Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCI, 1982 г.

УДК 556.388.072

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАУЖЕТСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А.В.КИРЮХИН

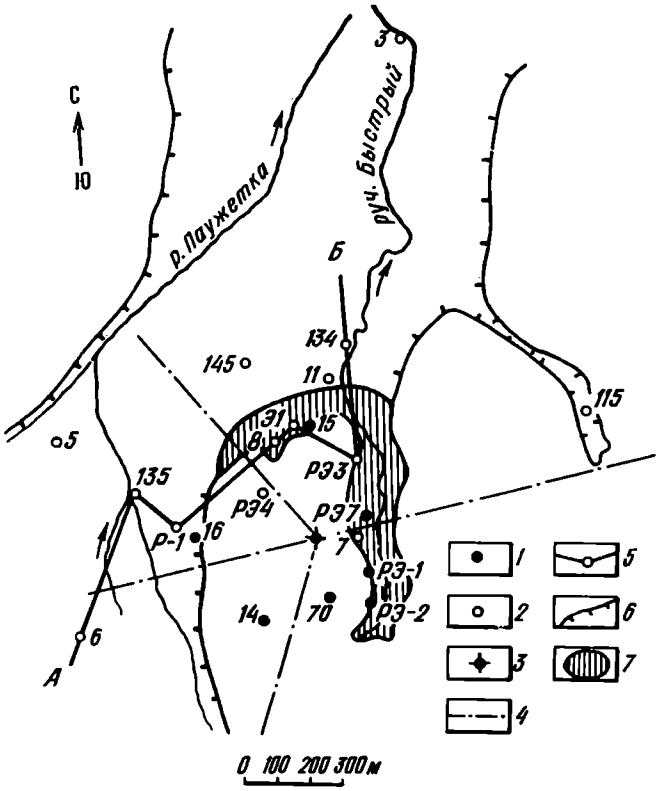


Рис.1. Гидрогеологические условия эксплуатационного участка (в плане)
1 и 2 – эксплуатационные и наблюдательные скважины; 3 – центр большого колодца; 4 – границы секторов; 5 – линия разреза; 6 – область распространения аллювиальных отложений, аккумулирующих грунтовые воды; 7 – область, в которой происходит перетекание из горизонта грунтовых вод в продуктивный пласт

В конце 1966 г. на Паужетском геотермальном месторождении начала работать ГеоТЭС. Промышленная разработка этого месторождения показала, что тепловой режим эксплуатационного участка изменяется весьма существенно, хотя по результатам первого опытно-эксплуатационного выпуска можно было надеяться на стабилизацию геотемпературных условий во время длительной эксплуатации. „Остывание" участка месторождения вызвано привлечением более холодных периферийных вод к водозабору и перетеканием из аллювиальных отложений через относительный водоупор в тех местах, где динамические уровни в продуктивном пласте оказались ниже уровня грунтовых

вод. Гидрогеологический анализ разработки месторождения включает оценку условий водного и теплового питания эксплуатационного участка на наблюдаемом интервале времени (1966-1980) и прогноз режима на последующие этапы эксплуатации.

Для решения поставленных задач гидрогеологические и геотермические условия эксплуатационного участка месторождения схематизированы следующим образом:

1. Совокупность эксплуатационных скважин в расчетной схеме теплопереноса в продуктивном пласте рассматривается как большой колодец, работающий с дебитом, равным суммарному дебиту эксплуатационных скважин и размещенный в центре водозабора (рис.1).

2. Геофильтрационные параметры продуктивного пласта осредняются по секторам, исходящим из центра большого колодца, т.е. предполагается, что в пределах сектора скорость фильтрации зависит только от расстояния до центра большого кольца. Всего выделяется четыре сектора: северный, западный, юго-западный и юго-восточный. Секторы являются, в некотором смысле, аналогами лент тока для обычных фильтрационных задач, имея в виду тяготение общей структуры потока к осесимметричной.

3. Верхний продуктивный пласт, сложенный псефитовыми и псаммитовыми туфами паужетской свиты ($N_2^2-O_1$ pau$_{4-2}$), описан в монографии [1]. Данные исследований показывают, что в пределах эксплуатационного участка мощность

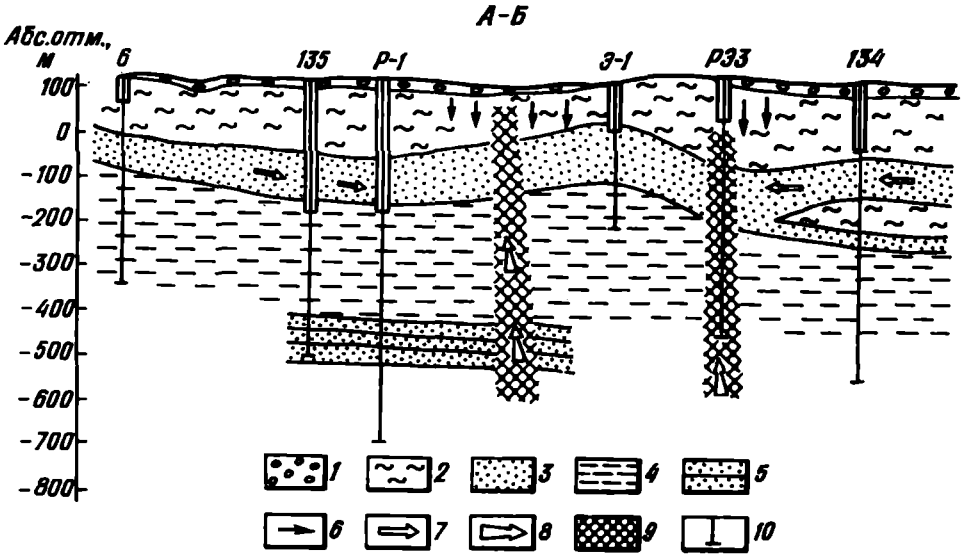


Рис.2. Гидрогеологические условия эксплуатационного участка (в разрезе)
1 - аллювиальные отложения; 2 - верхний относительный водоупор; 3 - верхний продуктивный пласт; 4 - нижний относительный водоупор; 5 - нижний продуктивный пласт; 6 - зоны локальной тектонической трещиноватости; 7, 8 и 9 - водные ресурсы, соответственно привлекаемые за счет упругих запасов верхнего продуктивного пласта, привлекаемые из глубины и за счет перетекания из аллювиальных отложений; 10 - скважина

продуктивной толщи можно усреднить: в пределах северного и западного секторов m = 90 м, юго-западного сектора m = 80 м.

Коэффициент объемной теплоемкости C продуктивного пласта экспериментально не определялся. При оценке геотермальных ресурсов Италии Маффлер и Каталди [3] использовали значение C = 0,6 кал/(см^3·°С) для вулканогенно-осадочных пород, вмещающих термальные воды. В расчетах принято это значение.

4. Мощность верхнего относительного водоупора m', сложенного алевропелитовыми туфами паужетской свиты (N_2-Q_1 pаи$_3$), изменяется по данным [I] от 120 до 200 м (рис.2). В расчетах принято m' = 160 м.

Коэффициент теплопроводности λ составляет $3{,}8 \cdot 10^{-3}$ кал/(см·с·°С) [I]. Коэффициент объемной теплоемкости примем равным 0,6 кал/(см^3·°С).

5. Нижний относительный водоупор в пределах эксплуатационного участка имеет мощность 200-300 м, он разделяет первый и второй от поверхности продуктивные пласты, взаимодействие между которыми осуществляется по зонам локальной тектонической трещиноватости.

6. Гидродинамический режим эксплуатации участка близок к квазистационарному, о чем свидетельствует линейная зависимость понижения в наблюдательных скважинах от $\ln t$ в течение последних 10 лет (здесь t - время).

7. Температура воды T в продуктивном пласте принимается равной средневзвешенному ее значению по всей мощности коллектора, или температуре, соответствующей энтальпии i эксплуатационной скважины, если эта скважина обсажена до подошвы верхнего водоупора. При этом условии понятия "температура в пласте" и "энтальпия эксплуатационной скважины" предполагаются тождественными.

8. Кондуктивным тепловым потоком через подошву коллектора по сравнению с таковым через кровлю можно пренебречь, учитывая, что температурный градиент на месторождении резко уменьшается с глубиной. Кондуктивный тепловой поток в пределах верхнего водоупора принят квазистационарным (за исключением тех участков, где возможна инфильтрация грунтовых вод).

9. Конвективные тепловые потоки в вертикальном направлении, за исключением участков верхнего водоупора, где возможна инфильтрация грунтовых вод, не учитываются.

10. В качестве характерного масштаба длины используется значение мощности коллектора m, в качестве масштаба времени t_0 = 1 год за исключением тех случаев, где этот масштаб специально оговаривается.

При количественном анализе условий водного питания будем предполагать, что эксплуатационные ресурсы Q состоят из ресурсов $Q_{гд}$, привлекаемых из глубины по зонам локальной тектонической трещиноватости, ресурсов $Q_{упр}$, привлекаемых за счет сработки упругих запасов в верхнем продуктивном пласте, и ресурсов $Q_{гр}$, привлекаемых за счет перетекания из аллювиальных отложений (см. рис.2). Взаимосвязь верхнего продуктивного пласта с рекой отсутствует, что установлено по данным режимных наблюдений.

Запишем уравнение теплопереноса [2] в продуктивном пласте с у
схематизации гидрогеологических и гидрогеотермических условий:

$$mc\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{Q_{упр}}{2\pi r}C_в\rho_в\frac{\partial T}{\partial r}+\lambda\frac{T}{m'}=0$$

с начальным распределением температур (на 1966 г.)

$$T\big|_{t=0}=T_0(r),$$

где $C_в$ - теплоемкость воды; $\rho_в$ - плотность воды; r - расстояние от центра большого колодца.

В уравнении (I) начальное распределение $T_0(r)$ предполагается ционарным, что можно обосновать наблюдающимся к 1966 г. восстановлением естественного геотемпературного режима, возмущенного опытными выпусками 1962-1963 гг.

В уравнениях (I) и (2) преобразуем к безразмерному виду ен

$$T+\frac{\beta}{r}\frac{\partial T}{\partial\tilde{r}}+\gamma\frac{\partial T}{\partial\tilde{t}}=0;$$

$$T(0,\tilde{r})=T_0(\tilde{r}),$$

где $\beta=m'Q_{упр}C_в\rho_в/2\pi\lambda m^2$, $\gamma=c\,mm'/\lambda t_c$; $\tilde{t}=t/t_c$ $\tilde{r}$

Решение задачи (3) получено нами в виде

$$T=T_0\left(\sqrt{\tilde{r}^2+\frac{2\beta}{\gamma}\tilde{t}}\right)e^{-\tilde{t}/\gamma}$$

Ввиду того, что на эксплуатационном участке среднее значение $\gamma=0$, с незначительной погрешностью мы можем пренебречь вторым сомножителем, тогда

$$T=T_0\left(\sqrt{\tilde{r}^2+\frac{2\beta}{\gamma}\tilde{t}}\right),$$

где

$$\frac{\beta}{\gamma}=\frac{C_в\rho_в}{C}\frac{t_0}{2\pi m^3}Q_{упр}. \qquad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) видно, что в процессе эксплуатации сдвиг относительно центра большого колодца происходит со скоростью

$$v=\frac{\beta}{\gamma\tilde{r}}=\frac{C_в\rho_в}{C}\frac{t_0}{2\pi m^3\tilde{r}}Q_{упр}.$$

Наоборот, если известна скорость сдвига изотерм, то из уравнения можно оценить ресурсы, привлекаемые за счет упругих запасов $Q_{упр}$. Если оценивается $Q_{упр}$ в пределах некоторого сектора, то вместо необходимо использовать радианную меру сектора.

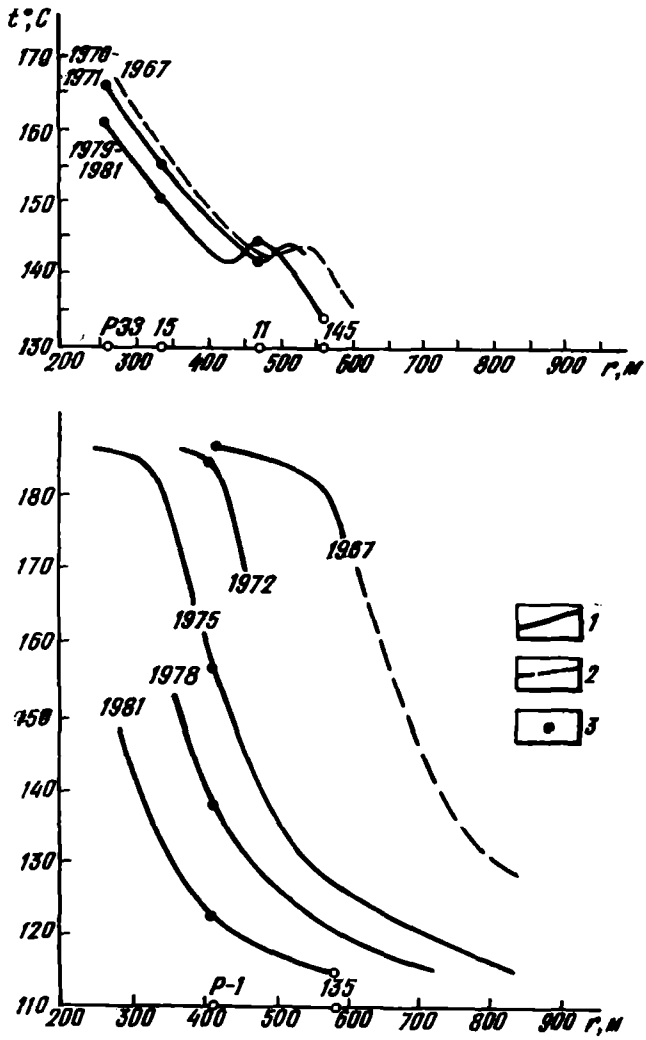


Рис.3. Сдвиг распределения температур относительно центра большого колодца в северном (а) и западном (б) секторах
1 и 2 - распределение получено в результате интерполяции и экстраполяции соответственно; 3 - скважина

Расчеты $Q_{упр}$, в которых использованы в качестве v значения, полученные в соответствии с рис.3, дают следующие результаты: юго-западный сектор - 13,4 л/с; западный сектор - 20,0 л/с; северный сектор - 6,4 л/с. Общее количество привлекаемых из этих секторов периферийных вод $Q_{упр}$ = 39,8 л/с.

С учетом погрешностей в задании исходных данных ресурсы, привлекаемые из юго-западного, западного и северного секторов за счет сработки упругих запасов, $Q_{упр}$ = $= 40^{\pm}18$ л/с.

Аналогично зависимости (I) происходят гидрохимические изменения в продуктивном пласте, однако, из-за того, что неизвестно значение эффективной пористости $n_э$ пласта, оценить величину $Q_{упр}$ на основе гидрохимических данных в настоящее время не представляется возможным.

Перетекание холодных грунтовых вод через водоупор происходит в долине р.Паужетки и ручья Быстрого (см. рис.I), где уровни в продуктивном пласте снизились настолько, что проникновение этих вод становится возможным. О том, что этот процесс происходит, свидетельствует охлаждение верхнего водоупора, которое фиксируется термограммами наблюдательных скважин 7, 8, Э-I. Характер термограмм в скважинах Р-I и II исключает возможность проникновения грунтовых вод через водоупор на тех участках, где эти скважины расположены. Исходя из этого, на рис.I ограничена область площадью 110000 м^2, в которой происходит перетекание через верхний водоупор.

Чтобы оценить скорость перетекания, запишем уравнение теплового баланса в водоупоре за время $t_1 - t_0$:

$$\int_{t_0}^{t_1} q_{конд}(t)\,dt - v_{гр}\,\Delta t\, c_в\, \rho_в\,(T_1 - T_0) = \int_0^m c\,(T(t_1, z) - T(t_0, z))\,dz, \qquad (8)$$

где $\int_{t_0}^{t_1} q_{конд}(t)\,dt$ - притоки кондуктивного тепла в водоупор из коллектора, где сохраняется постоянная температура за счет фильтрации в нем горячей воды. Если понизить (мгновенно) температуру в верхнем водоупоре на Δt, то общее поступление кондуктивного тепла из коллектора за время t $2\lambda\Delta T\sqrt{t\,c/\pi\lambda}$ Второй член в уравнении (8) выражает количество тепла, израсходованное на нагрев перетекающей воды, а правая часть - изменение теплосодержания всего водоупора. Уравнение (8) позволяет рассчитать скорость перетекания $v_{гр}$. При расчетах принято: T_1 - температура в коллекторе, T_0 - температура грунтовых вод в естественном состоянии (T_0 = 10 °С), Δt - половина изменения средневзвешенной температуры на расчетное время.

По расчетам годовой слой перетекающей воды оказался равным для скважины 7 - 0,98 м при среднем уровне ниже устья 6,58 м (1971-1974), для скважины 8 - 1,02 м при уровне 9,77 м (1969-1972). Зная площадь области инфильтрации, найдем средний расход привлекаемых к водозабору грунтовых вод за период 1969-1974 гг. $Q_{гр} \approx 3{,}5$ л/с.

Если бы падение теплосодержания эксплуатационных скважин было связано лишь с привлечением холодных вод с периферии и перетеканием грунтовых вод через водоупор в продуктивный пласт, то после исключения скважины из эксплуатации в продуктивном пласте по стволу скважины наблюдалась бы температура, соответствующая теплосодержанию на заключительном этапе эксплуатации. Однако в действительности температура в коллекторе выше. Это свидетельствует о том, что низкотемпературная вода, содержащаяся в верхнем относительном водоупоре, подсасывается в скважину на необсаженном интервале выше кровли продуктивного горизонта из-за разряжения, возникающего при образовании пароводяной смеси. Аналогичный процесс происходит в скважине II, в которой зафиксирована средняя температура по коллектору (после выключения из эксплуатации), превышающая температуру на заключительном этапе эксплуатации. Сопоставление температур в скважинах I6 и Р-I, находящихся рядом, говорит о том, что через необсаженную часть в ствол скважины I6 также поступает холодная вода.

С другой стороны анализ наблюдений позволяет утверждать, что в скважины I4, I5, 20, РЭ-I, РЭ-7 холодные воды не поступают.

Расчеты по уравнению смешения показывают, что приток холодных грунтовых вод через необсаженную часть скважин в пределах водоупора составлял по эксплуатационному участку I4,7 л/с (на 1979 г.).

Перейдем к оценке ресурсов глубинных вод, привлекаемых к водозабору. В принятой схеме под глубинными водами понимаются те воды, которые подтекают к эксплуатационному участку из юго-восточного сектора, захватывающего наиболее прогретые близповерхностные участки гидротермальной системы.

и воды, подтекающие к эксплуатационному участку из нижних горизонтов, насыщенных горячими водами, по зонам тектонических нарушений. Объединить эти воды под одним названием удобно при прогнозе теплового режима, так как теплосодержание их вряд ли изменится во время эксплуатации. Итак, учитывая, что средняя производительность водозабора составляла в 1972-1979 гг. 144 л/с, полученные ранее значения $Q_{упр}$, $Q_{гр}$, $Q_{с}$ и соотношение $Q = Q_{упр} + Q_{гл} + Q_{с} + Q_{гр}$, получим, что $Q_{гл} = 85 \pm 18$ л/с.

Тепловой режим оценивается по изменению во времени средневзвешенной энтальпии *некоторой совокупности эксплуатационных скважин. В период с* 1972 по 1979 гг. на эксплуатационном участке непрерывно работали скважины 14, 15, 16, 20, РЭ-1, РЭ-2, РЭ-3, которые обеспечивали не менее 77 % общего расхода на участке. Скважины Э-1, 10, 11, 13, РЭ-5, РЭ-6 включались эпизодически, поэтому говорить об их режиме затруднительно. Из числа первых семи скважин придется также исключить скважины 16, РЭ-2, РЭ-3, на тепловой режим которых существенно влияет приток охлажденной воды через некачественную или недостаточно глубокую обсадку. Таким образом изучается тепловой режим скважин 14, 15, 20, РЭ-1. Очевидно

$$i = \frac{Q_{упр}}{Q} i_{упр} + \frac{Q_{гл}}{Q} i_{гл} + \frac{Q_{гр}}{Q} i_{гр}. \qquad (9)$$

Учитывая оценки $Q_{упр}$, $Q_{гл}$, $Q_{гр}$ и предполагая, что соотношение $Q_{упр} : Q_{гл} : Q_{гр}$ останется для совокупности рассматриваемых скважин таким же, как и для всего эксплуатационного участка, и не будет изменяться в будущем, что обосновывается одинаковыми темпами снижения уровня на скважинах 6 и Р-1, оборудованных соответственно на верхний и нижний продуктивный горизонты, получим

$$i = (0,31 \pm 0,14)\ i_{упр} + (0,65 \pm 0,14)\ i_{гл} + 0,03\ i_{гр}. \qquad (10)$$

Предполагается, что теплосодержание горячих вод, привлекаемых из недр гидротермальной системы к водозабору, останется неизменным в течение всего периода эксплуатации, и, что оно определится средневзвешенным теплосодержанием в момент начала эксплуатации. Сохранение температуры горячих вод можно обосновать продолжительностью существования Паужетской гидротермальной системы - 10000 лет (В.В.Аверьев). Для рассматриваемых скважин $i_{гл}$ = 182,5 ккал/кг.

Как показали режимные наблюдения в скважинах 7 и 8, температура воды, поступающей в пласт, стабилизируется на уровне 160-170 °С в результате взаимной компенсации охлаждающего влияния инфильтрации и усиливающегося кондуктивного притока тепла снизу. Учитывая также малый вклад $i_{гр}$ в i мы получим небольшую погрешность (не более 0,15 %), принимая $i_{гр}$ = 165 ккал/кг.

$i_{упр}$ представляет собой средневзвешенную сумму $i^{к}_{упр}$ по секторам (k - индекс сектора):

$$i_{упр} = \sum_{k=1}^{3} \frac{Q^{к}_{упр}}{Q} i^{к}_{упр}, \qquad (11)$$

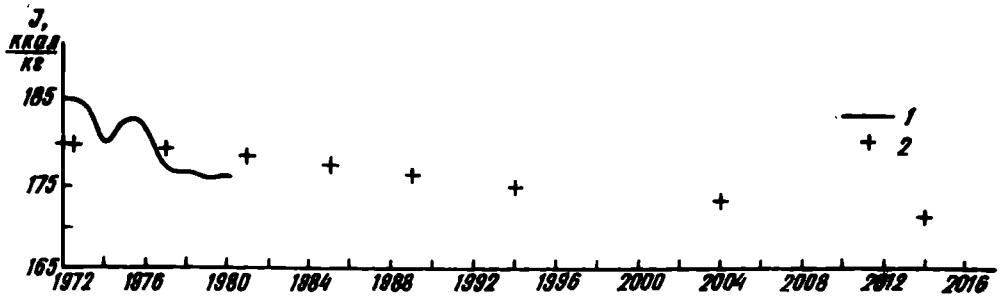


Рис.4. Тепловой режим скважин 14, 15, 20, РЭ-1 эксплуатационного участка Паужетского геотермального месторождения
1 - график изменения средневзвешенного теплосодержания в период эксплуатации; 2 - прогнозный график с погрешностью ±4 ккал/кг

где $i^{к}_{упр}$ определяется по формуле (9) при r = 1,5 (среднее расстояние прогнозируемых скважин от центра большого колодца).

Расчеты по уравнению (10) с учетом (11) позволяют дать прогноз теплового режима совокупности эксплуатационных скважин 14, 15, 20, РЭ-1 при условии, что схема эксплуатации месторождения останется такой же, как и в 1979 г. (рис.4).

Выводы

1. Изучение условий водного питания эксплуатационного участка показало, что 59±13 % обеспечивается водами из глубины, 27±13 % привлекается из периферийных участков первого от поверхности продуктивного пласта (за счет сработки упругих запасов), 3 % - за счет перетекания грунтовых вод через верхний водоупор и 10 % воды поступает в эксплуатационные скважины из-за недостаточно глубокой обсадки.

2. На основе схематизации гидрогеологических условий и исследованной схемы водного питания эксплуатационного участка предложена модель теплового режима участка. Она дает возможность сделать прогноз изменения средневзвешенной энтальпии четырех скважин (14, 15, 20, РЭ-1). В соответствии с этим прогнозом падение средневзвешенной энтальпии за 50 лет эксплуатации составит 9±4 ккал/кг при условии, что схема водоотбора останется неизменной.

3. Более высокие темпы охлаждения остальных скважин эксплуатационного участка объясняются проникновением холодных вод в скважины из-за недостаточно глубокой обсадки.

4. Необходимо поставить дополнительные опытные работы по прямым методам определения эффективной пористости и объемной теплоемкости пород продуктивных горизонтов Паужетского геотермального месторождения, так как от этих параметров существенно зависит качество прогноза теплового режима.

5. Полученные оценки теплового режима позволяют с оптимизмом смотреть на высокотемпературные геотермальные месторождения типа Паужетского как

на источник геоэлектрической энергии при условии рациональной конструкции эксплуатационных скважин (обсадка до подошвы верхнего водоупора).

ЛИТЕРАТУРА

1. Паужетские горячие воды на Камчатке / Под ред. В.М.Сугробова. М., Недра, 1965.

2. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М., Высшая школа, 1964.

3. C a t a l d i R., M u f f l e r P. Assessment of geothermal potential of central and southern Tuscany. Roma, 1977.