

Выводы

На основе построенной выше модели, ее исследования и изучения и проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1) При разработке ГМ обязательно существует оптимальный режим, позволяющий получить максимум тепловой энергии. Характер режима освоения во многом определяется переменной управления $\tilde{\beta}(t)$. Динамический характер ее изменения зависит от соотношения начального значения параметра W_0 и значения $W^*(0)$.

2) Оптимальный режим разработки ГМ позволяет получить больше тепловой энергии, чем обычный режим его освоения.

Рассмотренный пример ($N^* = 16$ скв., $\bar{n} = 2$ скв./год) показывает, что освоение его в оптимальном режиме позволяет, повысит эффективность получения тепловой энергии в течение 30 лет, более чем на 14%.

Таким образом, проведенные расчеты, анализ полученных результатов свидетельствует о том, что построенная математическая модель ГМ является адекватной изучаемому объекту и позволяет оптимизировать режим его разработки с условием получения максимума тепловой энергии. Приведенные расчетные формулы, алгоритм построения оптимального решения можно использовать для выполнения соответствующих расчетов для любого ГМ, вводимого в строй.

На основе разработанной модели можно ставить и решать и другие оптимизационные задачи с другими критериями оптимальности, например, с максимизацией получаемого экономического эффекта, минимизацией приведенных затрат и др., строить прогнозы динамики основных технологических показателей разработки месторождения. Для выбора наиболее оптимальной стратегии разработки месторождения на основе модели можно проводить и разного характера имитационные эксперименты.

Многолетняя изменчивость параметров термальных вод и оптимизация их промышленной эксплуатации

А.М.Бойков, Г.М.Ахмедова, Л.Т.Омарова
ИПГ ДНЦ РАН

Постановка проблемы. Классическая гидрогеология принимает в качестве базового научного положения, что в естественных условиях термобарические и гидрохимические параметры термальных вод сохраняются неизменными во времени. Промышленная эксплуатация геотермальных месторождений, как можно предполагать, может приводить к изменчивости параметров термальных вод. Перепады значений этих параметров на устье скважин во времени, казалось бы, должны быть обусловлены интенсивностью промышленного отбора. Однако анализа режимных наблюдений, связывающего изменчивость термобарических, гидрохимических и эксплуатационных параметров термальных вод в достаточном объеме и на протяжении длительного периода не проводились. Результаты такого анализа для разнотипных в структурно-тектоническом отношении гидротермальных систем неизвестны. Эмпирические закономерности, связывающие многолетнюю изменчивость этих параметров термальных вод в динамическом режиме между собой и с типовыми структурно-геологическими условиями залегания геотермальных резервуаров, не выведены.

Поэтому остаются неизученными проблема оптимизации промышленного отбора термальных вод, её технологическая цепочка и методы контроля. Какие критерии должны лечь в основу оптимизации промышленной эксплуатации геотермальных резервуаров, другими словами, отбора термальных вод с максимально возможной высокой температурой и как контролировать подобный режим эксплуатации? Ответы на эти вопросы, кроме того, позволят повысить достоверность имитационного моделирования эволюции геотермальных резервуаров в процессе эксплуатации, а также выполнять прогнозирование изменчивости термобарических и гидрохимических параметров термальных вод, как и при проектировании извлечения геотермальной энергии, так и в опытно-промышленных целях. Актуальность такого исследования совершенно очевидна.

Обсуждение результатов и выводы. Предмет исследования – изучение многолетней изменчивости термобарических, гидрохимических и эксплуатационных параметров геотермальных месторождений (Республика Дагестан) в режиме промышленной эксплуатации в течение 10-летнего периода (1974-1983 гг.). Температура на устье скважин, расход и годовой объём добычи термальных вод, а также динамическое давление на устье скважин, минерализация; анионы CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , катионы ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , кислотность (рН) и жесткость воды ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) служили информативными параметрами для анализа. Установлено, что перепад температуры на устье в отдельных скважинах геотермальных месторождений достигал 15°C на протяжении 10-летнего периода. Задача поддержания температурного максимума на устье скважин на протяжении всего периода разработки составляет главную цель оптимизации эксплуатации месторождения. Относительные перепады значений других параметров термальных вод в режиме эксплуатации не менее значительны. Количественно изменчивость во времени информа-

тивных параметров и их корреляционные взаимосвязи были изучены и аппроксимированы полиномиальными трендами с определением показателей достоверности аппроксимации (R^2). Результаты анализа приведены в таблицах 1 и 2 на примерах 2-х месторождений, относящихся к антиклинальному (“Махачкала”) и моноклиналильному (“Кизляр”) типам структур. Данные таблиц позволяют сопоставить информативные параметры термальных вод и тесноту их корреляционных связей на геотермальных месторождениях антиклинального и моноклиналильного типа в режиме эксплуатации. Таблицы дают общее представление о видах изменчивости параметров и характере корреляционных взаимосвязей. Антиклинальная структура “Махачкала” имеет амплитуду 500 м, а моноклиналильная структура “Кизляр” - угол падения водоносных пластов, равный 3°. Водоносные песчаные пласты, находящиеся в режиме промышленной эксплуатации, принадлежат чокракскому горизонту, который входит в комплекс пород среднего миоцена с сульфатными натриевыми, гидрокарбонатно-сульфатными натриевыми и гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатно-натриевыми типами вод.

Изменчивость параметров термальных вод.

Таблица 1.

Геотермальное месторождение антиклинального типа “Махачкала” – скв.36 (свод)			Геотермальное месторождение моноклиналильного типа “Кизляр” – скв.5Т		
Изменяющийся параметр термальных вод	Вид полинома	Показатель достоверности аппроксимации (R^2)	Изменяющийся параметр термальных вод	Вид полинома	Показатель достоверности аппроксимации (R^2)
Температура на устье скважины ($T, ^\circ\text{C}$)	$y = 0,0014x^6 - 0,0493x^5 + 0,686x^4 - 4,7434x^3 + 16,958x^2 - 28,683x + 67,867$	0,73	Температура на устье скважины ($T, ^\circ\text{C}$)	$y = 0,0011x^6 - 0,0276x^5 + 0,2483x^4 - 1,0242x^3 + 2,3324x^2 - 3,5664x + 101$	0,74
Расход, м ³ /сутки	$y = 0,0048x^6 - 0,1784x^5 + 2,6259x^4 - 19,143x^3 + 70,366x^2 - 114,76x + 96,7$	0,56	Расход, м ³ /сутки	$y = -0,0347x^6 + 1,2079x^5 - 16,453x^4 + 110,02x^3 - 366,68x^2 + 530x - 172,07$	0,95
Давление на устье скважин, атм.	$y = -0,0018x^6 + 0,0595x^5 - 0,7456x^4 + 4,4822x^3 - 13,186x^2 + 17,456x - 6,46$	0,70	Давление на устье скважин, атм.	$y = 0,0036x^6 - 0,1164x^5 + 1,4868x^4 - 9,4762x^3 + 31,766x^2 - 53,564x + 52,853$	0,97
Минерализация термальных вод, г/л	$y = 0,0002x^6 - 0,005x^5 + 0,0612x^4 - 0,3693x^3 + 1,1356x^2 - 1,6799x + 7,4780,9971$	1,0	Минерализация термальных вод, г/л	$y = -6E-05x^6 + 0,002x^5 - 0,0266x^4 + 0,169x^3 - 0,5372x^2 + 0,818x + 6,1673$	1,0
Годовой объем добычи термальных вод (работающий интервал - до 10-12 м), м ³	$y = 0,001x^6 - 0,0393x^5 + 0,6019x^4 - 4,4164x^3 + 15,918x^2 - 24,581x + 23,667$	0,53	Годовой объем добычи термальных вод (работающий интервал - до 28 м)	$y = -0,0138x^6 + 0,4718x^5 - 6,3399x^4 + 42,038x^3 - 142,05x^2 + 227,75x - 107,73$	0,68
Годовой объем добычи термальных вод (работающий интервал – до 90-97 м), м ³	$y = -0,0439x^6 + 1,4846x^5 - 19,545x^4 + 126,27x^3 - 414,66x^2 + 642,1x - 282,33$	0,63	Годовой объем добычи термальных вод (работающий интервал – до 46 м)	$y = -0,054x^6 + 1,7268x^5 - 21,486x^4 + 131,38x^3 - 408,48x^2 + 588,01x - 226,44$	0,30
Содержание анионов хлора (CL ⁻), мг/л	$y = 0,0057x^2 - 0,0408x + 1,7418$	1,0	Содержание анионов хлора (CL ⁻), мг/л	$y = 0,0013x^5 - 0,0101x^4 - 0,0071x^3 + 0,1867x^2 - 0,3785x + 3,2347$	1,0
Содержание анионов SO ⁴⁻ , мг/л	$y = -0,0219x^5 + 0,2342x^2 - 0,6501x + 1,8035$	1,0	Содержание анионов HCO ₃ ⁻ , мг/л	$y = -0,0675x^6 + 1,4874x^5 - 12,86x^4 + 55,564x^3 - 125,44x^2 + 138,42x - 56,042$	1,0
Содержание катионов кальция (Ca), мг/л	$y = -0,012x^4 + 0,284x^3 - 2,1367x^2 + 5,722x - 0,8573$	1,0	Содержание PH	$y = -0,029x^6 + 0,7228x^5 - 7,1538x^4 + 35,634x^3 - 92,777x^2 + 116,97x - 46,47$	1,0
Содержание PH	$y = -0,0611x^4 + 1,1784x^3 - 7,6462x^2 + 18,512x - 3,8827$	1,0	Жесткость воды (Ca ⁺ /Mg), мг-эквивалент/литр	$y = 0,0046x^5 - 0,1604x^4 + 1,6396x^3 - 6,7146x^2 + 10,781x - 2,35$	1,0
Жесткость воды (Ca ⁺ /Mg), мг-эквивалент/литр	$y = 0,0114x^4 - 0,1581x^3 + 0,7053x^2 - 1,1919x + 3,3333$	1,0	Содержание SO ⁴⁻ , мг/л	$y = -0,0005x^6 + 0,0145x^5 - 0,1653x^4 + 0,939x^3 - 2,8123x^2 + 4,1106x - 0,3$	1,0

Геотермальное месторождение антиклинального типа – “Махачкала”			Геотермальное месторождение моноклинального типа – “Кизляр”		
Параметры-корреляты термальных вод	Вид полинома	Показатель достоверности аппроксимации (R ²)	Параметры-корреляты термальных вод	Вид полинома	Показатель достоверности аппроксимации (R ²)
Корреляция годового объема добычи термальных вод (интервал до 10-12 м) и температуры на устье скважины	$y = -0,2597x^4 + 51,919x^3 - 3878,4x^2 + 128261x - 2E+06$	0,40	Корреляция годового объема добычи термальных вод (интервал до 28 м) и температуры на устье скважины	$y = -2E-06x^6 + 0,0004x^5 - 0,0304x^4 + 1,1605x^3 - 24,154x^2 + 259,47x - 1023,1$	0,65
Корреляция годового объема добычи термальных вод (интервал 90-97 м) и температуры на устье скважины	$y = -1E-07x^6 + 5E-05x^5 - 0,0095x^4 + 0,8966x^3 - 47,1x^2 + 1304,8x - 14841$	0,23	Корреляция годового объема добычи термальных вод (интервал до 46 м) и температуры на устье скважины	$y = -1,7185x^4 + 696,74x^3 - 105906x^2 + 7E+06x - 2E+08$	0,54
Корреляция температуры на устье скважины и расхода	$y = -2E-05x^6 + 0,0054x^5 - 0,6042x^4 + 35,559x^3 - 1167,8x^2 + 20299x - 145875$	0,77	Корреляция температуры на устье скважины и расхода	$y = -0,5764x^4 + 233,34x^3 - 35417x^2 + 2E+06x - 6E+07$	0,21
Корреляция давления и температуры на устье скважины	$y = 48,95x^6 - 604,02x^5 + 3003,5x^4 - 7718,1x^3 + 10828x^2 - 7874x + 2374,6$	0,17	Корреляция давления и температуры на устье скважины	$y = -0,0216x^4 + 8,9899x^3 - 1400,4x^2 + 96863x - 3E+06$	0,41
Корреляция температуры на устье скважины и минерализации	$y = -154395x^6 + 6E+06x^5 - 9E+07x^4 + 8E+08x^3 - 4E+09x^2 + 9E+09x - 1E+10$	0,96	Корреляция температуры на устье скважины и минерализации	$y = 0,0065x^4 - 2,6197x^3 + 396,14x^2 - 26619x + 670686$	0,85
Корреляция температуры на устье скважины и содержания анионов хлора (Cl)	$y = -6872,3x^4 + 50909x^3 - 140560x^2 + 171548x - 78078$	0,87	Корреляция температуры на устье скважины и содержания анионов хлора (Cl)	$y = -215416x^5 + 3E+06x^4 - 2E+07x^3 + 6E+07x^2 - 9E+07x + 6E+07$	0,99
Корреляция температуры на устье скважины и содержания анионов SO ₄ ²⁻	$y = 990,48x^4 - 5516,4x^3 + 11394x^2 - 10336x + 3526,4$	0,58	Корреляция температуры на устье скважины и содержания анионов HCO ₃ ⁻	$y = -0,0675x^6 + 1,4874x^5 - 12,86x^4 + 55,564x^3 - 125,44x^2 + 138,42x - 56,042$	1,0
Корреляция температуры на устье скважины и содержания катионов кальция (Ca ²⁺)	$y = 232,27x^4 - 3061,8x^3 + 14832x^2 - 31367x + 24522$	0,47	Корреляция температуры на устье скважины и pH	$y = 29,195x^6 - 1448,3x^5 + 29597x^4 - 319432x^3 + 2E+06x^2 - 6E+06x + 8E+06$	0,65
Корреляция температуры на устье скважины и pH	$y = -0,0005x^6 + 0,0196x^5 - 0,2977x^4 + 2,1721x^3 - 7,9083x^2 + 12,79x + 46,167$	0,83	Корреляция температуры на устье скважины и жесткости воды (Ca ²⁺ /Mg ²⁺)	$y = -0,0097x^6 + 0,2766x^5 - 3,0812x^4 + 16,889x^3 - 46,813x^2 + 60,93x + 69,75$	0,75
Корреляция температуры на устье скважины и жесткости воды (Ca ²⁺ /Mg ²⁺)	$y = -8,121x^3 + 76,129x^2 - 222,95x + 260,33$	0,36	Корреляция содержания HCO ₃ ⁻ и давления на устье	$Y = 3,4675x^5 - 274,59x^4 + 8675,5x^3 - 136679x^2 + 1E+06x - 3E+06$	0,40
Корреляция содержания SO ₄ ²⁻ и давления на устье	$y = 0,5547x^3 - 4,13x^2 + 9,5648x - 5,423$	0,98	Корреляция содержания HCO ₃ ⁻ и расхода	$y = -2396,6x^5 + 37698x^4 - 174201x^3 + 339152x^2 - 295812x + 95593$	-0,53
Корреляция содержания SO ₄ ²⁻ и расхода	$y = 3560,8x^4 - 19167x^3 + 38547x^2 - 34335x + 11465$	0,57	Корреляция содержания HCO ₃ ⁻ и годового объема добычи термальных вод в интервале до 46 м	$y = -3E-08x^6 + 8E-06x^5 - 0,0009x^4 + 0,0518x^3 - 1,3545x^2 + 14,345x - 22,653$	1,0
Корреляция содержания SO ₄ ²⁻ и годового объема добычи термальных вод в интервале до 10-12 м	$y = 2113,7x^4 - 11280x^3 + 22448x^2 - 19758x + 6504,5$	0,73	Корреляция температуры и SO ₄ ²⁻	$y = 1E+06x^6 - 1E+07x^5 + 5E+07x^4 - 1E+08x^3 + 1E+08x^2 - 1E+08x + 3E+07$	0,99
			Корреляция содержания SO ₄ ²⁻ и расхода	$y = -3E+07x^6 + 3E+08x^5 - 1E+09x^4 + 3E+09x^3 - 4E+09x^2 + 3E+09x - 9E+08$	0,99
			Корреляция содержания SO ₄ ²⁻ и давления на устье	$y = -1E+06x^6 + 1E+07x^5 - 5E+07x^4 + 1E+08x^3 - 2E+08x^2 + 1E+08x - 4E+07$	0,63
			Корреляция содержания SO ₄ ²⁻ и год. объема добычи термальных вод (интервал до 28 м)	$y = -2E+06x^6 + 2E+07x^5 - 1E+08x^4 + 3E+08x^3 - 3E+08x^2 + 2E+08x - 7E+07$	0,94
			Корреляция содержания SO ₄ ²⁻ и год. объем добычи термальных вод (интервал до 46 м)	$y = -3E+07x^6 + 3E+08x^5 - 1E+09x^4 + 3E+09x^3 - 4E+09x^2 + 2E+09x - 7E+08$	0,89
			Корреляция температуры и содержания SO ₄ ²⁻	$y = 1E+06x^6 - 1E+07x^5 + 5E+07x^4 - 1E+08x^3 + 1E+08x^2 - 1E+08x + 3E+07$	0,99

Данные таблиц 1 и 2 позволяют сделать следующие выводы:

1. Многолетняя изменчивость термобарических и эксплуатационных параметров термальных вод аппроксимируется полиномами с показателями достоверности аппроксимации $R^2 < 1$. Изменчивость гидрохимических параметров термальных вод имеет вид функциональных зависимостей, выраженных полиномами с показателями достоверности аппроксимации $R^2 = 1$. 2. Многолетняя изменчивость температуры, расхода и давления *лучше* аппроксимируется полиномами на моноклиналильном месторождении, чем на антиклиналильном. Показатели достоверности аппроксимации для минерализации одинаковы для обоих структурных типов. 3. Многолетняя изменчивость годового объема добычи термальных вод *лучше* аппроксимируется полиномами для моноклиналильного типа месторождения в *узком интервале* глубин залегания водоносного пласта, а для антиклиналильного типа – в *широком интервале глубин*. 4. Многолетняя изменчивость минерализации в моноклиналильном и антиклиналильном типах месторождений аппроксимируется одинаково. 5. Многолетняя изменчивость годового объема добычи термальных вод *лучше* аппроксимируется полиномами для *широких интервалов глубин* водоносного пласта в антиклиналильном месторождении, а для *узких интервалов глубин* – в моноклиналильном. 6. Корреляции температуры на устье и годового объема добычи *везде* более тесные для *наиболее узкого интервала* глубин водоносного пласта. 7. Корреляция температуры и минерализации *более тесная* на антиклиналильных месторождениях, чем на моноклиналильных. 8. Корреляция температуры на устье и жёсткости *более тесная* на моноклиналильном месторождении, чем на моноклиналильном. 9. *Корреляционные связи* многолетней изменчивости гидрохимических параметров с температурой, давлением, суточным расходом и годовым объёмом добычи аппроксимируются полиномами. Теснота корреляционных связей, определяемая *показателем достоверности аппроксимации* (где $R^2 \leq 1$) отдельных параметров, обусловлена мощностью водоносного пласта и зависит от принадлежности месторождения к моноклиналильному или антиклиналильному типу. Сравнение корреляций изменчивости температуры и годового объема добычи (узкий интервал) с содержанием анионов SO_4^{2-} указывает на относительно низкие корреляции в антиклиналильных месторождениях: ($R^2 \sim 0,6 \div 0,7$) и высокие ($R^2 \sim 0,94 \div 0,98$) – в моноклиналильных. Для корреляции SO_4^{2-} с давлением – наоборот: низкие корреляции ($R^2 \sim 0,63$) в моноклиналильных и высокие корреляции ($R^2 \sim 0,98$) в антиклиналильных месторождениях. 10. Корреляционные закономерности показывают, что чем меньше расход, тем больше температура на устье, и чем больше годовой отбор термальных вод, тем меньше температура. 11. Оптимизация эксплуатации геотермального месторождения должна строиться на использовании более тесных корреляционных связей температуры на устье с гидрохимическими параметрами, чем с эксплуатационными. Основной элемент технологической цепочки поддержания максимальной температуры на устье при отборе термальных вод должен обязательно включать контроль режимной изменчивости гидрохимических параметров и достижение оптимума эксплуатационного режима через корреляционные связи с гидрохимией в динамическом режиме.

Экономика комплексного освоения термоминеральных рассолов Дагестана (на примере Берикейского и Тарумовского месторождений).

А.Ш Гусейнова, А.М.Курбанов
ИГ ДНЦ РАН

Задача использования подземных минерализованных вод, в первую очередь добываемых попутно с нефтегазовой продукцией, в последние годы приобретает все больший интерес. Имеются основания полагать, что в перспективе внимание к этой задаче будет усиливаться. Этому способствуют с одной стороны, требования российского законодательства по комплексному использованию недр, с другой – возможность получения ценного минерального сырья с меньшими издержками, чем при использовании традиционных способов добычи, а также отдельных высокодефицитных продуктов, (йод, бром), которые практически могут быть получены только из подземных вод. Экологический эффект, достигаемый переработкой подземных вод состоит в ликвидации существенных отрицательных последствий сброса минерализованных попутных вод на поверхность земли и водоемы.

В Дагестане по результатам промыслово-гидрогеологических исследований сотен глубоких газонефтяных и ряда геотермальных скважин открыта и околонтурена крупнейшая в РФ провинция редкометалльных геотермальных рассолов, включающая ныне 56 потенциальных месторождения с промышленно-кондиционным содержанием лития, рубидия, цезия, бора, брома, йода, магния, калия, стронция и ряда минеральных солей (табл. 1), среди которых первоочередными объектами освоения являются Берикейское, Тарумовское месторождение и Южно-Сухокумская группа обводненных газонефтяных месторождений.