полутрещин в ячейке:

а — полутрещина от центра до грани b вдоль оси X ;

б — полутрещина от центра до грани e вдоль оси X

При моделировании трещин возможно использования условий (2–3) в двух вариантах: 1 — разрыв происходит во всех направлениях, где выполняются данные условия; 2 — разрыв происходит в направлении максимального из всех градиентов давления, соответствующих данным условиям (рис. 4–5).

Раскрытость трещины будем описывать толщиной в зависимости от текущего перепада давления — Δp_{S_1} согласно некоторой функции $H(\Delta p_{S_1}, A_1, D, A_0)$, где D — коэффициент раскрытия трещины, зависящий от характера деформации ячейки и размеров ячейки, $1/\text{Па}$; A_0 — минимальная толщина трещины при смыкании, образующаяся вследствие остаточной деформации, м; A_1 — коэффициент раскрытия трещины, зависящий от упругости породы ячейки, м/д.е.; Δp_{S_1} — перепад давления между давлением в центре ячейки и средним давлением на гранях, противоположных по оси S_1 : $\Delta p_{S_1} = p_i - \frac{p_{S_1-e} + p_{S_1-b}}{2}$, причем $S_1 \perp S$ (то есть S_1 перпендикулярна направлению трещины).

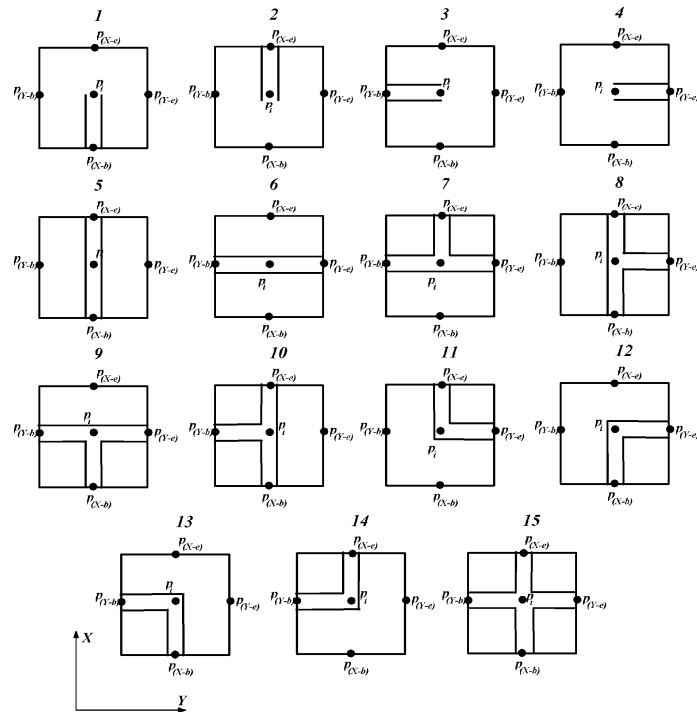


Рис. 4. Возможные комбинации полутрещин в ячейке при совместном выполнении условий (2–3)

В качестве функции $H(\Delta p_{S_i}, A, D, A_0)$ можно использовать зависимость для каждого пласта, входящего в модель:

$$\text{при } \Delta p_{S_i} > 0 \quad h_{S-U} = H(\Delta p_{S_i}, A, D, A_0) = A_1 \ln(\Delta p_{S_i} \cdot D + 1) + A_0,$$

$$\text{а при } \Delta p_{S_i} < 0 \quad h_{S-U} = H(\Delta p_{S_i}, A, D, A_0) = A_0 \text{ (смыкание)}.$$

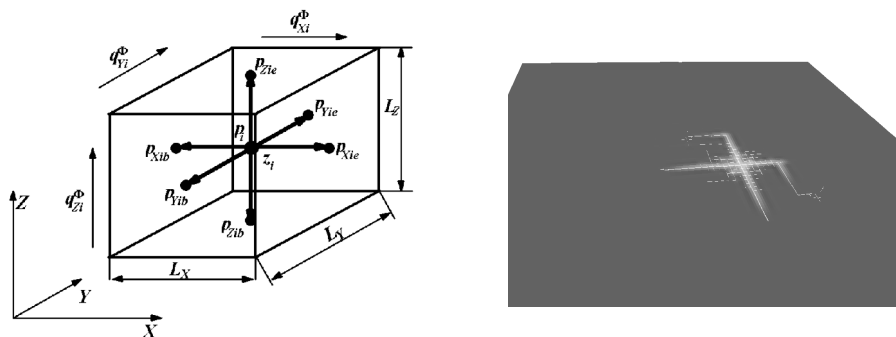


Рис. 5. Схема модели элемента пласта

Вследствие возникновения в ячейке трещин в различных направлениях, сопротивление фильтрации каждого компонента — Φ также изменится. То есть при возникновении в ячейке i трещины толщиной h_{S-U} в направлении оси S к грани U , сопротивление фильтрации компонента Φ через ячейку от центра до этой грани изменится в соответствии с параллельным соединением проводников — поровой части, согласно и сопротивлению трещины [4]. Причем, для нахождения сопротивления трещины следует учитывать направление рассматриваемой фильтрации, так как в зависимости от на-

правления (например, от центра влево или вправо, вверх или вниз), сопротивление трещины будет рассчитываться по-разному.

Например, для притока/оттока из центра ячейки к грани b по оси X

$$R_{i_{mp}}^{(X-b, \Phi)} = \mu_{\Phi}(p_i) \frac{1}{2} \frac{L_X}{\bar{k}_{\Phi i} \cdot k_{mp} h_{iX-b} L_Z}, \quad (4)$$

где k_{mp} — абсолютная проницаемость трещины.

Проницаемость трещин будем считать одинаковой во всех направлениях. При наличии таких вертикальных трещин также изменится сопротивление фильтрации по оси Z , при этом сопротивление трещины будет складываться исходя из параллельного течения во всех (максимум четыре) полутрещинах по вертикали

$$\frac{1}{R_{i_{mp}}^{(Z, \Phi)}} = \frac{1}{R_{i_{mp}}^{(Z, X-b, \Phi)}} + \frac{1}{R_{i_{mp}}^{(Z, X-e, \Phi)}} + \frac{1}{R_{i_{mp}}^{(Z, Y-b, \Phi)}} + \frac{1}{R_{i_{mp}}^{(Z, Y-e, \Phi)}}, \quad (5)$$

где

$$R_{i_{mp}}^{(Z, X-b, \Phi)} = \mu_{\Phi}(p_i) \frac{1}{2} \frac{L_Z}{\bar{k}_{\Phi i} \cdot k_{mp} h_{iX-b} L_Y / 2} \quad \text{и т. п.}$$

Получив сопротивления трещин по направлениям, для нахождения общего сопротивления фильтрации в ячейке i , согласно параллельному соединению, получим сопротивление для каждого направления

$$R_i^{(S-U, \Phi)} = \frac{R_{i_{mp}}^{(S-U, \Phi)} \cdot \frac{1}{2} R_i^{(S, \Phi)}}{R_{i_{mp}}^{(S-U, \Phi)} + \frac{1}{2} R_i^{(S, \Phi)}}, \quad (6)$$

где $R_i^{(S, \Phi)}$ — сопротивление фильтрации в поровой части ячейки, полученные согласно

$$R_i^{(S, \Phi)} = \mu_{\Phi i} \frac{L_{Si}}{\bar{k}_{\Phi i} \cdot k_i^{(S)} F_{Si}}, \quad (7)$$

где $\bar{k}_{\Phi i}$ — относительная проницаемость компонента Φ ; $\mu_{\Phi i}$ — динамическая вязкость компонента Φ в ячейке i ; $k_i^{(S)}$ — абсолютная проницаемость породы ячейки i вдоль оси S ; L_{Si} — длина ячейки i вдоль оси S ; F_{Si} — площадь сечения ячейки i перпендикулярно оси S .

Для моделирования процессов трещинообразования необходимо проведение экспериментов на образцах керна для получения более точных зависимостей.

Список литературы

1. Меренков А. П., Хасилев В. Я. «Теория гидравлических цепей». — Н., 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 (HydraSym). — М. 2002.

Сведения об авторах

Грачев Сергей Иванович, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», Тюменский промышленный университет, тел. 8(3452)283027, e-mail: grachevsi@mail.ru

Стрекалов Александр Владимирович, д. т. н., профессор, Тюменский промышленный университет, тел. 89220040077, e-mail: HYdRASYM@mail.ru

Хусаинов Артем Тахирович, к. т. н., доцент, Тюменский промышленный университет, тел. 89220070151, e-mail: iQ-tyumen@mail.ru

Information about the authors

Grachev S. I., Doctor of Engineering, professor, head of the Department of «Development and operation of oil and gas fields», Industrial University of Tyumen, tel. 8(3452)283027, e-mail: grachevsi@mail.ru

Strekalov A. V., Doctor of Engineering, professor, Industrial University of Tyumen, tel. 89220040077, e-mail: HYdRASYM@mail.ru

Husainov A. T., Candidate of Engineering Sciences, associate professor, Industrial University of Tyumen, tel. 89220070151, e-mail: iQ-tyumen@mail.ru