

ОБРАТНЫЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ГИДРОГЕОЛОГИИ (НА ПРИМЕРЕ ПАУЖЕТСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

А.В. Кирюхин¹, Н.П. Асаулова², Л.А. Ворожейкина², Н.В. Обора², Т.В. Рычкова¹

¹-Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Пийпа-9, П-Камчатский, Россия,
683006 avk2@kcs.iks.ru

²- ГУП «Камчатскбургеотермия», Крашенинникова -1, п. Термальный, Камчатская
обл., 684035

Формулы, широко применяющиеся в гидрогеологических расчетах водозаборов, основаны на фундаментальных законах и решениях стационарной (закон Дарси, формула Дюпюи) и нестационарной плано-радиальной фильтрации (формулы Джейкоба-Тейса), полученных при постоянном расходе водоотбора. При этом параметрами модели являются водопроницаемость (проницаемость) и пьезопроводность (сжимаемость), в то время как измеряемыми данными служат уровни (напоры, давления). Принцип суперпозиции позволяет успешно применять фундаментальное решение для расчета систем вертикальных скважин и водозаборов (Б.В. Боровский, Б.Г. Самсонов, Л.С. Язвин, 1973).

Ситуация усложняется при анализе эксплуатации геотермальных месторождений. Процессы тепломассопереноса характеризуются изменением не только давления флюида, но также изменением температуры и фазового состояния флюида. Поэтому в качестве измеряемых данных используются давление и температура в наблюдательных скважинах, энтальпия в эксплуатационных скважинах. Параметрами модели являются: проницаемость, сжимаемость, параметры двойной пористости (размер блоков, доля трещинного пространства) и параметры притока глубинного теплоносителя (расход и энтальпия). Причем это минимальный список параметров модели, при условии что остальные определены независимым способом (лабораторные эксперименты) или вытекают из свойств концептуальной модели исследуемого объекта. Кроме того, фильтрация во многих случаях имеет не плановый (двухмерный), а трехмерный характер.

Даже для минимального набора модельных параметров не существует фундаментального аналитического решения (аналогичного формулам Джейкоба-Тейса), которое можно использовать для их оценки. В ряде случаев чувствительность параметров модели к температурным данным выше, чем к данным по давлениям. Это часто приводит к

приоритету тепловой задачи по отношению к гидродинамической при оценке естественного и нарушенного состояния, и прогнозе эксплуатации. Принцип суперпозиции температурных и гидродинамических полей не выполняется.

В связи с вышесказанным в настоящее время единственным эффективным методом анализа процессов тепломассопереноса при эксплуатации геотермальных месторождений, позволяющим разрабатывать адекватные концептуальным представлениям численные модели и надежно оценивать их параметры – является численное моделирование, в частности специально разработанное для этих целей семейство вычислительных программ TOUGH2 (прямые задачи), iTOUGH2 (обратные задачи), TOUGHREACT (термогидродинамические –химические модели).

Прогноз процессов тепломассопереноса условий формирования и эксплуатации геотермальных месторождений на основе численного моделирования включает следующие основные этапы:

- (1) Разработку концептуальной (природной гидрогеологической) модели геотермального месторождения.
- (2) Разработку численной модели геотермального месторождения.
- (3) Задание исходных значений параметров численной модели, решение обратных задач.
- (4) Прогноз условий формирования и эксплуатации геотермального месторождения на основе прогона вычислительной программы.
- (5) Интерпретация результатов и оценка надежности прогноза.

Паужетская ГеоТЭС с установленной электрической мощностью 5 МВт начала эксплуатироваться с 1966 г. Исследования резервуара (В.М. Сугробов 1965, 1970) показали, что это геотермальное «вододоминирующее» месторождение пластового типа с температурой 170-190°C и видимой естественной разгрузкой горячих источников 31 кг/с. Общая гидрогеологическая концепция по данным опытной эксплуатации 1962-63 гг заключалась в том, что при суммарном отборе термальной воды с расходом 120-125 л/с достигается установившийся режим подземных вод, при этом по температуре и химизму гидротерм не происходит существенных изменений, хотя давление в резервуаре и естественная разгрузка гидротерм несколько снижаются (на 22%) (В.М. Сугробов, 1965, 1970). Эта концепция базировалась на представлениях о наличии в резервуаре естественного

потока глубинного теплоносителя, поступающего из осевой части Камбального хребта и превышающего по расходу отбор термальных вод. Расход потока глубинного теплоносителя оценивался по формуле Дарси величиной 460 кг/с, при этом в качестве величины водопроницаемости использованы результаты обработки восстановления уровня после ОЭВ 1962-63 гг.

Тем не менее, первые 10 лет эксплуатации с расходом 160-190 кг/с показали постепенное снижение температуры, снижение концентрации хлор-иона в эксплуатационных скважинах, расположенных вблизи области естественной разгрузки гидротерм, поэтому были пробурены новые разведочно-эксплуатационные скважины, и эксплуатация постепенно смещалась от зоны естественной разгрузки в область 200-220°C температур. Продуктивные скважины были пробурены в зоне восходящего потока глубинного теплоносителя в 1.5-2.0 км к юго-востоку от «старого» продуктивного поля (В.А. Ямпольский, 1976). При общем расходе отбора теплоносителя 220-260 кг/с в период с 1975 по 2005 гг температуры и энтальпии продолжали падать, естественная разгрузка в виде горячих источников исчезла. Прямое TOUGH2-моделирование (А.В. Kiryukhin, V.A. Yampolsky, 2004) привело к следующим оценкам основных параметров: (1) Расход восходящего потока теплоносителя 220 кг/с при энтальпии 830-920 кДж/кг, (2) Проницаемость резервуара в центральной его части - 70 Дарси*м, сжимаемость $5.0 \cdot 10^{-7} \text{ Па}^{-1}$, (3) Параметры «двойной пористости» - размер блоков 162 м, доля трещинного пространства 0.1-0.2.

Переоценка эксплуатационных запасов Паужетского геотермального месторождения стала актуальной в связи с реконструкцией ГеоЭС, что потребовало более детальной калибровки и уточнения численной модели. Для оценки параметров модели использована вычислительная программа iTOUGH2. Вычислительная сетка модели включает 424 элемента (294 активных)) и представляет трехслойную систему (верхний водоупор, резервуар – термоводоносный комплекс мощностью 500 м, и фундамент), на модели задан приток глубинного теплоносителя и область разгрузки гидротерм (рис. 1).

Для iTOUGH2- моделирования естественного состояния использовано 90 калибровочных точек (1 к.т. - расход естественной разгрузки, 29 к.т. - давления в резервуаре на абс. отм. -250 м, 60 к.т. - температуры, усредненные по мощности резервуара). Различная достоверность калибровочных точек учтена с помощью задания индивидуальных стандартных отклонений. Предварительная оценка основных параметров модели: (1)

проводимость резервуара 30 Дарси*м (2) расход восходящего потока глубинного теплоносителя – 75 кг/с при энтальпии 900-945 кДж/кг.

В настоящее время проводится анализ эксплуатации с использованием iTOUGH2-моделирования. Основные оцениваемые параметры модели включают: (1) проводимость резервуара, (2) сжимаемость резервуара, (3) параметры «двойной пористости» резервуара. После калибровки модели, она будет использована для оценки условий устойчивой эксплуатации Паужетского геотермального месторождения и обоснования эксплуатационных запасов.

Литература:

1. Б.В. Боровский, Б.Г. Самсонов, Л.С. Язвин. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. Недра, Москва, 1973, 304 с.
2. Кирюхин А.В., Сугробов В.М. Модели теплопереноса в гидротермальных системах Камчатки // Москва, Наука, 1987, 149 с
3. Паужетские горячие воды на Камчатке // отв. Ред. Б.И. Пийп, М. Наука, 1965, 207с.
4. S.Finsterle. iTOUGH2 User's Guide \ LBNL-40040, 1999, 130 p.
5. A.V. Kiryukhin, V.A. Yampolsky Modeling Study of the Pauzhetsky Geothermal Field, Kamchatka, Russia // Geothermics, v.33, 2004, No.4, 421-442 p.
6. K.Pruess. TOUGH2 – a general purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow \ LBL-29400, 1991, 102 p
7. V.M. Sugrobov Evaluation of operational reserves of high-temperature waters // Geothermics, Special Issue 1970, #2, p.1256-1260.

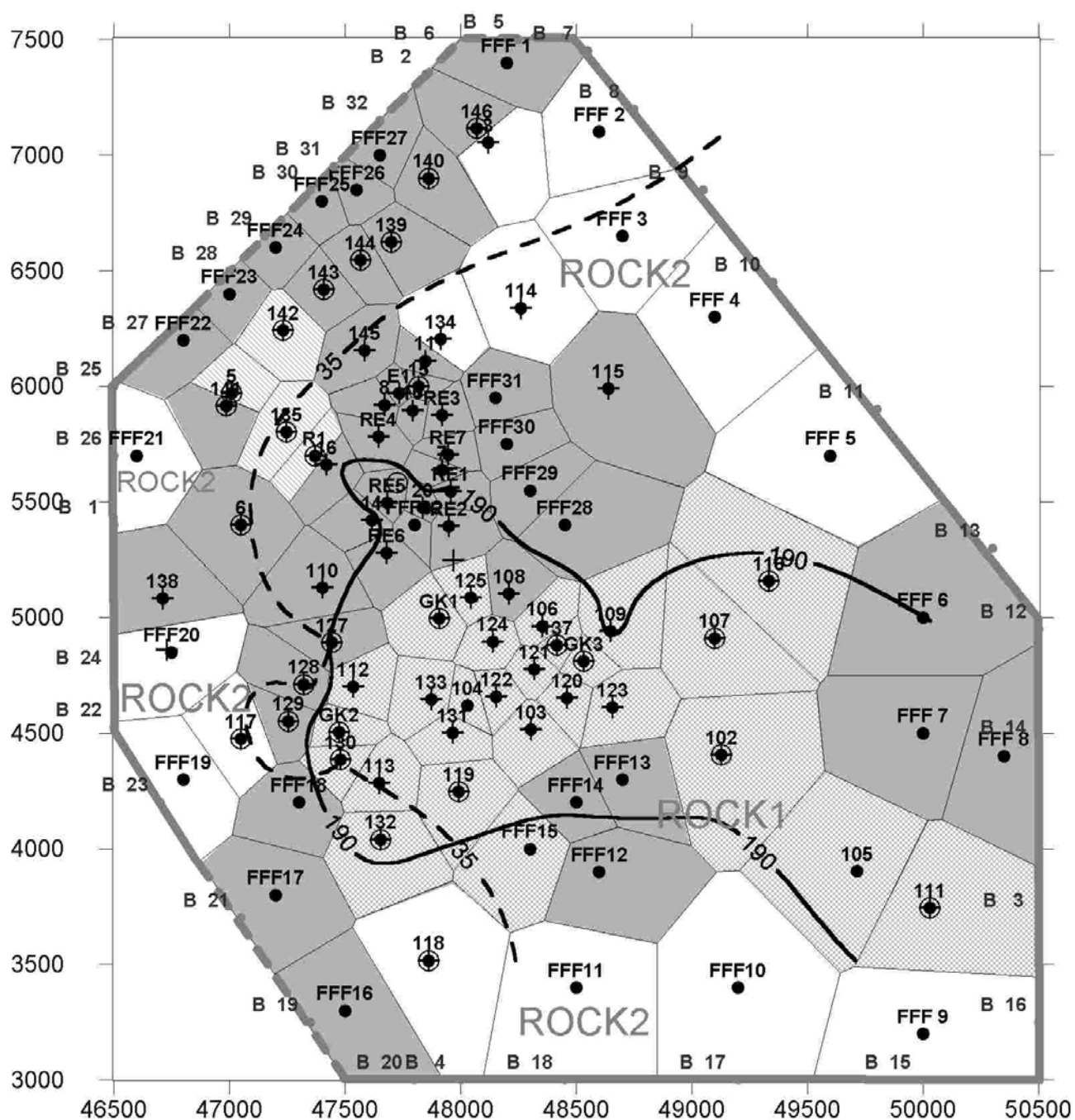


Рис. 1 Разбиение среднего слоя модели (-250 м абс) на элементы. Элементы модели показаны кружками с соответствующими названиями, жирной сплошной линией показаны непроницаемые границы, заданные на модели, прерывистой линией – границы с заданным давлением. ROCK1 и ROCK2 - домены с различными петрофизическими свойствами. Изотерма 190°C и изобара 36 бар (построены по данным измерений) показаны сплошной и прерывистой линиями соответственно. Калибровочные точки с заданными температурами показаны крестиками, с заданными давлениями – незакрашенными кружками. «Гидравлическое окно» через которое осуществляется естественная разгрузка – изображено косой штриховкой. Область восходящего потока глубинного теплоносителя – изображена перекрестной штриховкой.