

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАУЖЕТСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ iTOUGH2

А. В. Кирюхин¹, Н. П. Асаулова², С. Финстерли³, Т. В. Рычкова¹,
Н. В. Обора², Н. П. Богатко¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, П-Камчатский, 683006,

²ГУП «Камчатбургеотермия», Крашенинникова 1, Термальный, Камчатка

³Lawrence Berkeley National Laboratory, MS-90-1116, One Cyclotron Road, Berkeley, CA 94720, USA

Введение

Паужетская ГеоТЭС, с установленной электрической мощностью 5 МВт, начала эксплуатироваться с 1966 г. Исследования резервуара [2] 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 1962-1963 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 %) [2]. 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. [3, 8].

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 [1, 6]. При общем расходе 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 [6, 7] привело к следующим оценкам основных параметров: 1) расход восходящего потока теплоносителя 220 кг/с при энтальпии 830-920 кДж/кг, 2) проводимость резервуара в центральной его части - 70 Дарси*м, сжимаемость $5.0 \cdot 10^{-7}$ 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 решения обратных многопараметрических задач и оценки параметров модели использована вычислительная программа iTOUGH2 [5].

Концептуальная гидрогеологическая модель

Комплексный анализ информации по геотермальным скважинам Паужетского месторождения (литологические колонки, термометрия, термокартаж, распределение продуктивных зоны, результаты анализа опытно-фильтрационных работ) показывает, что:

1) гидротермальный резервуар Паужетского геотермального месторождения имеет пластовое строение и залегает субгоризонтально на участке длиной не менее 2 км в широтном направлении и не менее 2.5 км в меридиональном направлении. Средняя вскрытая мощность пласта не менее 505 м, и находится в интервале -50 м абс. - - 550 м абс. В цент-

ральной части месторождения к гидротермальному резервуару примыкает система каналов, подводящих глубинный теплоноситель;

2) анализ распределения продуктивных зон по скважинам подтверждает, что гидротермальный резервуар характеризуется двойной пористостью (трещины+ матрица (блоки)), доля активного «трещинного» пространства в общем объеме гидротермального резервуара оценивается в 0.28. Среднее расстояние между продуктивными зонами по вертикали около 105 м.;

3) естественная разгрузка гидротерм в ненарушенных условиях до начала эксплуатации осуществлялась в виде кипящих источников, гейзеров, паровых струй и участков прогретой почвы, большая часть тепловой разгрузки приходилась на Паужетское термальное поле (63 МВт, или 99 % от суммарного выноса тепла), при этом 31 кг/с – измеренная суммарная разгрузка горячих источников; тепловая мощность паровых струй (Верхнее и Восточное Паужетские паровые поля) составляла 0.7 МВт [3];

4) оценки проницаемости, проводимости и сжимаемости по графикам временного и площадного прослеживания показывают, что значения проводимости гидротермального резервуара оцениваются от 35 до 94 Д*м и значения сжимаемости для продуктивных зон $C_i * f * M = 9.0 \cdot 10^{-6}$; породы, слагающие термоводоносный комплекс, характеризуются пористостью до 0.2 (блоки) и низкой плотностью 1500 – 1800 кг/м³;

5) начальное давление в гидротермальном резервуаре составляло 34.5-35.5 бар на абс.отм. -250 м. и имело тенденцию возрастания по направлению на юго-восток на Северном участке;

б) распределение температуры, усредненной по мощности гидротермального резервуара, показывает, что восходящий поток теплоносителя ограничен пределами разбуренной части месторождения.

На основании вышеизложенного, можно уточнить условия формирования Паужетского геотермального месторождения, которые представляются на рис. 1 следующим образом: холодные метеорные воды проникают по открытым разломам до глубин 5-6 км и более в зону высоких температур (более 250°C) (зона теплового воздействия остывающих магматических тел верхнеплейстоцен-голоценового возраста), там они нагреваются до соответствующих температур, в результате чего их плотность снижается до 800 кг/м³, и начинается процесс свободной конвекции, вызванный перепадом давлений в основании восходящего потока теплоносителя и в головной части нисходящего потока инфильтрационных вод (при глубине заложения конвективной ячейки 5 км разряжение давления в основании восходящего потока теплоносителя составит около 100 бар). Восходящий поток теплоносителя, пройдя от нагревателя сквозь породы фундамента и миоценовые песчаники, внедряется в гидротермальный резервуар с базовой энтальпией теплоносителя 950 -1050 кДж/кг (рис. 1).

Численная термогидродинамическая модель

Генерация вычислительной сетки. Численная модель Паужетского геотермального месторождения представляется в виде трех слоев (рис. 2): 1) Гидротермальный резервуар со средней мощностью 500 м, 2) Верхний водоупор со средней мощностью 150 м, осложненный проницаемым гидравлическим «окном», через которое осуществляется естественная разгрузка в виде горячих источников, 3) Фундамент, включающий подводящие каналы восходящего потока теплоносителя. Центры элементов геотермального резервуара помещены на абсолютную отметку -250 м (подошва Паужетской свиты). Границы гидротермального резервуара в плане задаются в виде многоугольника, размеры которого охватывают существующие скважины. Всего для создания вычислительной сетки использовано 424 элемента из которых 294 являются активными.

Задание на границах модели тепловых и массовых потоков. Приток глубинного теплоносителя с заданным расходом и энтальпией определяется на численной модели в зоне ограниченной изотермой усредненной по мощности гидротермального резервуара – более 180°C. Расход глубинного теплоносителя в подводящих каналах фундамента – параметр, определяемый в результате моделирования естественного состояния. Энтальпия глубинного теплоносителя задается по результатам измерений температур в глубоких

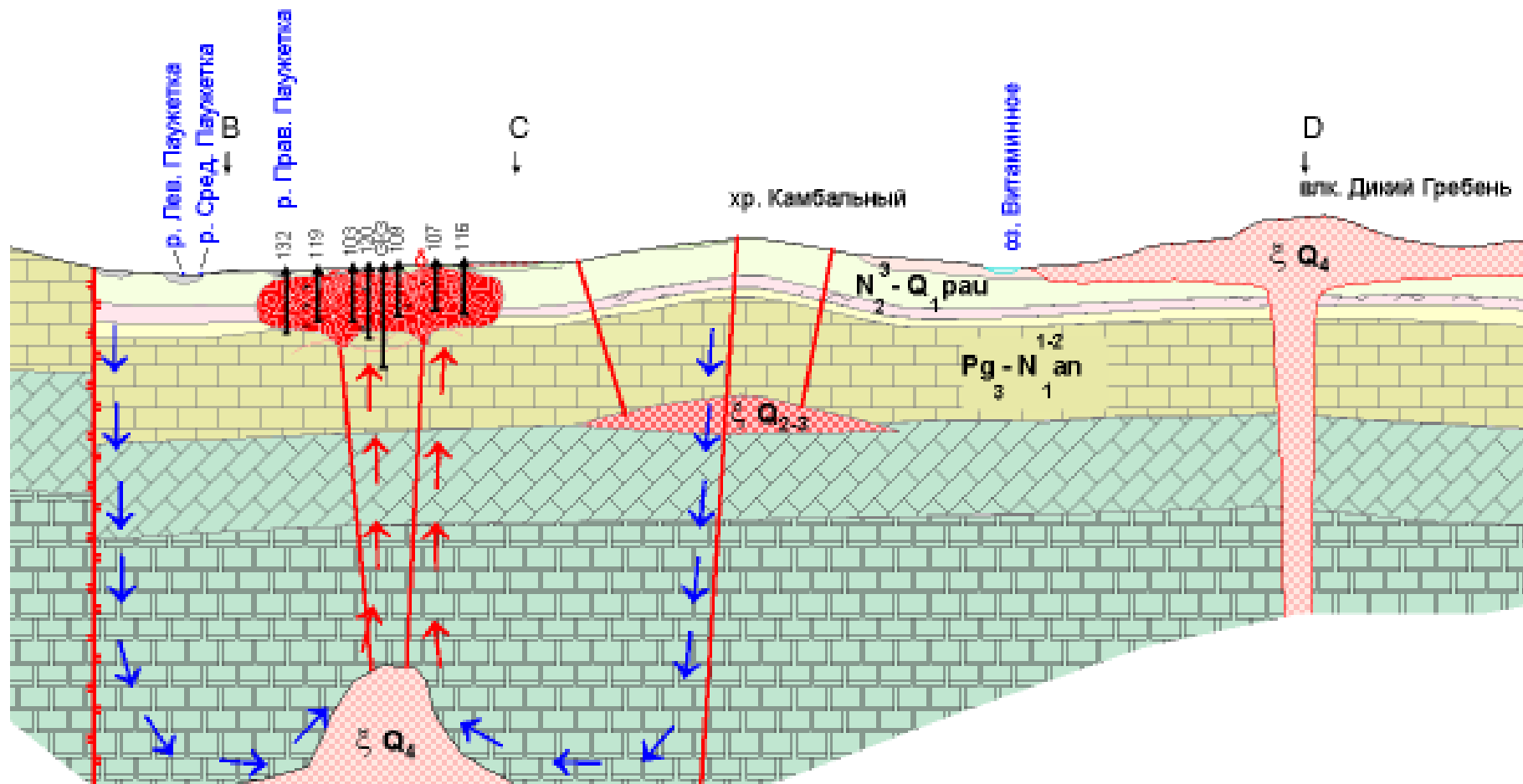


Рис. 1. Паужетское геотермальное месторождение, концептуальная гидрогеологическая модель.

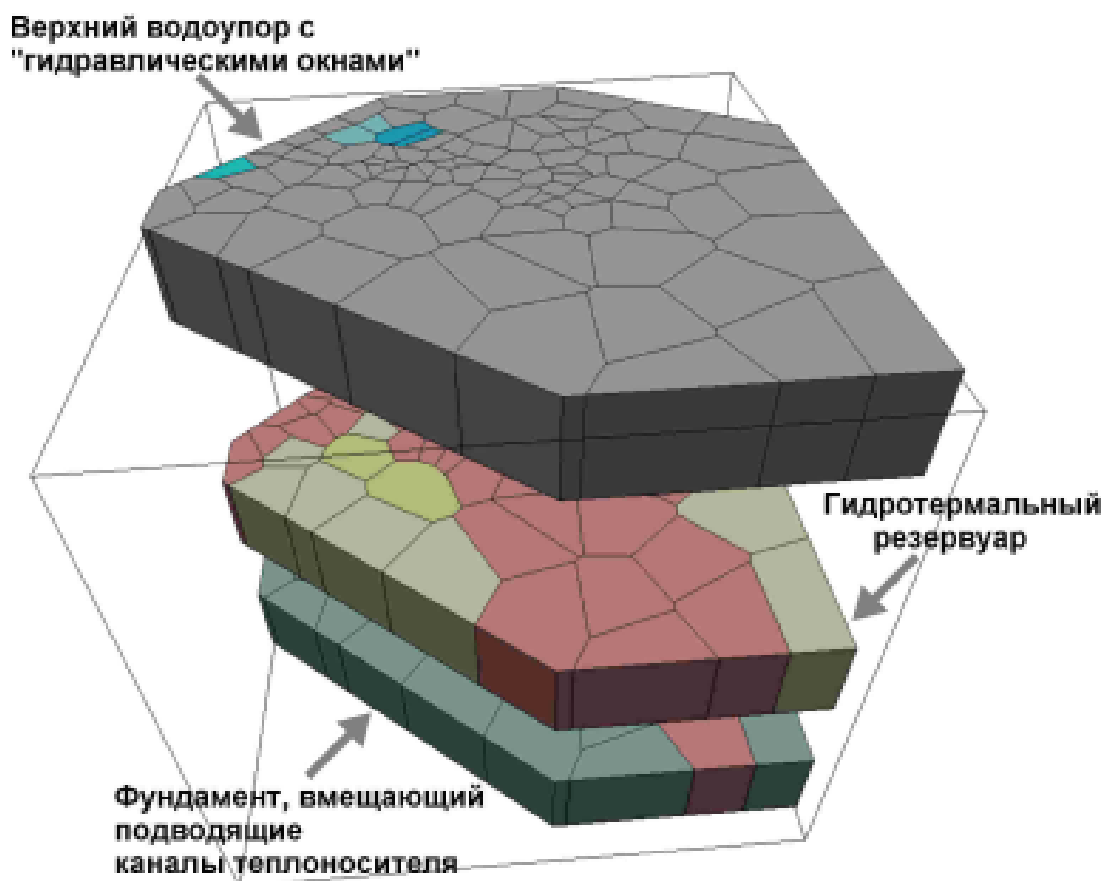


Рис. 2. Дискретизация трехмерной численной термогидродинамической модели Паужетского геотермального месторождения на элементы. Цветом показаны домены с различными петрофизическими свойствами.

скважинах и по данным геотермометров (950-1050 кДж/кг, что соответствует базовым температурам 220-240°C). Естественная разгрузка на модели задается с помощью инактивных элементов верхнего слоя модели (соответствующих существовавшим до начала эксплуатации горячим источникам), в которых задается постоянное (атмосферное) давление. Кроме того, на модели задается дополнительная область возможной скрытой разгрузки на междуречье Правого и Левого рукавов р. Паужетки. В подошве гидротермального резервуара задается кондуктивный тепловой поток мощностью 60 мВт/м² (соответствующий значению регионального теплового потока для юга Камчатки [1]). Теплообмен между геотермальным резервуаром и поверхностью Земли через верхний водоупор задается следующим образом. Все элементы верхнего водоупора (за исключением участков разгрузки) задаются инактивными с температурой 5°C и давлением 1 бар. После этого тепловой поток с кровли гидротермального резервуара определяется в численной модели автоматически. Граница области моделирования в плане задается непроницаемой (это подтверждается по результатам калибровки модели).

Определение на модели доменов с различными петрофизическими свойствами. Распределение проницаемости задается с учетом анализа характера термограмм по скважинам, расчетов коэффициентов продуктивности и приемистости скважин, с учетом геофизических данных и по аналогии с соседними элементами модели, учитывая субпластовый характер гидротермального резервуара. В слое «верхний водоупор» выделяются «гидравлические окна», через которые осуществляется естественная разгрузка горячих источников на поверхности, в том числе предполагаемая скрытая разгрузка на междуречье Правого и Левого рукавов р. Паужетки. В фундаменте выделяются два основных домена с различными петрофизическими свойствами: первый из них служит для описания подводящих каналов теплоносителя, второй используется для описания вмещающих пород.

Определение на модели «двойной пористости». Гидротермальный резервуар разбивается на «трещинное подпространство» и «блоковое подпространство» (в соответствии с моделью «двойной пористости»). Применительно к Паужетскому геотермальному месторождению «трещины» – это продуктивные зоны, вскрытые скважинами, «блоковое подпространство» – это относительно непроницаемые «блоки», разделяющие продуктивные зоны. Отношение «эффективной мощности» резервуара к вскрытой мощности резервуара принимается равным отношению: «объем трещинного пространства» / «объем блокового пространства + объем трещинного пространства». Этот параметр есть доля «трещин» (FF), который задается исходя из анализа фактических данных по продуктивным зонам геотермальных скважин. Анализ данных по Паужетскому геотермальному месторождению показывает, что $FF=0.3$. Среднее расстояние между трещинами (FS – FRACTURE SPACING) $FS=105$ м также задается исходя из анализа фактических данных по продуктивным зонам геотермальных скважин. В итоге, наиболее важным оцениваемым параметром, контролирующим теплообмен между «трещинами» и «блоками» и возможности извлечения тепловой энергии из гидротермального резервуара – является «трещинная пористость», т.к. именно она определяет активный открытый объем гидротермального резервуара.

Общие петрофизические свойства горных пород. Пористость наиболее проницаемых гидротермальноизмененных (претерпевших цеолитизацию: хлорит-ломонтит) Паужетских туфов достигает 0.20 при плотности 1500 – 1800 кг/м³. Менее проницаемые туфы имеют степень гидротермального изменения 50 % (иллит, хлорит, кальцит, кварц), пористость 0.08 – 0.20 и плотность 2100 – 2500 кг/м³ [4]. Среднее значение коэффициента теплопроводности составляет по данным измерений керна из зондировочных скважин 1.6 Вт/м °С для сухих горных пород (Ю.М. Хаткевич, личн. сообщ. 1980, В.М. Сугробов, личн. сообщ. 2006).

Моделирование естественного термогидродинамического состояния

Исходные данные для калибровки модели. Для решения обратной задачи по модели естественного состояния было использовано 68 калибровочных точек (2- расход естественной разгрузки, 14 – давления в резервуаре на –250 м абс., 52 – усредненные по мощности резервуара температуры). Достоверность калибровочных значений учитывалась заданием соответствующих стандартных отклонений: для расходов точность принималась от 15 % (фактически измеренные расходы горячих источников) до 50 % (скрытая разгрузка, оцениваемая гидрохимическим методом), для температур от 1 до 3°С, для давлений от 0.1 до 0.5 бар (в зависимости от времени и качества измерений).

Параметризация модели. Параметрами, которые оценивались на модели с использованием iTOUGH2, служили: 1) проницаемость доменов гидротермального резервуара, 2) расход восходящего потока глубинного теплоносителя.

Оценка параметров и анализ ошибок. В целом, проницаемость гидротермального резервуара оценивается величиной 83 мД, проводимость, соответственно, – в 41.5 Д*м (286 м²/сут при 190°С), расход восходящего потока глубинного теплоносителя – в 46.5 кг/с (вариант #NS7-4K6). Сходимость по температурам обеспечивается со среднеквадратичным отклонением 7.5°С, по давлениям – 0.5 бар. Оцениваемые параметры модели – расход восходящего потока и проницаемость – обнаруживают отрицательную корреляцию (около -0.95). На уровне 95 % значимости оценки проницаемости (83 мД) и расхода (46.5 кг/с) лежат в диапазонах: [76 мД, 93 мД] (проницаемость), [41.6 кг/с, 51.4 кг/с] (расход).

Моделирование эксплуатации 1960-2005 гг.

Исходные данные для калибровки модели. Данные калибровки для эксплуатационной модели включали: 1) среднемесячные изменения энтальпии в эксплуатационных скважинах (20, RE1, 106, 108, 120, 121, 122, 123, ГК3, 103) (десять временных рядов), 2) среднемесячные изменения давления в наблюдательных скважинах, пересчитанные на абс. отм. – 250 м (двадцать четыре временных ряда), и 3) среднемесячные изменения температуры, усредненные по мощности гидротермального резервуара (двадцать шесть временных рядов). Всего было использовано 13667 калибровочных точек. Достоверность калибровочных значений по энтальпии учитывалась заданием стандартного отклонения 20 кДж/кг. В элементах модели, соответствующих эксплуатационным скважинам –

задавался расход водоотбора, в элементах модели, соответствующих реинжекционным скважинам - расход и энтальпия реинжекции, соответствующие фактическим средне-месячным данным начиная с января 1960 (рис. 3).

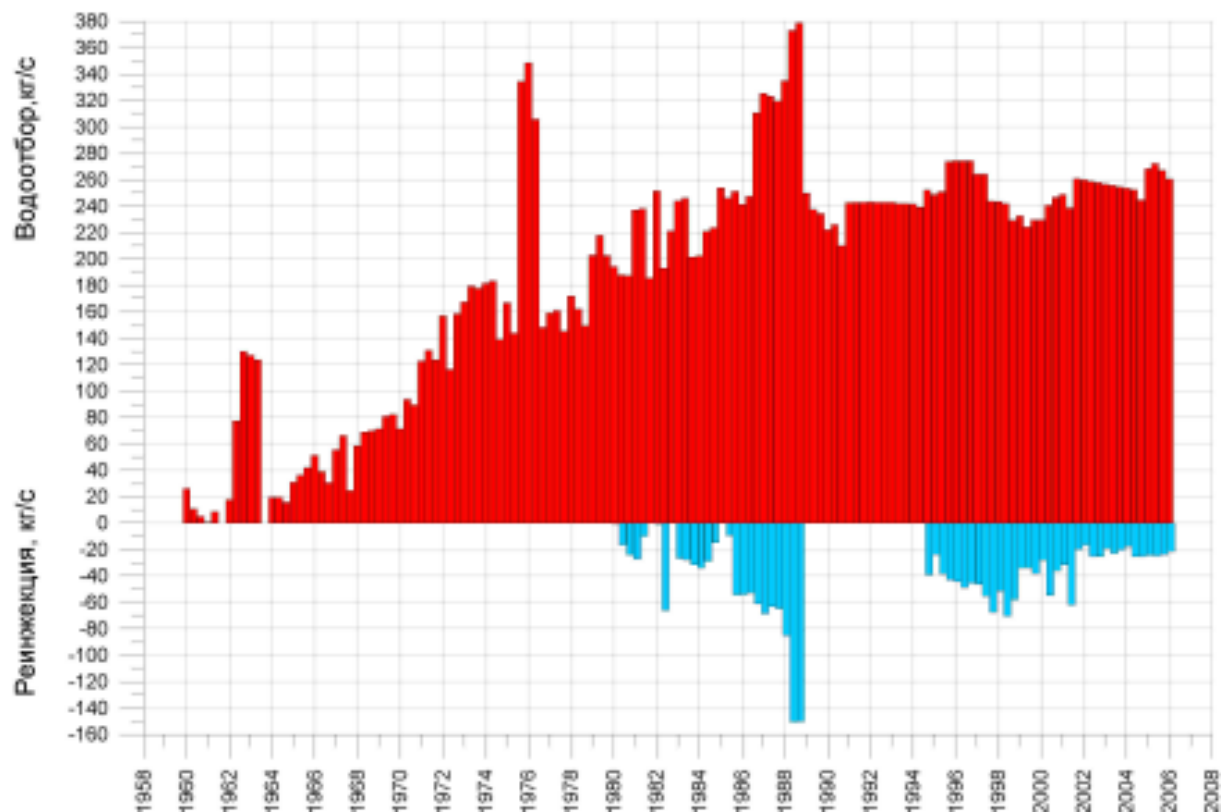


Рис. 3. Водоотбор (сверху) и реинжекция (снизу) в процессе эксплуатации Паужетского геотермального месторождения в 1960-2005 гг.

Параметризация модели. На первом этапе в качестве оцениваемых параметров модели использованы восемь параметров: сжимаемость гидротермального резервуара C_r (параметр, контролирующий извлечение теплоносителя), трещинная пористость f_f (параметр характеризующий активный объем гидротермального резервуара и контролирующий извлечение тепловой энергии из горных пород), сжимаемость C_b , пористость f_b и проницаемость k_b системы подводящих каналов фундамента (параметры, совместно контролирующие емкость фундамента и привлечение из него дополнительных ресурсов глубинного теплоносителя), и проницаемости зон инфильтрации метеорных вод в гидротермальный резервуар в верхнем относительном «водоупоре» k_N, k_E, k_W (на Северном участке, в районе Восточно-Паужетского поля и на Западном участке, соответственно). Однако из-за высокой корреляции между сжимаемостью и пористостью данный набор параметров не оценивается с высокой точностью. Поэтому, значение сжимаемости для пород резервуара и фундамента было принято равным $C_r = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$, значение проницаемости системы подводящих каналов $k_b = 5 \text{ мД}$, и число оцениваемых на модели параметров уменьшилось до пяти.

Оценка параметров и анализ ошибок. На основе решения обратных задач с использованием iTOUGH2 (вариант #EX-7YC) получены следующие оценки указанных выше параметров: 1) для гидротермального резервуара трещинная пористость $f_f = 0.094$; 2) для системы подводящих каналов в фундаменте пористость $f_b = 0.045$; 3) для верхнего относительного «водоупора» $k_N = 145 \text{ мД}$, $k_E = 11 \text{ мД}$, $k_W = 490 \text{ мД}$. Сходимость по энтальпии добычных скважин обеспечивается со среднеквадратичным отклонением 36.7 кДж/кг, по температуре - 12°C, по давлениям - 0.4 бар. На рис. 4 показан пример калибровки модели Паужетского геотермального месторождения по данным эксплуатации 1960-2005 гг: сравнение фактических значений энтальпии добычной скважины РЭ-1 с результатами

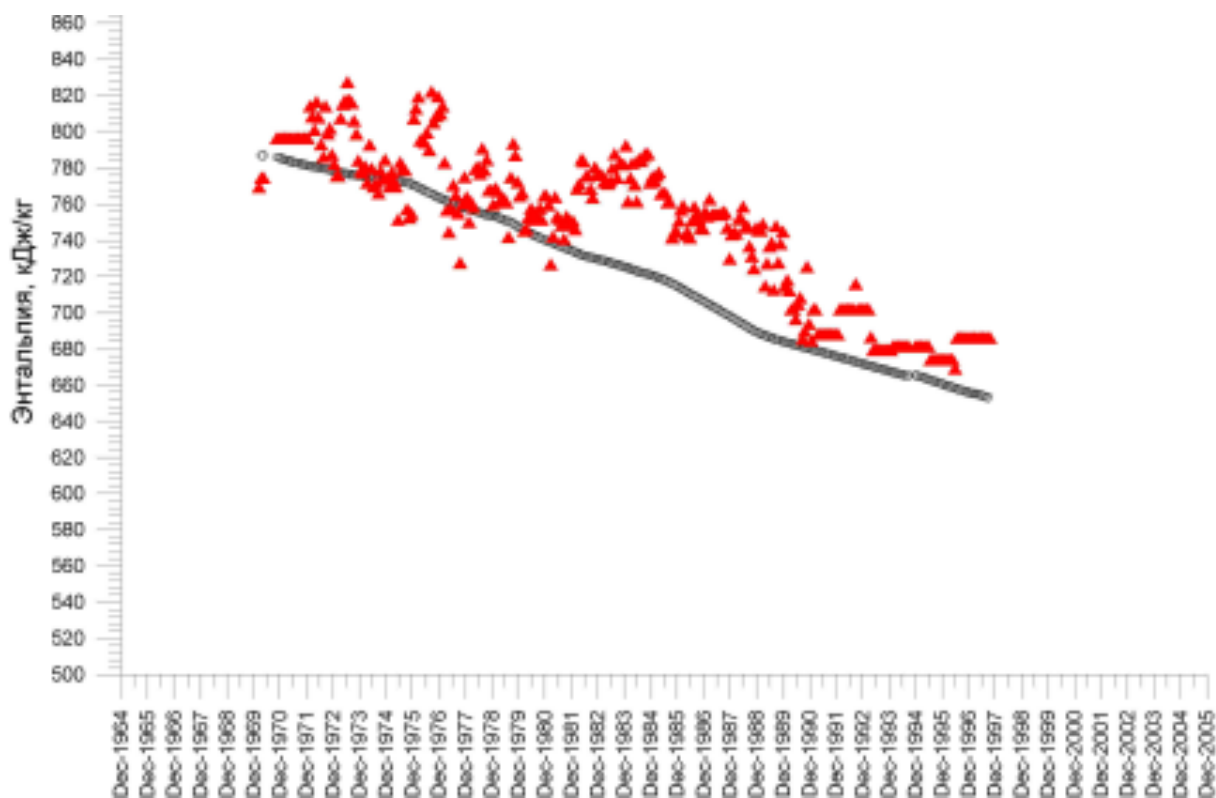


Рис. 4. Пример калибровки модели Паужетского геотермального месторождения по данным эксплуатации 1960–2005 гг: сравнение фактических значений энтальпии добычной скважины РЭ-1 (треугольники) с результатами моделирования (сплошная линия).

моделирования. Оцениваемые параметры модели не обнаруживают существенной корреляции (менее 0.5 по абс. величине). На уровне 95 % значимости оценки трещинной пористости гидротермального резервуара находятся в диапазоне [0.090, 0.098], пористости фундамента в диапазоне [0.037, 0.053], проницаемости «гидравлических окон» верхнего водоупора k_N , k_E , k_W - в диапазонах [129 мД, 162 мД], [371 мД, 645 мД] [10 мД, 12 мД], соответственно.

Тепловой, массовый и химический баланс Паужетского гидротермального резервуара.

Баланс тепла и массы, полученный в результате моделирования (вариант #7УС), позволяет понять условия формирования эксплуатационных запасов Паужетского геотермального месторождения. Приходные составляющие массового баланса по состоянию на ноябрь 2005 г. (вариант #ЕХ-7УС) следующие (рис. 5): (F1) Восходящий поток теплоносителя: +46.5 кг/с, (F2) Привлекаемые ресурсы теплоносителя из фундамента: +70.5 кг/с, (F4) Инфильтрация метеорных вод: +86.5 кг/с, (F5) Реинжекция сепарата +23.8 кг/с, (F6) Сработка упругой емкости гидротермального резервуара (рассчитывается по балансу): +60.9 кг/с. Расходные составляющие массового баланса:

(F7) Отбор теплоносителя из добычных скважин -269.3 кг/с, (F8) Разгрузка из гидротермального резервуара -18.9 кг/с. Приходные составляющие теплового баланса по состоянию на ноябрь 2005 г. (вариант #ЕХ-7УС) следующие: (HF1)

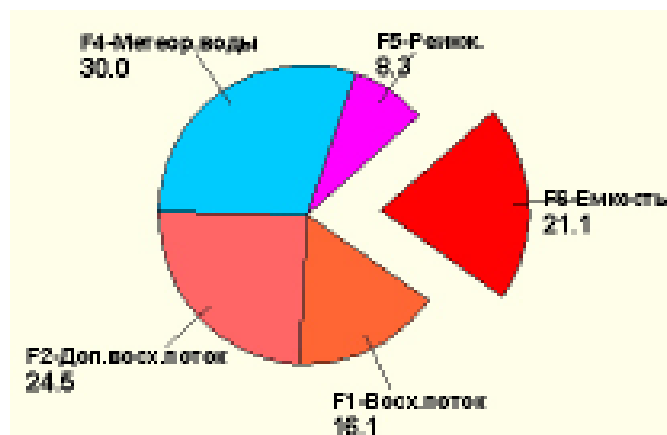


Рис. 5. Условия формирования эксплуатационных запасов Паужетского геотермального месторождения по результатам моделирования. Массовый баланс в % на ноябрь 2005 г (вариант #ЕХ-7УС). Обозначения составляющих баланса F1, F2, F4, F5, F6, F7, F8 - см. также в тексте.

Восходящий поток теплоносителя: +46.5 МВт, (HF2) Привлекаемые ресурсы теплоносителя из фундамента: +71.9 МВт, (HF3) Кондуктивный тепловой поток из фундамента: +1.7 МВт, (HF5) Реинжекция сепарата: + 12.0 МВт, (HF6) Сработка тепловых запасов гидротермального резервуара (рассчитывается по балансу): +101.3 МВт. Расходные составляющие теплового баланса: (HF7) Отбор теплоносителя из добычных скважин -214 МВт, (HF8) Разгрузка из гидротермального резервуара: -18.9 МВт, (HF9) Теплообмен через верхний водоупор -0.5 МВт.

Химический баланс по хлор-иону, рассчитанный при условии, что концентрации в восходящем потоке глубинного теплоносителя, привлекаемом из фундамента, и начальная концентрация хлор-иона в гидротермальном резервуаре равны 1600 мг/кг, что соответствует выносу хлор-иона из добычных скважин (260–271 г/с) выполняется с точностью 4–8 %.

Заключение

1) Обоснована концептуальная гидрогеологическая модель и построена соответствующая трехмерная численная термогидродинамическая модель Паужетского геотермального месторождения, охватывающая область 4×5 км² и включающая три слоя: 1) фундамент, вмещающий подводящие каналы теплоносителя; 2) гидротермальный резервуар; 3) верхний водоупор с проницаемыми «окнами», через который осуществляется инфильтрационное питание гидротермального резервуара в процессе эксплуатации.

2) В результате решения обратных задач с использованием iTOUGH2, выполнена оценка параметров модели, контролирующих тепловую и массовую емкость гидротермального резервуара, притоки в него глубинного теплоносителя и холодных метеорных вод.

3) После окончательной корректировки (с учетом последних наиболее достоверных данных по расходам и энтальпии добычных скважин) модель планируется использовать для обоснования эксплуатационных запасов Паужетского геотермального месторождения: прогноза изменения паропроизводительности добычных скважин до 2037 г., оценки эффекта реинжекции отработанного теплоносителя и обоснования количества дополнительных эксплуатационных и реинжекционных скважин, необходимых для поддержания устойчивой эксплуатации геотермального месторождения.

Авторы выражают признательность Е.П. Белову, М.Ф. Красноперову, Л.А. Ворожейкиной, А.А. Захарову, В.Д. Евсеенко, В.А. Грабовникову, Ю.Ф. Манухину, А.А. Рошалю и Б.В. Боровскому за поддержку выполняемой работы, конструктивные предложения и замечания.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ по проекту 06-05-64688 и ДВО РАН по проекту 06-I-ОНЗ-109.

Список литературы

1. *Кирюхин А.В., Сугробов В.М.* Модели теплопереноса в гидротермальных системах Камчатки // Москва. Наука. 1987. 149 с.
2. Паужетские горячие воды на Камчатке // отв. Ред. Б.И. Пийп. М.: Наука. 1965. 207 с.
3. *Сугробов В.М.* Геотермальные энергоресурсы Камчатки и перспективы их использования. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, ДВНЦ АН СССР. 1976. с. 267-281.
4. *V. Ladygin, J. Frolova, S. Rychagov* (2000) Formation of Composition and Petrophysical Properties of Hydrothermally Altered Rocks in Geothermal Reservoir // Proc. WGC 2000. p. 2695-2699.
5. *S. Finsterle.* iTOUGH2 User's Guide // LBNL-40040. 1999. 130 p.
6. *A.V. Kiryukhin, V.A. Yampolsky* Modeling Study of the Pauzhetky Geothermal Field, Kamchatka, Russia // Geothermics. v. 33. 2004. No. 4, 421-442 p.
7. *K. Pruess.* TOUGH2 – a general purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow // LBL-29400. 1991. 102 p.

8. *V.M. Sugrobov* Evaluation of operational reserves of high-temperature waters // Geothermics, Special Issue 1970. #2. p. 1256-1260.

NUMERICAL MODELING THE PAUZHETSKY GEOTHERMAL FIELD, KAMCHATKA, RUSSIA, USING ITOUGH2

**A. V. Kiryukhin¹, N. P. Asaulova², S. Finsterle³, T. V. Rychkova¹,
N. V. Obora² and N. P. Bogatko¹**

*Institute Volcanology and Seismology FEB RAS, Piip-9, P-Kamchatsky, Russia 683006,
e-mail: avk2@kscnet.ru*

²*Kamchatskburgeotemia Enterprize, Krasheninnikova-1, Thermalny, Kamchatka, Russia, 684035*

³*Lawrence Berkeley National Laboratory, MS-90-1116, One Cyclotron Rd, Berkeley, CA 94720, USA*

The forward TOUGH2 modeling study of the Pauzhetsky geothermal field (Kiryukhin and Yampolsky, 2004) was followed by an iTOUGH2 analysis to obtain more reliable reservoir parameter estimations. The model was automatically calibrated against (1) natural state and (2) production data. For the natural state modeling, calibration data include 68 points (2 natural discharge rates, 14 reservoir pressures at -250 m.a.s.l., and 52 reservoir vertically averaged temperatures). The different quality of the calibration points was expressed by specifying appropriate standard deviations. Preliminary estimates of the principal parameters are: (1) permeability $k = 83$ mD, and (2) an upflow rate $Q_b = 46.5$ kg/s.

For the modeling of the exploitation phase, calibration data include 60 datasets: enthalpies of the exploitation wells (10 data sets), pressures in monitoring wells (24 data sets), and temperatures in monitoring wells (26 data sets), with a total of 13667 calibration points. The following parameters are estimated: (1) reservoir fracture porosity, (2) basement porosity, and (3) infiltration “window” permeabilities. Model calibration will be followed by an analysis of the sustainable capacity of the Pauzhetsky field.