
УДК 550.8.072

PETRASIM - МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО СОСТОЯНИЯ МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Мирошник О.О. (4 курс)

*Камчатский Государственный Университет им. В. Беринга
Научный руководитель: д. г.-м.н. Кирюхин А. В.*

Численное термогидродинамическое моделирование естественного состояния Мутновского геотермального месторождения осуществляется с использованием программы TOUGH2 (National Lawrence Berkeley Laboratory, США). В настоящее время возможности подготовки исходных данных для моделирования и анализа полученных результатов существенно возросли благодаря разработке пре-постпроцессора PetraSim, включающего выполняемый модуль программы TOUGH2. В данной работе PetraSim используется для воспроизведения ранее полученных результатов по Мутновскому геотермальному месторождению, (Kiryukhin, 1996, Кирюхин, 2002).

Ключевые слова: PetraSim, моделирование, естественное состояние, Мутновское геотермальное месторождение, Камчатка.

Введение

Численная термогидродинамическая TOUGH2-модель [1] использована для технико-экономического обоснования строительства Мутновских ГеоЭС. С 1999 г осуществляется эксплуатация Верхне-Мутновского участка Мутновского геотермального месторождения, где установлена ГеоЭС мощностью 12 МВт. С 2002 г началась эксплуатация Мутновской ГеоЭС на участке Дачный с установленной мощностью 50 МВт. Таким образом, появились данные по многолетней эксплуатации Мутновского месторождения, которые можно использовать для калибровки и уточнения модели [1]. Использование последней версии (2008) пре-постпроцессора PetraSim, разработанной компанией ThunderHead Engineering, включающей выполняемый модуль программы TOUGH2, позволяет ускорить процесс сборки модели и анализа полученных результатов. В данной статье осуществляется сборка модели естественного термогидродинамического состояния [1,2] с использованием пре-постпроцессора PetraSim с соответствующими исходными данными и демонстрация возможностей представления полученных результатов.

Цифровая геологическая модель Мутновского геотермального месторождения

Мутновское геотермальное месторождение входит в состав Мутновского геотермального района, площадью около 750 км². Формирование геотермального резервуара связано с Северо-Мутновской вулканотектонической зоной, к которой приурочены самые молодые кислые магматические очаги, являющиеся наиболее вероятным источником теплового питания гидротерм. В 80-е годы и позднее моделируемый участок Дачный Мутновского геотермального месторождения был детально изучен комплексными исследованиями, включавшими маршрутное геокартирование с описанием обнажений, буровые работы, термометрию и другие методы. С 1979 года было пройдено 82 скважины глубиной от 255 до 2266 м. Геологический разрез сложен вулканогенными и вулканогенно-осадочными неоген-четвертичными образованиями – лавами, туфами, конгломератами, песчаниками, алевролитами суммарной мощностью более 2 км.

При создании цифровой геологической модели использовалась следующая стратификация [1]: 1 – четвертичные игнибриты, туфы и лавы; 2 – плиоценовые лавы, 3 – плиоценовые риолитовые туфы; 4 – миоценовые туфы и лавы; 5 – миоценовые песчаники; 6 – миоценовая интрузивная контактная зона; 7 – миоценовая диоритовая интрузия.

Этапы PetraSim - моделирования

PetraSim - моделирование естественного термогидродинамического состояния Мутновского геотермального месторождения включало следующие этапы: генерацию вычислительной сетки, зонирование модели на домены и определение материальных свойств доменов, определение начальных и граничных условий, прогон модели на ЭВМ, калибровку модели по данным измерений температуры и давления и тепловой мощности термальных полей, анализ результатов моделирования.

Генерация вычислительной сетки осуществляется автоматически с 3D визуализацией. Использовалась трехмерная регулярная прямоугольная сетка. Значения вводимых координат приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения координат, в метрах

| | | |
|---|-------|-------|
| X | 44000 | 49000 |
| Y | 21000 | 26000 |
| Z | 1000 | -1500 |

Первоначально модель была разделена на 5 горизонтальных слоев, мощностью 500 м. Средняя высота верхнего слоя +750 м над уровнем моря. Каждый слой состоял из 100 кубических элементов, объемом $500 \times 500 \times 500$ м³. Но после того, как выяснилось, что внутри программы PetraSim невозможна корректировка связей между элементами (что было необходимо для задания Дачных и Верхне-Мутновских термальных полей на отметках +650 и +550 м абс) – верхний слой пришлось разделить на 5 слоев с мощностью по 100 м (рис. 1). Таким образом, всего в модели использовано 9 слоев. Заметим также, что нумерация элементов в программе PetraSim отличается от нумерации элементов, использованной в работах [2,3], где применялся генератор вычислительных сеток MeshMaker.

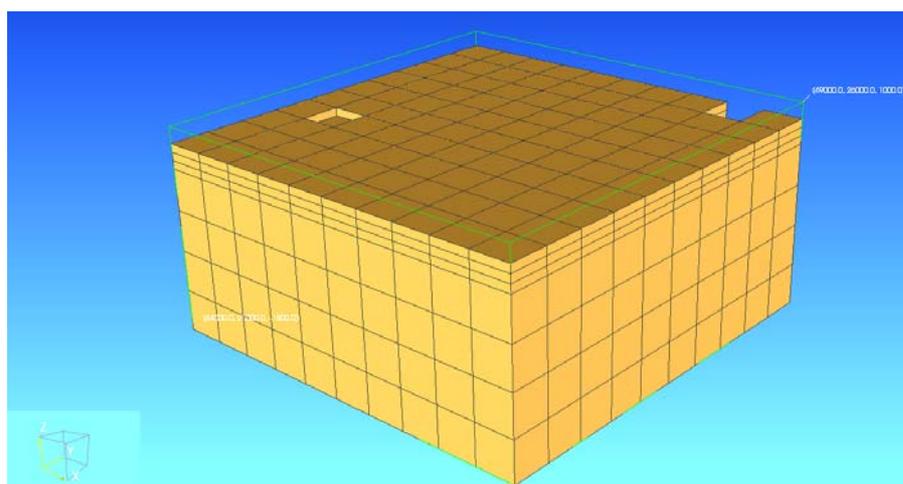


Рис.1. Вычислительная сетка для PetraSim-модели участка Дачный Мутновского геотермального месторождения

Программа PetraSim позволяет в интерактивном режиме в каждом элементе модели определить индивидуальные петрофизические свойства,

такие как плотность, пористость, проницаемость и теплопроводность. Для моделирования использовались петрофизические характеристики, которые соответствуют основным литологическим комплексам разреза (см. рис. 2 и рис. 4.4 из [3]), установленным для резервуара участка Дачный (табл. 2).

Таблица 2. Петрофизические характеристики основных литологических комплексов разреза для резервуара участка Дачный Мутновского геотермального месторождения, использованные при сборке модели.

| Литологический комплекс | Плотность горных пород, кг/м ³ | Пористость | Теплопроводность, Вт/(м °С) | Теплоемкость, Дж/кг °С |
|---|---|------------|-----------------------------|------------------------|
| Четвертичные игнимбриты, плиоценовые лавы и риолитовые туфы | 2100 | 0,2 | 2,05 | 1000 |
| Миоценовые песчаники | 2300 | 0,08 | 2,1 | 1000 |
| Интрузивная контактная порода | 2400 | 0,03 | 2,1 | 1000 |
| Диориты | 2700 | 0,02 | 2,1 | 1000 |

Данные по проницаемости получены по данным обработки закачек холодной воды в скважины. Проницаемость установлена для горизонтальных слоев (-1500, -1000); (-1000, -500); (-500, 0); (0, +500) м над уровнем моря, что соответствует слоям 1-4 с сеточной модели. Для верхних слоев 5-7, за исключением зон естественной разгрузки, установлено низкое значение проницаемости, слои 8-9 удалены из модели. Предполагаемая более проницаемая зона связывается с приконтактной зоной интрузии диоритов, разломами Парящий, Большой Каньон и включает площадь с активной паровой разгрузкой, пародоминирующий резервуар и нижележащие блоки. Ограничения проницаемости во 4-м слое (за исключением блоков, ассоциированных с пародоминирующим резервуаром) и в 3-м слое (в северо-западной и юго-восточной части) вызваны необходимостью согласования модельного и фактического полей температуры.

Всего в 5-ти нижних слоях модели было выделено 11 доменов, различных по петрофизическим свойствам (рис. 2). Относительные проницаемости определены с помощью функций Гранта.

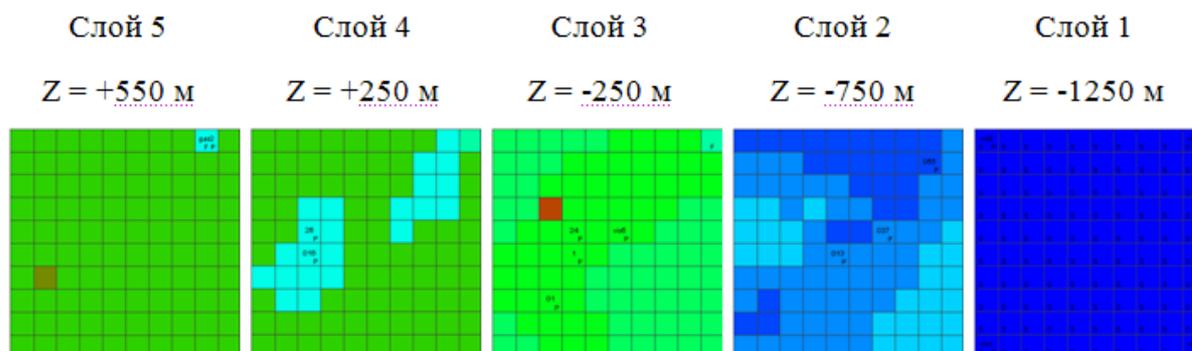


Рис.2. Распределение петрофизических свойств и проницаемости по слоям.

Слой 5: домен 1 (TUFF) – 90мД, домен 2 (TUFF) – 2,9 мД, домен 3 (TUFF) – 0,001 мД;
Слой 4: домен 4 (TUFF) – 4,5 мД; **Слой 3:** домен 5 (SAND) – 0.001 мД, домен 6 (SAND) – 4,5 мД, домен 7 (SAND) – 3,2 мД; **Слой 2:** домен 8 (CONT) – 4.5 мД, домен 9 (CONT) – 3,2 мД, домен 10 (CONT) – 0,3 мД; **Слой 1:** домен 11 (MAGM) – 0,3 мД.

Задание граничных условий на модели. Слой 7 задан инактивным с атмосферным давлением $P=1$ бар и температурой $T=15^{\circ}\text{C}$. Исключением являются элементы естественной разгрузки пара, имитирующих Дачные и Верхне-Мутновские паровые струи, где задано давление $P=1.1$ бар и температура $T=110^{\circ}\text{C}$. Водная разгрузка (обобщенная разгрузка Нижне-Жировских и Воиновских источников, отм. +50 м абс.) задавалась с помощью инактивного элемента во 3-м слое модели (-250 м абс) со значением давления $P=40$ бар и температуры $T=100^{\circ}\text{C}$. Заметим, что значение 40 бар на абс. отм. -250 м задано третьем слое в отличие от [2,3], где определен удаленный инактивный элемент с фиксированным давлением 3.5 бар на абс. отм. -50 м потому, что в PetraSim невозможна редакция связей между элементами, использованная при определении водной разгрузки в [2,3].

По данным трехмерного картирования геологической структуры, термогидродинамических данных в пределах участка Дачный наблюдаются две высокотемпературные аномалии (до 300°C) и одна относительно холодная зона. Первые связываются с зонами восходящих потоков «Основной» и «Северо-Восточный», и при моделировании были установлены в 16 элементах нижнего слоя со значениями энтальпии 1390 кДж/кг и 1270 кДж/кг соответственно. «Стоки» были установлены в «холодной» зоне,

предположительно связанной с нисходящим потоком – в 9 элементах нижнего слоя. Так же, каждый элемент нижнего слоя был определен как источник тепла, каждый по 1,575 кВт.

Моделирование естественного состояния.

Программа PetraSim с помощью внутреннего средства Cell History Plots позволяет контролировать графики изменения физических параметров системы (температуры, давления, паронасыщения) во времени, что необходимо для определения установившегося термогидродинамического состояния. Для анализа использовано 9 наблюдательных точек по углам и в центре модели. Установившийся режим получен при времени моделирования $0.10175E+16$ секунд (32.2 млн. лет).

Значения термогидродинамических параметров в ключевых точках модели показаны в табл. 3, они сходятся с фактическими значениями в пределах точности измерений. В табл. 4 показаны значения массовых и тепловых потоков между элементами, соответствующими зонам разгрузки гидротерм.

Трехмерный анализ результатов моделирования

Для трехмерного анализа результатов моделирования использован внутренний инструмент программы PetraSim - 3D Analysis. На рис. 3 показано распределение давления (а), температуры (б) и паронасыщения (в) в 4 - 1 слоях модели (верхний слой не изображен, так как он задан с постоянными значениями температуры и давления, потому является малоинформативным), соответствующих абс. отметкам +250 м, -250 м, -750 м и -1250 м соответственно. Так же, на рис. 3б наложены поля векторы направления потоков воды, на рис. 3в – векторы направления потоков пара.

Из рис. 3 в нижнем слое (абс. отметка - 1250 м) четко видны две зоны с аномальными значениями давления (а) и температуры (б), связанные с восходящими потоками. Потоки характеризуются давлением $P=12$ МПа и

температурой $T=284\text{ }^{\circ}\text{C}$ – «Северо-Восточный» и давлением $P=14,2\text{ МПа}$ и температурой $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ - «Основной». Так же, четко прослеживается снижение давления во всех слоях в северо-восточном направлении. Это обуславливает движение водного флюида (рис. 3б) и разгрузку горячей воды (Нижнее-Жировские и Воиновские источники).

Табл. 3. Результаты калибровки модели естественного состояния. Сравнение результатов PetraSim - моделирования (вариант 3В) с фактическими данными измерений температуры, давления и паронасыщения.

| Элемент (Mesh Maker) | Элемент (Petra-Sim) | Скважина | Фактические данные | | | Результаты PetraSim- моделирования | |
|----------------------|---------------------|----------|----------------------------|-----------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| | | | T Na-K, $^{\circ}\text{C}$ | T, $^{\circ}\text{C}$ | Фазовое состояние(или давление, МПа) | T, $^{\circ}\text{C}$ (P, МПа) | Паронасыщение (или давление, МПа) |
| A253 | 343 | 016 | | 228 | 2-фазное | (2.67 МПа) | 0.07 |
| A263 | 353 | 26 | | 236 | 2-фазное | 214 | 2.42 МПа |
| A333 | 223 | 01 | 298-310 | 275 | 2-фазное | (6.89 МПа) | 0.05 |
| A354 | 244 | 1 | 275-285 | 276 | 2-фазное | (6.5 МПа) | 0.05 |
| A364 | 254 | 24 | 276 | 265 | 6.2 МПа | 268 | 6.31 МПа |
| A455 | 145 | 013 | 301-306 | 305 | 10.0 МПа | 300 | 10.1 МПа |
| A467 | 157 | 037 | 282-298 | 284 | 9.8 МПа | 276 | 9.73 МПа |
| A499 | 189 | 055 | 284 | | | 272 | 9.14 МПа |

Табл. 4. Результаты PetraSim - моделирования естественного состояния (вариант 3В): тепловые и массовые потоки между элементами модели, воспроизводящими зоны разгрузки гидротерм.

| Вынос массы и энергии из геотермального резервуара: | Элементы модели (MeshMaker) | Элементы модели (PetraSim) | Массовый поток, кг/с | Тепловой поток, МВт |
|---|-----------------------------|--|--------------------------|------------------------|
| Водная разгрузка (обобщенная разгрузка Нижне-Жировских и Воиновских источников) | в элемент A2A10 | в элемент 300 из элементов 200, 290,299и 400 | 6.6+14.5 +14.5+2.2 =37.8 | 7.8+16.3 +15.5+1.4 =41 |
| Дачные паровые струи | A142 и A242 | 532 и 432 | 0.23 | 0.76 |
| Верхне-Мутновские паровые струи | A1A9 и A2A9 | 499 и 399 | 0.03 | 0.1 |

Очевидно, что две температурные аномалии, прослеживающиеся во всех слоях модели, – зоны подземного кипения под термальными полями Дачных и Верхне-Мутновских источников. Паронасыщение достигает максимума (0.223) в четвертом слое модели (абс. отметка + 250 м), в элементе, где были установлены Верхне-Мутновские паровые струи. «Дачные» термопроявления характеризуются паронасыщением порядка 0,09 в четвертом слое и 0,04 - в третьем слое модели. На рис. 3в так же изображены потоки пара, очевидно ассоциирующиеся с заданными на модели зонами разгрузки пара.

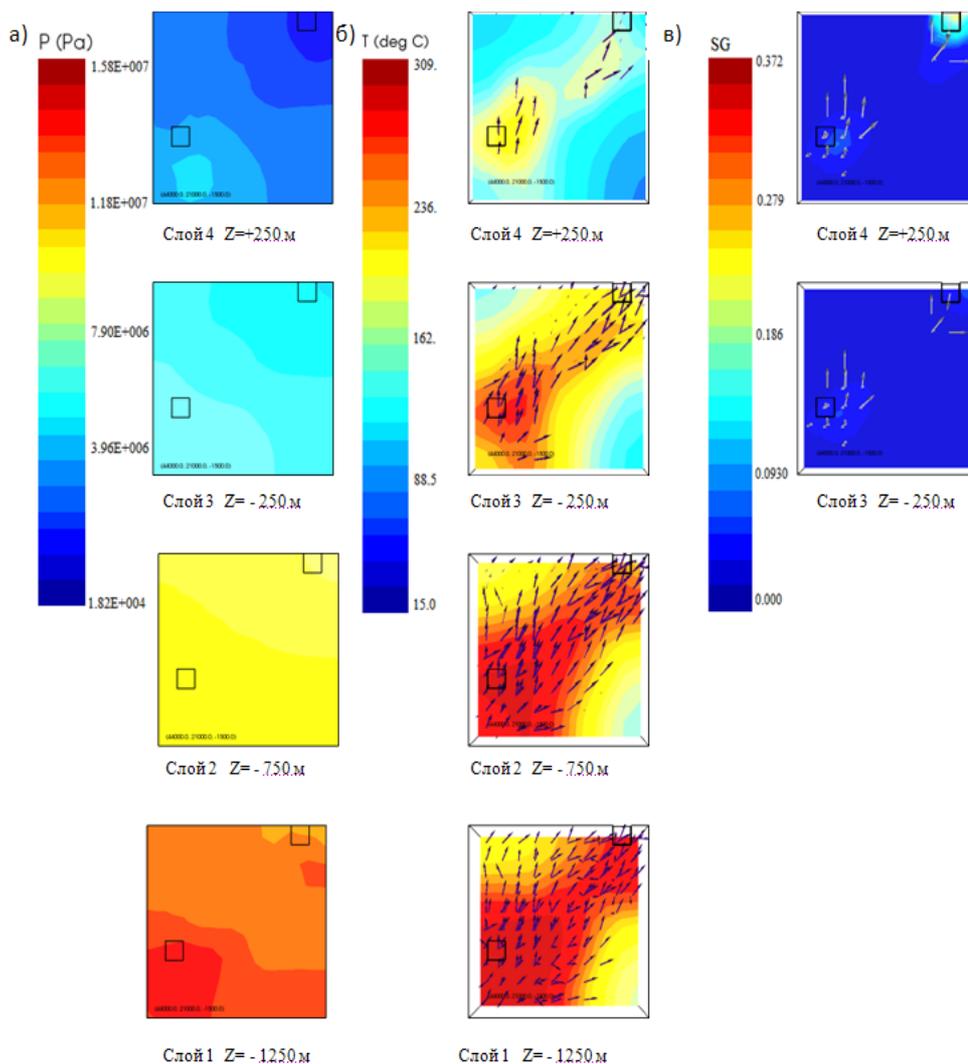


Рис. 3. Трехмерное распределение давления (а), температуры с изображением потоков воды (б) и паронасыщения с потоками газа (в) по результатам PetraSim-моделирования.

Выводы

1. С использованием программы PetraSim выполнена сборка численной термогидродинамической модели участков Дачный и Верхне-Мутновский Мутновского геотермального месторождения (естественное состояние) с исходными данными [2,3].

2. PetraSim – моделирование позволяет достаточно быстро воспроизвести и наглядно представить характеристики разработанной ранее численной термогидродинамической модели Мутновского геотермального месторождения [2,3]. В дальнейшем планируется продолжить моделирование естественного состояния и эксплуатации месторождения, а также использовать полученные результаты в образовательном процессе.

3. Вместе с тем, применение PetraSim затруднено при нестандартных граничных условиях, т.к. в PetraSim невозможна редакция связей между элементами модели. Это приводит к увеличению количества элементов модели, а, следовательно, и к увеличению времени моделирования (что может быть особенно критичным при решении обратных задач).

Автор выражает признательность А.В. Кирюхину за постановку задачи, редактирование рукописи и предоставление программного обеспечения для выполнения данной работы.

Работа выполнена при поддержке по гранту РФФИ № 09-05-00605

ЛИТЕРАТУРА

1. A.V. Kiryukhin High temperature fluid flows in the Mutnovsky hydrothermal system, Kamchatka // Geothermics, Vol.23, No.1, 1993, p.49-64.
2. A.V. Kiryukhin Modeling Studies: Dachny Geothermal Reservoir, Kamchatka, Russia // Geothermics, Vol.26, No.1, 1996, p.63-90.
3. А.В. Кирюхин Моделирование эксплуатации геотермальных месторождений // Владивосток, Дальнаука, 2002, 216 с.

PETRASIM - MODELING OF THE NATURAL STATE
MUTNOVSKY GEOTHERMAL FIELD

Miroshnik O.O.

Kamchatka Vitus Bering State University

TOUGH2 based thermohydrodynamic model of the natural state Mutnovsky geothermal field performed earlier (Kiryukhin, 1996, Кирюхин, 2002) reproduced by PetraSim. PetraSim is software designed to execute some of the TOUGH2-modeling applications with enhanced capabilities for pre- and post- processing. This significantly improve efficiency of the input data preparation and output results analysis.

Key words: PetraSim, modeling, natural state, Mutnovsky geothermal field, Kamchatka.