УДК 551

А.В. КИРЮХИН
Камчатский государственный педагогический университет,
г.Петропавловск-Камчатский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ

Данные по геохимии флюидов и вторичной минерализации 14 геотермальных месторождений Камчатки (Россия) и Японии использованы для калибровки численных моделей связанных термогидродинамических и химических процессов (thermo-hydrodynamic-chemical – THC-процессы). Исследованы условия восходящей фильтрации теплоносителя для следующих случаев: однофазной фильтрации с исходной температурой 260 °С, двухфазной фильтрации (300 °С), условий «тепловой трубки» (260 °С).

Показано, что в однофазном потоке в качестве основных вторичных минералов в продуктивной зоне образуются вайракит, кварц, K-полевой шпат и хлорит. В двухфазном потоке в качестве основных вторичных минералов образуются кварц, K-полевой шпат, вайракит и кальцит. В «тепловой трубке» существенного образования вторичных минералов не происходит. Образование вторичных минералов может привести к существенному снижению пористости в течение первых сотен лет и полному «запечатыванию» резервуара.

Data on fluid chemistry and rock mineralogy are evaluated for a number of geothermal fields located in the volcanic arc of Japan and Kamchatka, Russia. Common chemical characteristics are identified and used to define scenarios for detailed numerical modeling of coupled thermo-hydrodynamic-chemical (THC) processes. The following scenarios of parental geothermal fluid upflow were studied: single phase conditions, 260 °C at the bottom, two-phase conditions 300 °C at the bottom, heat pipe conditions, 260 °C at the bottom.

THC modeling for single phase upflow scenario shows wairakite, quartz, K-feldspar and chlorite formed as the principal secondary minerals in the production zone. THC modeling of the two-phase upflow shows quartz, K-feldspar (microcline), wairakite and calcite precipitate in the model as a principal secondary minerals in the production zone. THC modeling of heat pipe conditions shows no significant secondary deposition of minerals. Secondary minerals precipitation may result in a significant porosity reduction over a hundred year time scale under mass flux conditions, and complete fracture sealing will occur given sufficient time under either single phase and two-phase upflow scenarios.

Традиционный анализ геохимической эволюции гидротермальных процессов проводится отдельно для процесса транспорта тепловой энергии и химических компонентов (TOUGH2V2.0) и для процесса химического взаимодействия в системе вода – порода (CHILLER и EQ3/6, соответственно Reed, 1982 и Wolery, 1992). Однако в трещиноватых горных породах, слагающих геотермальные месторождения, происходит сложный процесс взаимодействия между химическими реакциями и многофазными потоками флюида и тепловой энергии. В последнее время усиливается интерес к достаточно полному описанию таких сопряженных термогидродинамических и геохимических процессов (Steefel and Lasaga, 1994; White, 1995; Xu and Pruess, 2001).

В статье используется вычислительный код TOUGHREACT (Xu and Pruess, 1998 and 2001) для моделирования взаимодействия восходящего потока геотермального теплоносителя с исходными минералами вмещающих горных пород. В данном случае моделирование используется для того, чтобы понять, насколько исчерпывающей явля-

ется модель для описания наблюдаемых данных по распределению вторичных гидротермальных минералов в продуктивных зонах в широком диапазоне температур на хорошо изученных геотермальных месторождениях Камчатки и Японии. Такие геотермальные месторождения представляют собой удачный объект для тестирования моделей связанных термогидродинамических-химических (THC) процессов.

Основные вторичные гидротермальные минералы, образующиеся при восходящей фильтрации теплоносителя в высокотемпературных гидротермальных резервуарах включают кварц, вайракит, K-полевой шпат, хлорит, эпидот, кальцит и ангидрит. Наиболее типичные условия формирования восходящих потоков теплоносителя, наблюдаемые при разбуривании геотермальных месторождений, следующие:

- однофазный восходящий поток с температурой до 260 °C в основании. Примерами таких геотермальных месторождений являются Огири, Такигами, Огуни (Япония), Паужетское (Камчатка, Россия), а также неглубокозалегающие резервуары на месторождениях Нигорикава и Какконда (Япония);
- двухфазный восходящий поток с температурой до 300 °C (месторождения Хачубару, Сумикава, Уенотай, Фушиме, Окуайзу, Хачиджо-Джима в Японии и Мутновское в России);
- «тепловые трубки» с температурой до 260 °C в основании (Мацукава, Япония).

Указанные условия восходящей фильтрации потоков теплоносителя достаточно наглядно фиксируются характерной формой графиков зависимости давления, температуры и паронасыщения от глубины на упомянутых геотермальных месторождениях.

Для исследования условий вторичного минералообразования выполненно моделирование вдоль восходящего потока теплоносителя. Моделирование химического взаимодействия теплоносителя с вмещающими горными породами осуществлено с использованием кода TOUGHREACT (Xu and Pruess, 1998 and 2001), дополняющего код TOUGH2 (Pruess, 1991). В рамках кода TOUGHREACT учитывается диффузионный и конвективный транспорт растворенных химических компонентов, при этом предполагается локальное химическое равновесие в жидкой фазе. Растворение исходных минералов и образование новых минералов рассчитывается с учетом кинетики минералообразования с использованием следующего расходного закона.

$$r = kS(1 - Q/K)\exp[E_a/(R \cdot 298{,}15) - E_a/(RT)],$$

где k – кинетическая константа скорости химического растворения (осаждения) при 25 °C, моль/(с·м^2); S – удельная поверхность химического взаимодействия, м^2/м^3; Q – произведение активности; K – константа равновесия для рассматриваемой системы вода – порода; E_a – энергия активации, кДж/кмоль; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·K); T – температура, K. При расчетах химических реакций учитывается зависимость соответствующих констант от температуры.

Начальный минералогический состав резервуара предполагался соответствующим пироксеновому андезиту: анортит (Ca-полевой шпат) 45 %, альбит-high (Na-полевой шпат) 26 %, санидин (K-полевой шпат) 11 %, диопсид 16 %, кварц 2 %. Общая пористость задана равной 0,1. При моделировании задавался «родительский геотермальный флюид» с химическим составом, соответствующим конкретным геотермальным месторождениям. Список вторичных гидротермальных минералов, рассматриваемых на модели (совместно с исходными), включал кальцит, ангидрит, low-альбит, вайракит, ломонтит, морденит, Na-, Ca- и Mg-смектиты, хлорит, иллит, аморфный кремнезем, кристобалит, опал, каолинит и пренит.

THC-моделирование восходящего однофазного потока с базовой температурой 260 °C показывает формирование вайракита, кварца, K-полевого шпата и хлорита в качестве основных вторичных минералов в продуктивной зоне и иллит-смектитовой ассоциации при температуре ниже 230 °C (что согласуется с наблюдениями на геотермальном месторождении Огири).

THC-моделирование двухфазного восходящего потока с базовой температурой 300 °C прогнозирует формирование кварца, K-полевого шпата (микроклина), вайракита, хлорита и кальцита в качестве основных вторичных минералов в продуктивной зоне. Эти результаты согласуются с наблюдениями на геотермальных месторождениях Хачубару, Сумикава, Уенотай (Япония) и Мутновское (Камчатка, Россия).

THC-моделирование условий «тепловой трубки», представленных на геотермальном месторождении Мацукава (Япония) демонстрирует отсутствие существенного образования вторичных минералов (кварца, K-полевого шпата, цеолитов) в продуктивной зоне с двухфазными изотермическими условиями, что также соответствует фактическим данным.

Таким образом, THC-моделирование процессов формирования геотермальных месторождений указывает на существенное влияние термодинамических и кинетических параметров химического взаимодействия, массовой скорости восходящего потока теплоносителя на скорость формирования вторичных минералов вдоль направления восходящего потока высокотемпературного теплоносителя (как в однофазном, так и в двухфазном состоянии). Формирование вторичного кварца и K-полевого шпата может привести к существенному понижению пористости за первые сотни лет и полному запечатыванию проницаемых трещин при массовой скорости восходящего потока теплоносителя более 25 кг/(с·км^2).

Результаты исследований планируются к внедрению для обоснования оптимального режима закачки отработанного теплоносителя на геотермальных месторождениях Камчатки (Мутновское, Паужетское) и при закачке жидких промышленных и радиоактивных отходов (г.Томск).