Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVII, вып. 1, 1975 г.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТЕПЛА ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ГЛУБОКОГО БУРЕНИЯ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЕГО ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Канд. техн. наук *Ю. М. Парийский*
(Ленинградский горный ин-т)

Современный научно-технический прогресс требует все более полного освоения и рационального использования природных ресурсов. Наряду с использованием других видов энергии и топлива, важным энергетическим резервом являются геотермические ресурсы. По мере развития науки и техники расширяются возможности извлечения глубинного тепла Земли. Широко известен положительный опыт практического использования термальных вод, пара и пароводяных смесей в СССР, Италии, Новой Зеландии, Исландии и других странах для выработки электроэнергии, горячего водоснабжения, теплофикации и в других целях. Однако парогидротермы являются хотя и самыми доступными, но далеко не единственными источниками подземного тепла. Напротив, они представляют лишь незначительную долю геотермических ресурсов. Значительно большим запасом тепла обладает твердая фаза земной коры — горные породы, аккумулировавшие тепло земных недр. Развитие техники и технологии бурения скважин, способствующее изучению все более глубоких горизонтов земной коры и накоплению фактического материала по геотермии, создает необходимые научно-технические предпосылки для практического освоения этих огромных запасов энергии.

Однако решающее преимущество этого вида подземного тепла обусловлено не его количеством, а характером распространения. В отличие от парогидротерм, представляющих собой локализованные «месторождения» глубинного тепла, геотермические ресурсы горных пород распространены повсеместно, что обеспечивает возможность создания источника тепловой энергии в любом районе, где в этом есть необходимость и экономическая целесообразность. Это существенно повышает народнохозяйственное значение геотермических ресурсов.

Исследования новых способов извлечения глубинного тепла, аккумулированного горными породами, осуществляются в ЛГИ совместно с рядом других научных учреждений. Предложены два типа циркуляционных систем извлечения тепла Земли — с продольными и объемными зонами фильтрации*. Наибольшей эффективностью и простотой

* Ю. Д. Дядькин и др. Перспективы использования тепла Земли в технологических процессах горнопромышленного производства. Колыма, 1969, № 5.

отличаются системы с объемной зоной фильтрации, создаваемой в непроницаемом или слабопроницаемом породном массиве мощными камуфлетными взрывами в глубоких скважинах (рис. 1). В зависимости от заданной теплопроизводительности Q, срока службы τ, мощности единичного заряда W, глубины подземного теплового котла H и конкретных условий сооружения такие системы могут включать одну или несколько зарядных скважин n_c и различное количество зарядов m, размещаемых в каждой из них.

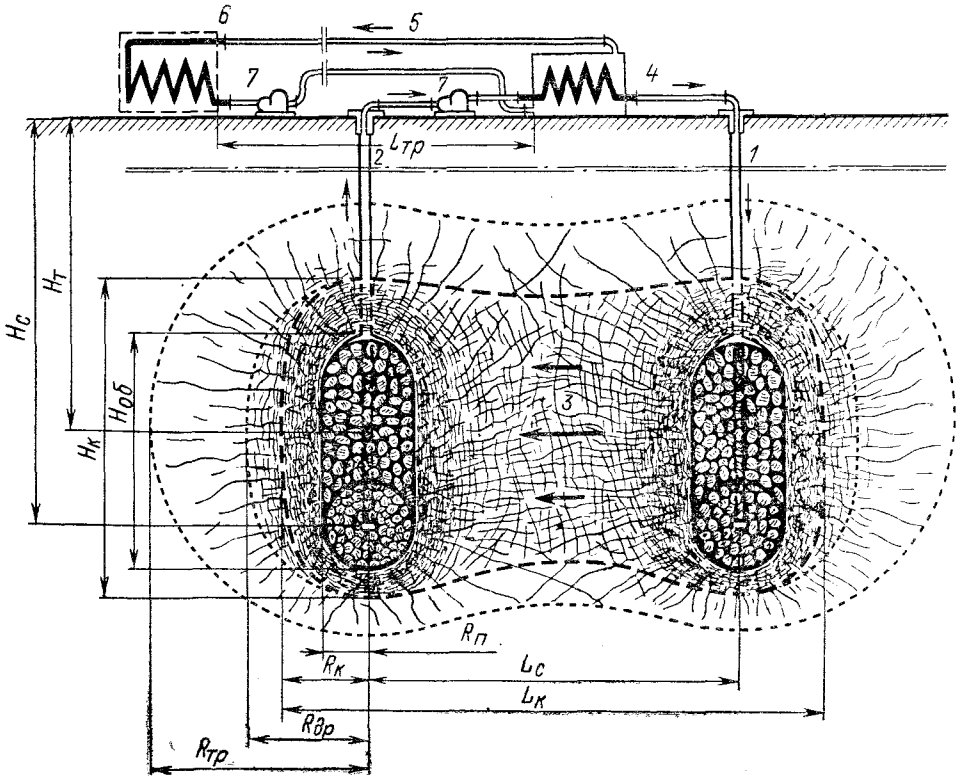


Рис. 1. Принципиальная схема конструкции циркуляционной системы извлечения тепла Земли:

1 — нагнетательная скважина; *2* — эксплуатационная скважина; *3* — зона фильтрации подземного теплового котла; *4* — теплообменник; *5* — теплотрасса; *6* — потребитель тепла; *7* — циркуляционные насосы; $R_п$ — радиус полости; R_k — радиус зоны активной фильтрации с граничной проницаемостью k на ее контуре; $R_{др}$ — радиус зоны дробления; $R_{тр}$ — радиус зоны трещинообразования; $H_{об}$ — высота «трубы обрушения»; H_k — высота зоны активной фильтрации; H_c — глубина скважин; $H_т$ — средняя глубина подземного теплового котла; L_c — расстояние между скважинами; L_k — длина зоны активной фильтрации; $L_{тр}$ — длины теплотрассы

В любом случае циркуляционная система извлечения тепла земной коры представляет собой весьма сложный технический комплекс и требует значительных затрат. При наличии других весьма разнообразных способов теплоснабжения вполне очевидно, что вопрос об экономической эффективности глубинного тепла не может иметь однозначного решения. Поэтому выяснение условий, при которых извлечение тепла Земли будет экономически целесообразным, имеет принципиальное значение для оценки перспектив нового источника тепловой энергии.

Эта задача может быть решена с помощью известной методики определения сравнительной экономической эффективности сопоставляемых вариантов по величине приведенных затрат:

$$З = C + E_н K, \qquad (1)$$

где C — себестоимость единицы продукции или текущие годовые затраты, руб.; $E_н$ — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; K — удельные капиталовложения в расчете на единицу или на суммарный годовой объем выпуска товарной продукции, руб.

Если величину приведенных затрат на получение 1 *Гкал* тепла Земли обозначить $З$, а те же затраты на получение тепла другим каким-либо способом, принятым за базовый вариант $З^*$, то условием экономической эффективности циркуляционных систем будет соотношение

$$З < З^*, \tag{2}$$

а экономический эффект извлечения тепла Земли составит

$$Э = (З^* - З)\, Q_{год}, \tag{3}$$

где $Q_{год}$ — годовая выработка тепла, *Гкал*.

Сопоставляемые варианты при этом должны обеспечивать одинаковый народнохозяйственный результат и находиться в равных условиях по исходным нормативам.

Проанализируем структуру приведенных затрат в сопоставляемых вариантах теплоснабжения. Капиталовложения на сооружение циркуляционных систем извлечения тепла Земли включают в себя затраты на бурение и оборудование скважин K_1; затраты на насосную установку, обеспечивающую циркуляцию теплоносителя в системе и транспортировку тепла к потребителю K_2; затраты на теплообменник и затраты на сооружение и монтаж теплотрассы K_4:

$$\Sigma K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4. \tag{4}$$

Текущие затраты состоят из затрат на электроэнергию для прокачки теплоносителя в циркуляционной системе и теплотрассе C_1; затрат на текущий ремонт и амортизационных отчислений C_2; заработной платы обслуживающего персонала C_3; затрат на материалы и прочих расходов C_4:

$$\Sigma C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4. \tag{5}$$

Тогда приведенные затраты можно представить следующим образом:

$$З = \frac{\Sigma C + E_н \Sigma K}{Q_{год}} = З_э + З_{эк} + З_к, \tag{6}$$

где $З_э$ — энергетическая составляющая приведенных затрат; $З_{эк}$ — эксплуатационная составляющая затрат (удельные текущие затраты на зарплату, материалы и прочие расходы); $З_к$ — капитальная составляющая затрат.

В свою очередь,

$$З_э = a_э q_э; \tag{7}$$

$$З_{эк} = \frac{C_3 + C_4}{Q_{год}}; \tag{8}$$

$$З_к = \frac{(E_н + P_а)\, \Sigma K}{Q_{год}}, \tag{9}$$

где $a_э$ — стоимость электроэнергии, руб./*квт·ч*; $q_э$ — удельный расход электроэнергии, *квт·ч*/*Гкал*; $P_а$ — норма амортизационных отчислений с учетом затрат на текущий ремонт.

Приведенные затраты в базовом варианте теплоснабжения, естественно, будут зависеть от реализуемого способа получения тепловой энергии. Необходимо подчеркнуть, что при выборе базового варианта теплоснабжения следует ориентироваться прежде всего на известную и хорошо отработанную схему, для которой имеются вполне проверенные данные по расчетным затратам $З^*$. При этом необходимо учитывать тенденции к снижению этих затрат по мере совершенствования оборудования и применяемой технологии. В наибольшей мере этим требованиям отвечает в условиях рассматриваемой задачи использование в качестве базового варианта теплоснабжающих котельных, работающих на органическом топливе. Приведенные затраты на получение тепла в котельных можно представить следующим образом:

$$З^* = З^*_т + З^*_{эк} + З^*_к, \qquad (10)$$

где $З^*_т$ — топливная составляющая, определяющая все затраты на добычу, транспорт и обработку топлива; $З^*_{эк}$ — эксплуатационная составляющая (текущие затраты); $З^*_к$ — капитальная составляющая.

Определенный интерес для оценки перспектив извлечения тепла Земли представляет также сопоставление его технико-экономических показателей с расчетными показателями атомных теплоснабжающих установок. Для расчета приведенных затрат в этом случае может быть использована зависимость (10), однако при определении топливной составляющей должны быть учтены специфические особенности атомных энергетических установок (критическая масса горючего, воспроизводство ядерного горючего в процессе его деления, дополнительные затраты на оболочки тепловыделяющих элементов и т. п.).

Очевидно соотношение (2) не будет удовлетворяться во всех случаях. Будет ли это достаточным основанием для отрицательной оценки перспектив извлечения тепла Земли? Такое заключение было бы преждевременным и во многих случаях неверным. Дело в том, что, в отличие от других энергетических установок, системы извлечения тепла Земли характеризуются значительно более широким диапазоном изменения своих технических параметров при заданном уровне производительности. В соответствии с изменением технических параметров (глубины скважин, объема подземного теплового котла, расхода воды в системе и т. п.) меняются и затраты на извлечение тепла. Это вызывает необходимость предварительной оптимизации технических или конструктивных параметров системы по минимуму приведенных затрат. Лишь после такой оптимизации можно сопоставить показатели системы с базовым вариантом теплоснабжения.

Выбор оптимальной схемы производства по минимуму затрат на единицу продукции является распространенной технико-экономической задачей, встречающейся в различных областях техники. Однако ее решение, особенно для систем извлечения тепла Земли, сопряжено со значительными трудностями, вызванными большим числом определяющих факторов, сложными физическими связями, обусловливающими изменение затрат, изменчивостью исходных экономических показателей во времени. Все это требует применения различных численных методов анализа с использованием электронно-вычислительных машин. Наиболее распространен метод перебора «шаговых» значений переменных, который позволяет, сопоставляя расчетные затраты, полученные на ЭВМ для каждого сочетания независимых переменных, отыскать такую комбинацию параметров, которая характеризуется минимальными приведенными затратами.

Указанный метод был применен в ЛГИ для оптимизации конструктивных и технологических параметров на основе экономико-математи-

ческой модели систем извлечения тепла Земли (см. рис. 1). В результате перебора 50 тысяч комбинаций с различными значениями переменных были выявлены варианты систем, обеспечивающие заданные уровни теплопроизводительности при температуре теплоносителя $t_в$ не менее 40° С и характеризующиеся минимальными приведенными затратами на 1 *Гкал* тепла (см. таблицу).

Основные показатели оптимизированных вариантов циркуляционных систем производительностью 15 Гкал/ч при $n_c = 2$

Номер варианта	Конструктивные параметры			Технологические параметры		Экономические показатели	
	H, км	W, кт	m	$t_в$, град	τ, лет	ΣK, млн. руб.	$З$, руб./Гкал
9	2	50	5	45,3	8	4,34	9,4
29	2	100	3	45,3	14	4,82	9,3
49	2	150	2	45,3	10	5,56	9,7
69	2	200	2	45,3	14	5,93	10,0
89	2	250	2	45,3	16	6,22	10,5
10	3	50	5	51,5	16	6,75	10,2
30	3	100	3	72,3	20	7,10	10,2
50	3	150	2	72,3	20	7,32	10,3
70	3	200	2	39,7	20	8,43	10,6
90	3	250	1	72,3	20	7,45	10,8
11	4	50	4	50,7	20	10,72	14,3
31	4	100	2	46,1	18	10,75	14,3
51	4	150	2	78,7	20	11,66	14,6
71	4	200	1	99,3	20	11,10	14,7
91	4	250	1	99,3	20	11,58	14,8
12	5	50	4	66,8	20	18,22	21,2
32	5	100	2	125,5	20	18,01	21,4
52	5	150	1	97,6	20	17,56	21,9
72	5	200	1	125.5	20	18,18	22,0
92	5	250	1	125,5	20	18,74	22,4

Однако метод перебора переменных в силу дискретного характера их изменения дает возможность получить лишь приближенное решение оптимизационной задачи, точность которого зависит от принятого диапазона и величины «шага» изменения независимых переменных.

Наиболее общим подходом к решению технико-экономических оптимизационных задач характеризуются методы, основанные на применении теории подобия в инженерно-экономических расчетах, в частности, метод базовой точки*. Сущность его заключается в объединении множества исходных физико-технических и экономических показателей в небольшое число обобщенных безразмерных комплексов, называемых критериями подобия, через которые выражается уравнение приведенных затрат как функция искомого параметра. Находя обычным способом минимум этой функции, определяем оптимальное значение искомого параметра как функцию критериев подобия. Покажем применение метода базовой точки на примере оптимизации системы извлечения тепла Земли по одному из важнейших технических параметров — глубине скважин, определяющему, в основном, ее экономические показатели.

По заданным значениям теплопроизводительности системы, геотермического градиента в данном районе и единичной мощности зарядов с учетом принятой схемы их расположения можно предварительно

* Ю. Д. Арсеньев. Теория подобия в инженерных экономических расчетах. Высшая школа, 1967.

определить возможный диапазон изменения глубины скважин и принять произвольное, но технически оправданное значение этого параметра. Назовем его базовым значением H', а все показатели, относящиеся к этому варианту системы (базовой точке), будем обозначать штрихом. Для базовой точки необходимо выполнить все физические расчеты, используя как можно более строгие зависимости, имеющиеся в распоряжении, а также технико-экономический расчет. Очевидно, для базовой точки уравнение приведенных затрат будет иметь вид

$$З' = З'_э + З'_{эк} + З'_к. \tag{11}$$

Перейдем от абсолютных значений базовых затрат к их относительным значениям, разделив обе части уравнения на $З'$,

$$1 = \overline{З}'_э + \overline{З}'_{эк} + \overline{З}'_к, \tag{12}$$

где $\overline{З}'_э$, $\overline{З}'_{эк}$, $\overline{З}'_к$ — постоянные величины, зависящие от выбранной базовой величины H' и исходных стоимостных и физико-технических показателей.

При расчете методом базовой точки оперируют не абсолютным, а относительным изменением величин. Относительное изменение затрат, например, выражается следующим образом:

$$\delta З = \frac{З - З'}{З'} = \frac{З}{З'} - 1. \tag{13}$$

Наряду с этим, относительное изменение затрат с учетом формулы (12) можно выразить так:

$$\delta З = \overline{З}' \delta З_э + \overline{З}'_{эк} \delta З_{эк} + \overline{З}'_к \delta З_к. \tag{14}$$

Здесь $\delta З$ представлено в виде суммы членов, состоящих из произведения постоянного базового множителя $\overline{З}'_i = \frac{З'_i}{З'}$ на его относительное изменение $\delta З_i = \frac{З_i}{З'_i} - 1$.

Для нахождения $\delta З_э$, $\delta З_{эк}$ и $\delta З_к$ используем зависимости (7), (8) и (9). При постоянной стоимости электроэнергии $\delta З_э = \delta q_э$ и неизменной теплопроизводительности из (9) получаем $\delta З_к = \delta K$, где K — удельные капиталовложения, руб./*Гкал*. При постоянной теплопроизводительности относительное изменение эксплуатационной составляющей невелико, и в приближенных расчетах можно принимать $\delta З_{эк} = 0$.

Тогда

$$\delta З = \overline{З}'_э \delta q_э + \overline{З}'_к \delta K. \tag{15}$$

Разделив обе части уравнения на $\overline{З}'_к$, получим исходное уравнение в критериальном виде

$$y_к = \delta K + \vartheta'_к \delta q_э, \tag{16}$$

где $y_к = \frac{\delta З}{\overline{З}_к}$ — безразмерная функция, подлежащая минимизации (целевая функция); $\vartheta'_к = \frac{\overline{З}'_э}{\overline{З}'_к}$ — критерий экономического подобия.

Таким образом, размерное уравнение (6), зависящее от многих исходных показателей, удалось свести к критериальному уравнению

(16), зависящему в данном случае от одного критерия подобия, определяемого из расчета базового варианта. Важно отметить, что величина $y_к$ не зависит от значений $\overline{З}_э$ и $\overline{З}'_к$, а определяется только величиной критерия $\vartheta'_к$, что свидетельствует о применимости уравнения (16) к целому классу систем, характеризуемых неизменностью этого критерия.

Уравнение (16) весьма отчетливо выражает также конкуренцию между отдельными группами составляющих расчетных затрат, определяющих выбор оптимальных параметров, в данном случае между удельными капиталовложениями и затратами на электроэнергию. Однако уравнение (16) еще не показывает в явном виде зависимости целевой функции от интересующего нас параметра δH — относительного изменения глубины скважин.

Рассмотрим составляющие капиталовложений, определяемые уравнением (4). В диапазоне глубин 2000—4000 *м* стоимость 1 *м* скважин, как показывает анализ промысловых данных, возрастает с увеличением глубины приблизительно по параболической зависимости. Тогда капитальные затраты на бурение скважин можно выразить следующим образом:

$$K_1 = (a + bH + cH^2)\,Hn = zn, \tag{17}$$

где a, b, c — постоянные коэффициенты, характеризующие изменение стоимости 1 *м* скважины с глубиной; n — количество скважин; $z = (a + bH + cH^2)H$ — параметрическая функция.

При постоянном значении n

$$\delta K_1 = \delta z = A'_0 F_0 + A'_1 F_1 + A'_2 F_2, \tag{18}$$

где

$$A'_0 = \frac{a}{a + bH' + c(H)^2}; \quad A'_1 = \frac{bH'}{a + bH' + c(H')^2};$$

$$A'_2 = \frac{c\,(H')^2}{a + bH' + c(H')^2} \text{ — базовые постоянные;}$$

$F_0 = \delta H$, $F_1 = (1+\delta H)^2 - 1$, $F_2 = (1+\delta H)^3 - 1$ — функции параметра H.

Капитальные затраты на насосную установку K_2 можно считать пропорциональными потребляемой мощности N, т. е.

$$K_2 = a_1 + b_1 N, \tag{19}$$

где a_1, b_1 — коэффициенты, определяемые по прейскурантным данным.

Тогда

$$\delta K_2 = \frac{1}{1 + \dfrac{a_1}{b_1 N'}}\,\delta N = A'_3\,\delta N, \tag{20}$$

где $A'_3 = \dfrac{1}{1 + \dfrac{a_1}{b_1 N'}}$ — так называемый локальный коэффициент, зависящий от экономических показателей a_1 и b_1 и базового значения N'.

В свою очередь, затраты мощности можно представить в виде суммы

$$N = N_1 + N_2 + N_3, \tag{21}$$

где N_1, N_2 и N_3 — соответственно, затраты мощности на прокачку жидкости в скважинах, подземном тепловом котле и теплотрассе. Учитывая, что гидравлические сопротивления в скважинах и в трубопроводе при турбулентном режиме течения пропорциональны квадрату расхода жидкости G, а при фильтрации жидкости в подземном тепловом котле в условиях действия закона Дарси они будут пропорциональны расходу жидкости в первой степени, получим

$$N_1 = a_2 G^3 H; \quad N_2 = b_2 G^2; \quad N_3 = c_2 G^3 L, \tag{22}$$

где a_2, b_2, c_2 — постоянные коэффициенты, характеризующие гидравлические сопротивления, соответственно, в скважинах, подземном тепловом котле и теплотрассе; L — длина теплотрассы, $м$.

При постоянной теплопроизводительности системы расход жидкости обратно пропорционален глубине скважин (определяющей температуру пород и, следовательно, значение $t_в$), что может быть выражено соотношением

$$G = \frac{1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 H}, \tag{23}$$

где ε_1 и ε_2 — коэффициенты пропорциональности.

Относительное изменение затрат мощности на прокачку жидкости

$$\delta N = \overline{N_1}\,\delta N_1 + \overline{N_2}\,\delta N_2 + \overline{N_3}\,\delta N_3, \tag{24}$$

где $\overline{N_i} = \frac{N_i'}{N'}$ — относительные доли различных затрат мощности в базовом варианте.

Для определения δN_1 и δN_2 введем параметрические функции $z_1 = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 H)^3}{H}$ и $z_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 H)^2$. Тогда, учитывая, что $\frac{z_i'}{z_i} = 1 + \delta z_i$, получим

$$\begin{aligned} \delta N_1 &= \frac{z_1'}{z_1} - 1 = \frac{1}{1 + \delta z_1} - 1 \approx -\delta z_1; \\ \delta N_2 &= \frac{z_2'}{z_2} - 1 = \frac{1}{1 + \delta z} - 1 \approx -\delta z_2. \end{aligned} \tag{25}$$

В свою очередь,

$$\begin{aligned} \delta z_1 &= \left(1 + \frac{\delta H}{1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2 H'}}\right)^3 \frac{1}{1 + \delta H} - 1 \approx \left(\frac{2 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2 H'}}{1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2 H'}}\right)(1 - \delta H)\,\delta H; \\ \delta z_2 &= \left(1 + \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2 H'}}\right)^2 - 1 \approx \frac{2}{1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2 H'}}\,\delta H. \end{aligned} \tag{26}$$

Здесь использованы характерные для метода базовой точки аппроксимации, позволяющие отбрасывать при переходе к рядам приращения высших порядков малости вида $(\delta z_i)^2$, $(\delta z_i)^3$, $\delta z_1 \cdot \delta z_2$ и т. п. Подставив значения δz_1 и δz_2 из (26) в выражение (25), получим

$$\delta N_1 = A_4' F_3; \quad \delta N_2 = A_5' F_4, \tag{27}$$

где $A_4' = \dfrac{2-\dfrac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2 H'}}{1+\dfrac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2 H'}}$, $A_5' = \dfrac{2}{1+\dfrac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2 H'}}$ — базовые постоянные;

$F_3 = -(1-\delta H)\delta H$, $F_4 = -\delta H$ — функции параметра H.

Составляющая N_3 затрат мощности является сложной функцией глубины скважин, поскольку она зависит не только от расхода жидкости G, но и от длины теплотрассы L. В свою очередь, длина теплотрассы является функцией глубины заложения зарядов, так как последняя в совокупности с мощностью зарядов определяет эффект сейсмического действия подземного взрыва. Минимально допустимая длина теплотрассы определяется выражением

$$L = \sqrt{R_c^2 - H^2}, \tag{28}$$

где R_c — радиус сейсмического воздействия, соответствующий безопасному уровню скоростей ударной волны; H — глубина заложения зарядов.

Для получения выражения δN_3 введем параметрические функции $z_3 = R_c^2 - H^2$ и $z_4 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 H)^3$. Тогда

$$\delta N_3 = \sqrt{\frac{z_3}{z_3'} \cdot \frac{z_4'}{z_4}} - 1 = \frac{\sqrt{1+\delta z_3}}{1+\delta z_4} - 1 \approx$$

$$\approx \left(1+\frac{\delta z_3}{2}\right)(1-\delta z_4) - 1 \approx \frac{\delta z_3}{2} - \delta z_4. \tag{29}$$

Определив обычным способом δz_3 и δz_4, получим

$$\delta N_3 = A_6' F_5 + A_7' F_6, \tag{30}$$

где $A_6' = \dfrac{1}{2\left[\left(\dfrac{R_c}{H'}\right)^2 - 1\right]}$; $A_7' = \dfrac{3}{1+\dfrac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2 H'}}$; $F_5 = 1-(1+\delta H)^2$; $F_6 = -\delta H$.

Таким образом, с учетом (24), (27) и (30), имеем

$$\delta K_2 = A_3' A_4' F_3 + A_3' A_5' F_4 + A_3' A_6' F_5 + A_3' A_7' F_6. \tag{31}$$

Капиталовложения на теплообменник можно считать пропорциональными его теплообменной поверхности S, которая, в свою очередь, при постоянной теплопроизводительности системы пропорциональна расходу воды G. Если $K_3 = a_3 + b_3 S$ и $S = c_3 G$, то, применяя известные уже приемы и используя зависимость (23), получим

$$\delta K_3 = A_8' F_7, \tag{32}$$

где

$$A_8' = \frac{1}{\left(1+\dfrac{a_3}{b_3 S'}\right)\left(1+\dfrac{\varepsilon_1}{\varepsilon H'}\right)}; \quad F_7 = -\delta H.$$

Капиталовложения на теплотрассу пропорциональны ее длине, т. е.

$$K_4 = a_4 + b_4 L = a_4 + b_4 \sqrt{R_c^2 - H^2}\,. \tag{33}$$

Тогда

$$\delta K_4 = \frac{1}{1 + \dfrac{a_4}{b_4 L'}}\,\delta L, \quad \text{а} \quad \delta L = \frac{1 - (1 + \delta H)^2}{2\left[\left(\dfrac{R_c}{H'}\right)^2 - 1\right]}\,. \tag{34}$$

Таким образом,

$$\delta K_4 = A_9' F_8, \tag{35}$$

где

$$A_9 = \frac{1}{2\left(1 + \dfrac{a_4}{b_4 L'}\right)\left[\left(\dfrac{R_c}{H'}\right)^2 - 1\right]}; \quad F_8 = 1 - (1 + \delta H)^2.$$

Если суммарные капиталовложения в базовой точке были равны K′, а их относительные доли составляли $\overline{K}'_1$, $\overline{K}'_2$, $\overline{K}'_3$ и $\overline{K}'_4$, то относительное изменение капитальных затрат при изменении глубины скважин с учетом (18), (31), (32) и (35) будет равно

$$\delta K = \overline{K}'_1 \delta K_1 + \overline{K}'_2 \delta K_2 + \overline{K}'_3 \delta K_3 + \overline{K}'_4 \delta K_4 = \overline{K}'_1 A'_0 F_0 + \overline{K}'_1 A'_1 F_1 +$$
$$+ \overline{K}'_1 A'_2 F_2 + \overline{K}'_2 A'_3 A'_4 \overline{N}'_1 F_3 + \overline{K}'_2 A'_3 A'_5 \overline{N}'_2 F_4 + \overline{K}'_2 A'_3 A'_6 \overline{N}'_3 F_5 +$$
$$+ \overline{K}'_2 A'_3 A'_7 \overline{N}'_3 F_6 + \overline{K}'_3 A'_8 F_7 + \overline{K}'_4 A'_9 F_8. \tag{36}$$

Удельный расход электроэнергии на прокачку жидкости в системе

$$q_э = q_1 + q_2 + q_3, \tag{37}$$

где q_1, q_2, q_3 — соответственно, удельные расходы электроэнергии на прокачку жидкости в скважинах, подземном тепловом котле и теплотрассе.

Их относительные изменения равны относительным изменениям мощности

$$\delta q_э = \overline{q}'_1 \delta q_1 + \overline{q}'_2 \delta q_2 + \overline{q}'_3 \delta q_3 = \overline{N}'_1 A'_4 F_3 + \overline{N}'_2 A'_5 F_4 + \overline{N}'_3 (A'_6 F_5 + A'_7 F_6). \tag{38}$$

Подставляя (36) и (38) в исходное уравнение (16), после необходимых преобразований получим

$$y_к = \psi'_0 F_0 + \psi'_1 F_1 + \psi'_2 F_2 + \psi'_3 F_3 + \psi'_4 F_4 + \psi'_5 F_5 + \psi'_6 F_6 + \psi'_7 F_7 + \psi'_8 F_8, \tag{39}$$

где

$$\psi'_0 = \overline{K}'_1 A'_0; \quad \psi'_1 = \overline{K}'_1 A'_1; \quad \psi'_2 = \overline{K}'_1 A'_2; \quad \psi'_3 = A'_4 \overline{N}'_1 (\overline{K}'_2 A'_3 + \vartheta'_к);$$
$$\psi'_4 = A'_5 \overline{N}'_2 (\overline{K}'_2 A'_3 + \vartheta'_к); \quad \psi'_5 = A'_6 \overline{N}'_3 (\overline{K}'_2 A'_3 + \vartheta'_к);$$
$$\psi'_6 = A'_7 \overline{N}'_3 (\overline{K}'_2 A'_3 + \vartheta'_к); \quad \psi'_7 = \overline{K}'_3 A'_8; \quad \psi'_8 = \overline{K}'_4 A'_9.$$

Таким образом, критериальное уравнение затрат выражается суммой произведений двух функций ψ'_i и F_i, из которых первая зависит

от исходных технических и экономических показателей, а вторая — только от изменения оптимизируемого параметра H. Некоторую трудность в решении этого уравнения представляет возросшее число критериев подобия. Их количество можно сократить, если проанализировать связи между функциями F_i. Легко заметить, что

$$F_0 = -F_4 = -F_6 = -F_7, \quad F_1 = -F_5 = -F_8. \tag{40}$$

Тогда

$$y_к = (\psi_0' - \psi_4' - \psi_6' - \psi_7')F_0 + (\psi_1' - \psi_5 - \psi_8')F_1 + \psi_2' F_2 + \psi_3' F_3. \tag{41}$$

Разделив обе части уравнения на наибольший по величине коэффициент при F_i (в нашем случае на ψ_2'), получим

$$y = \vartheta_0' F_0 + \vartheta_1' F_1 + F_2 + \vartheta_3' F_3, \tag{42}$$

где $y = \dfrac{\delta З}{З_к' \psi_2'}$ — целевая функция, подлежащая минимизации;

$\vartheta_1' = \dfrac{\psi_1' - \psi_5' - \psi_8'}{\psi_2'}$; $\vartheta_0' = \dfrac{\psi_0' - \psi_4' - \psi_6' - \psi_7'}{\psi_2'}$ и $\vartheta_3' = \dfrac{\psi_3'}{\psi_2'}$ — критерии экономического подобия.

Положим $H/H^1 = x$. Тогда $\delta H = x - 1$ и уравнение (42) можно представить в виде

$$y = (x^3 - 1) + (\vartheta_1' + \vartheta_3')(x^2 - 1) + (\vartheta_0' - 3\vartheta_3')(x - 1). \tag{43}$$

Критерии ϑ_0', ϑ_1' и ϑ_3', как видно из уравнения (43), образовали комплексы, которые сами являются критериями подобия.

Обозначим

$$(\vartheta_1' + \vartheta_3') = \vartheta_1 \quad \text{и} \quad \vartheta_0' - 3\vartheta_3' = \vartheta_2.$$

Тогда

$$y = (x^3 - 1) + \vartheta_1 (x^2 - 1) + \vartheta_2 (x - 1). \tag{44}$$

Дифференцируя (44) по x и приравнивая производную нулю, получим

$$3x^2 + 2\vartheta_1 x + \vartheta_2 = 0,$$

откуда

$$x = \frac{-\vartheta_1 + \sqrt{\vartheta_1^2 - 3\vartheta_2}}{3}. \tag{45}$$

Для проверки полученных зависимостей были использованы результаты оптимизации систем извлечения тепла Земли методом перебора переменных (см. таблицу). Критерии подобия определены по данным варианта № 30, принятого за базовую точку, для которого был сделан сметно-финансовый расчет. Получены следующие значения критериев подобия: $\psi_0' = 0{,}52$, $\psi_1' = -0{,}77$, $\psi_2' = 0{,}95$, $\psi_3' = 0{,}067$, $\psi_4' = 0{,}266$, $\psi_5' = 0{,}004$, $\psi_6' = 0{,}102$, $\psi_7' = 0{,}005$, $\psi_8' = 0{,}034$. Рассчитанные по этим значениям критерии ϑ_1 и ϑ_2 соответственно равны —0,78 и —0,055, а $x = 0{,}55$. Это значит, что оптимальное значение глубины скважин для заданной производительности системы и принятых значений других независимых переменных должно быть меньше, чем в базовой точке

(из таблицы видно, что вариант № 29 на глубине 2000 *м* отличается меньшими приведенными затратами). Полученному значению x соответствует глубина $H=xH'=1900$ *м*, что свидетельствует о близкой сходимости результатов оптимизации по различным методикам. Для уточнения оптимальной глубины скважин необходимо провести второй цикл расчета, приняв в базовой точке полученное значение $H=1900$ *м* и добиться значения x в диапазоне 0,8—1,2, что будет свидетельствовать об окончании оптимизации.

Весьма важным достоинством метода базовой точки является возможность получения критерия для оценки оптимальности того или иного варианта системы. Оптимальной глубине скважин $H=H'$ соответствует $x=1$. Подставляя это значение x в (45), получим

$$\vartheta_1 = -\frac{3+\vartheta_2}{2}. \qquad (46)$$

Условие (46) позволяет путем подсчета критериев ϑ_1 и ϑ_2, характеризующих тот или иной проект, легко выбрать оптимальный вариант системы или наметить направления оптимизации.

До сих пор речь шла об оптимизации системы извлечения тепла Земли лишь по одному параметру. В действительности экономические показатели систем являются сложной функцией многих переменных. В общем случае они зависят от принятой конструктивной схемы системы, определяющей количество скважин n_c и зарядов m, размещаемых в каждой из них, от теплопроизводительности системы Q, срока ее службы τ, глубины скважин H, длины теплотрассы L, мощности единичного заряда W, значения проницаемости k на контуре подземного теплового котла, определяющего расстояние между нагнетательными и эксплуатационными скважинами, а также ряда физических и экономических характеристик.

Многопараметрические оптимизационные задачи могут также решаться методом базовой точки. В этом случае рекомендуется использовать способ так называемого покоординатного спуска, который позволяет уточнять оптимальные значения параметров последовательными циклами пересчета.

При оптимизации системы извлечения тепла Земли в качестве основных технологических и конструктивных параметров приняты переменные Q, τ, H, W и k (рис. 2). Исходными данными для оптимизации являются заявка на источник тепловой энергии определенной производительности, физические характеристики условий сооружения системы (геотермический градиент, механические и теплофизические свойства горных пород и т. п.), а также экономические показатели (стоимость бурения глубоких скважин, электроэнергии, нормы амортизационных отчислений и т. п.). На основании исходных данных осуществляется эскизная проработка проекта и выбирается перспективная схема извлечения тепла Земли. Если таких схем оказывается несколько, то оптимизация проводится по каждой из них, и окончательный выбор осуществляется путем сопоставления оптимума одной схемы с оптимумом другой. Центральным моментом оптимизации является создание рациональной математической модели, отражающей необходимые для расчета системы физические и технико-экономические связи с учетом физических, технических и технологических ограничений параметров. Математическая модель должна отражать зависимость каждой из составляющих расчетных затрат от всех оптимизируемых параметров. В связи со значительным объемом математических расчетов оптимизация параметров систем требует применения электронно-вычислительной техники, возможности которой должны быть учтены при разработке программ вычислений.

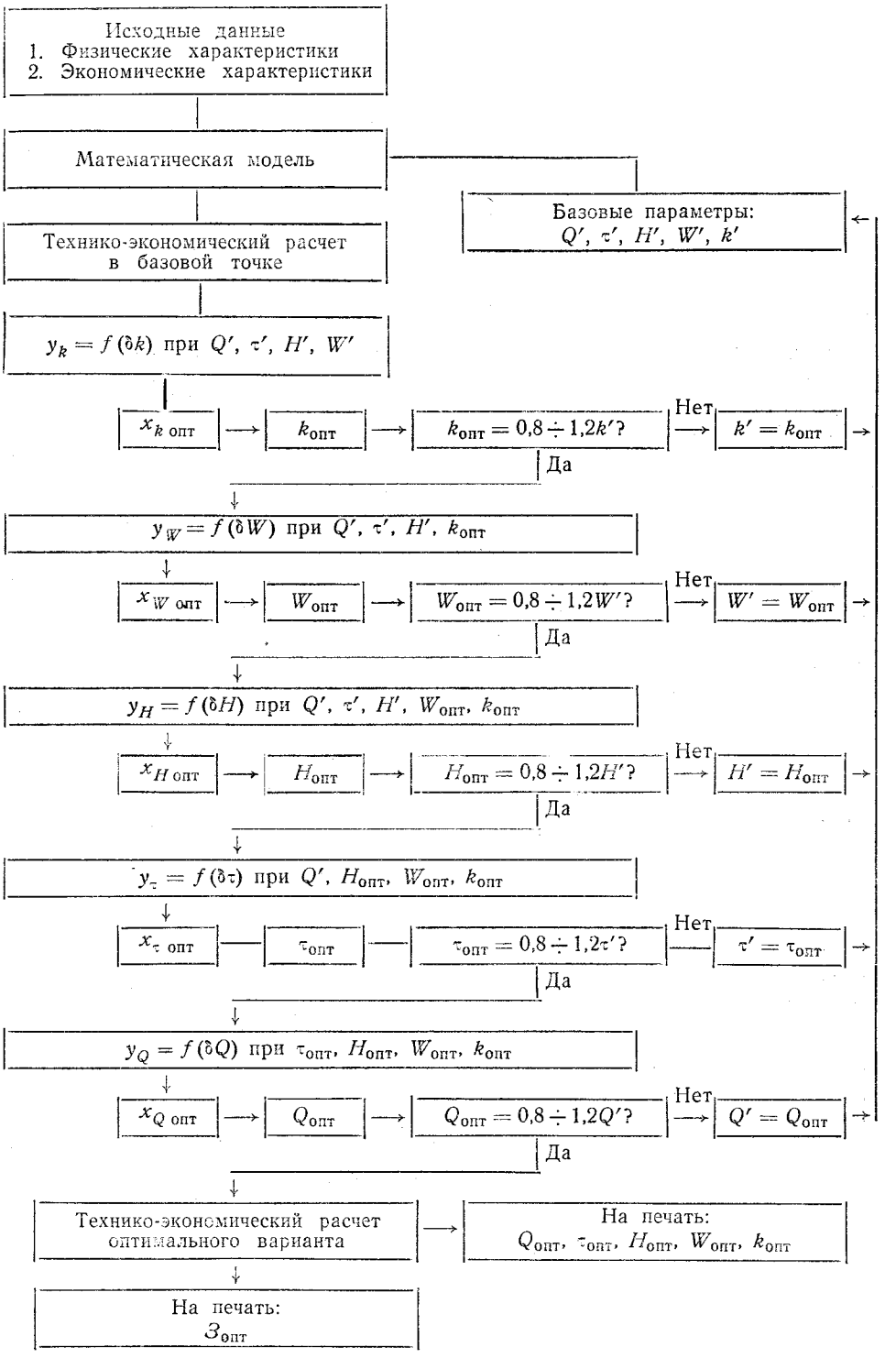


Рис. 2. Схема оптимизации параметров системы извлечения тепла Земли способом покоординатного спуска

В выборе начальной базовой точки имеется большая свобода, так как сама по себе она не влияет на значения оптимальных параметров. Этот выбор может быть сделан тремя способами: 1) за базовую точку может быть взят уже рассчитанный проект; 2) при отсутствии последнего за базовые значения могут быть первоначально приняты средние из максимальных и минимальных значений параметров; 3) за базовые значения можно также принять предельные значения параметров, определяемые по физическим или техническим условиям осуществления системы.

Начальные базовые параметры совместно с исходными данными вводятся в математическую модель, где они могут быть откорректированы с учетом наложенных на систему ограничений. Полученные в результате этого расчета значения параметров используются в технико-экономическом расчете базового варианта. Затем начинается собственно оптимизация параметров системы, выполняемая способом покоординатного спуска. После решения каждого критериального уравнения полученное оптимальное значение параметра сопоставляется с базовым. Если оно выходит за допустимый диапазон ($x \neq 0{,}8 \div 1{,}2$), производится следующий цикл расчета, в котором за базовое принимается оптимальное значение параметра первого цикла. При этом новое базовое значение параметра вводится в математическую модель, блок технико-экономического расчета и все предшествующие критериальные уравнения расчетных затрат. Циклы расчетов повторяются до тех пор, пока не будут получены оптимальные значения всех искомых параметров, которые выводятся на печать. По этим значениям производится технико-экономический расчет оптимального варианта, результаты которого также выводятся на печать. По результатам расчета может быть сделано сопоставление принятой схемы извлечения тепла Земли с другими схемами или с конкурирующим способом теплоснабжения и получен окончательный вывод о целесообразности ее применения.

Предварительные расчеты показывают, что экономически эффективное извлечение тепла Земли с помощью циркуляционных систем при современном уровне техники возможно в районах с острым дефицитом тепла и высокой стоимостью топлива, что характерно для многих районов Крайнего Севера. Для условий Чукотки, например, где стоимость топлива составляет 100—120 руб. за 1 *т* условного топлива, приведенные затраты на извлечение глубинного тепла с помощью циркуляционных систем оказались в 2—4 раза ниже, чем при производстве тепла в котельных, и примерно на одинаковом уровне с проектными показателями атомных теплоснабжающих установок. Это открывает разнообразные возможности эффективного использования глубинного тепла, в частности, для удовлетворения потребностей горнодобывающей промышленности районов Крайнего Севера. Использование глубинного тепла Земли в таких характерных для этой промышленности технологических процессах, как оттайка мерзлых пород, промывка золотоносных песков, способствовало бы значительному повышению эффективности горного производства в этих районах.