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

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРНОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

Доктор техн. наук *Ю. Д. Дядькин*
(Ленинградский горный ин-т)

На современном этапе научно-технического прогресса недра Земли все полнее вовлекаются в сферу общественного производства, возрастает роль горной науки, расширяется круг ее проблем.

Ускоренный рост добычи полезных ископаемых неизбежно приводит к освоению месторождений, расположенных в сложных природных условиях — на больших глубинах, в зоне вечной мерзлоты, под водоемами, на дне моря и т. д.

Успешно развиваются и получают промышленное применение новые способы разрушения горных пород и различные физико-химические методы бесшахтной добычи полезных ископаемых.

Быстро увеличиваются масштабы специальных горных и буровых работ в гидротехнике, при создании различных подземных сооружений, систем водоснабжения, извлечения тепла земной коры, захоронения вредных продуктов и т. д.

Отмеченные тенденции существенно изменяют традиционные представления об объектах, задачах и методах горной науки. Наряду с дальнейшим ее развитием в технологическом и экономическом аспектах, особое значение приобретают горнофизические исследования, т. е. изучение механических, акустических, тепловых, гидродинамических, электромагнитных и других физических процессов и явлений, так или иначе связанных с горными работами.

Горная теплофизика — сравнительно новая область горной науки, задачей которой является изучение тепловых процессов в массиве горных пород, горных выработках и скважинах для управления этими процессами в целях повышения эффективности и безопасности горных и других работ, связанных с использованием недр.

К числу наиболее актуальных проблем горной теплофизики можно отнести: прогноз и регулирование теплового режима рудников, шахт и специальных подземных сооружений; создание систем извлечения и использования тепла Земли в горнодобывающей промышленности и энергетике; управление тепловым режимом разведочных, сверхглубоких и эксплуатационных скважин; развитие термических методов бурения и разрушения горных пород; интенсификацию оттаивания мерзлых горных пород при разработке россыпей и при открытых горных работах; повышение эффективности замораживания водоносных горных пород при сооружении шахт, метрополитенов и т. п.; теплофизическое обоснование технологии, параметров и режимов бесшахтной добычи полезных ископаемых; развитие термических методов интенсификации добычи

нефти и газа; реконструкцию условий тепло-массопереноса при образовании гидротермальных, магматогенных и нефтяных месторождений для рациональной их разработки и др.

Ленинградский горный институт является одним из ведущих научных центров горной теплофизики, выполняющих широкие исследования почти по всем указанным выше проблемам.

В данной статье будут рассмотрены лишь некоторые научные результаты, относящиеся к тепловому режиму шахт и извлечению глубинного тепла Земли.

Тепловой режим глубоких шахт и рудников. В СССР исследования теплового режима шахт были начаты в 30-е годы по инициативе академика А. А. Скочинского. В послевоенный период они получили широкое развитие во многих научных учреждениях и особенно в Институте технической теплофизики АН УССР под руководством академика АН УССР А. Н. Щербаня [8, 9, 10], который возглавляет советскую школу горной теплофизики и в настоящее время, при резком расширении ее проблематики.

Вопросы рудничного теплообмена имеют большое значение прежде всего для Донецкого угольного бассейна. Здесь 21 шахта работает на глубине 800—1000 *м*, а шахта им. Бажанова — на глубине 1200 *м*; строится и проектируется большое число шахт на глубину до 1400—1600 *м*. Уже сейчас охлаждение воздуха применяется на 20 шахтах, а в 1975 г. число таких шахт возрастает примерно до 60 (750 забоев).

В недалеком будущем холодильные установки потребуются для ряда Криворожских железных рудников, а также для Садонского, Тырныаузского, Миргалимсайского и других рудников цветной металлургии, работающих пока на глубине 700—1000 *м*.

По рекомендациям ЛГИ начато проектирование воздухоохладительных установок для новых рудников Талнахского и Октябрьского месторождений Норильска, которые со временем станут самыми глубокими (до 1500—1800 *м*) в Советском Союзе.

Важной задачей горной теплофизики является дальнейшее совершенствование методов теплового расчета глубоких шахт и рудников. В настоящее время наибольшее распространение получили расчетные формулы А. Н. Щербаня и О. А. Кремнева [9, 10]. К сожалению, они не позволяют достаточно точно учесть сезонные колебания температуры воздуха t в выработках глубоких горизонтов, а также его теплообмен с транспортируемым по выработкам ископаемым и проложенными по ним трубопроводами.

В основе метода А. Ф. Воропаева [1] лежит определение максимального и минимального значений t по амплитуде температурных колебаний A_t после определения среднегодового уровня температуры в расчетных пунктах. Однако формулы для расчета A_t предполагают затухание колебаний t под влиянием теплообмена воздушного потока с породным массивом, без должного учета процессов массообмена и других тепловыделений, участвующих в формировании теплового режима горных выработок.

Разработанная нами методика тепловых расчетов [2] направлена на устранение указанных недостатков. Уточненные с учетом исследований последних лет расчетные зависимости имеют вид:

$$t_2 = t_1 \exp(-Al) + DKl + \left(DT_1 + \frac{B - DK}{A}\right)\left[1 - \exp(-Al)\right], \ ^\circ\text{C}; \quad (1)$$

$$\Theta_2 = t_2 - \frac{t_2 - t_1}{A_w l} - \left(t_1 - \Theta_1 - \frac{t_2 - t_1}{A_w l}\right)\exp(-A_w l), \ ^\circ\text{C}; \quad (2)$$

где

$$A = \frac{1}{m}(k_\tau U + k_т b_т G_т + k_{тр} U_{тр}); \tag{3}$$

$$m = G\left(c_р + rn\varphi_2 \frac{760}{P_2}\right); \tag{4}$$

$$G = 3600 v \gamma S; \tag{5}$$

$$D = \frac{k_\tau U}{A m}; \tag{6}$$

$$K = \frac{T_2 - T_1}{l}; \tag{7}$$

$$B = \frac{1}{m}(\Sigma q + k_т b_т G_т T_т + k_{тр} U_{тр} \Theta_{ср} - G r d_1 \beta); \tag{8}$$

$$\Sigma q = q_a + U q_0(\tau) + b_т G_т q_0(\tau_т) + q_т G_т + q_{э.м} + q_р \frac{n_р}{l}; \tag{9}$$

$$q_a = \frac{G(H_2 - H_1)}{427 l}; \tag{10}$$

$$\beta = \frac{P_1 \varphi_2 - P_2 \varphi_1}{P_2 \varphi_1 l}; \tag{11}$$

$$A_w = \frac{k_{тр} U_{тр}}{c_w W}; \tag{12}$$

H_1, T_1, P_1, φ_1, t_1, Θ_1 и H_2, T_2, P_2, φ_2, t_2, Θ_2 — соответственно, глубина, *м*; температура пород, °С; давление, *мм* рт. ст.; относительная влажность, доли единицы; температура воздуха и температура воды (рассола, охлажденного воздуха и т. п.) в трубопроводе в начале и конце горной выработки, °С; l и U — ее длина и периметр поперечного сечения, *м*; G, W и $G_т$ — соответственно, расход воздуха и воды в трубопроводе, *кг/ч*, при его внешнем периметре $U_{тр}$, *м*, и грузопоток добытого ископаемого, *т/ч*, начальная температура которого в забое составляла $T_т$, °С; $\tau_т$ — время транспортирования к середине расчетного участка, *ч*; $b_т G_т$ — средняя ширина, где для вагонеток $b_т \approx 0{,}001$, для конвейеров $b_т \approx 0{,}016$; $c_р$ и c_w — теплоемкость воздуха и воды в трубопроводе, *ккал/кг·град*; d_1 — влагосодержание воздуха в начале выработки, *г/кг*; r — скрытая теплота испарения воды, *ккал/г*; $q_0(\tau)$ и $q_0(\tau_т)$ — тепловыделения от окислительных процессов, *ккал/м²·ч*, отнесенные к поверхности выработки со сроком службы τ или к транспортируемому ископаемому для времени $\tau_т$; $q_т$ — тепловыделения от работы транспорта, *ккал/т·м*, приблизительно равные 0,215 при электровозной откатке, 0,6 при работе ленточных и 2,5 скребковых конвейеров; $q_{э.м}$ — тепловыделения от работающих в выработке машин и электрических потерь, *ккал/ч·м*; $q_р$ и $n_р$ — теплоотдача рабочего, *ккал/ч*, и их число в выработке; k_τ, $k_т$ и $k_{тр}$ — коэффициенты нестационарного теплообмена для породного массива, транспортируемого ископаемого и коэффициент теплопередачи для трубопровода, *ккал/м²·ч·град*; n — коэффициент из приближенной зависимости $d = f(t)$ при $\varphi = 1$ и $P = 760$[2].

Расчет теплового режима шахты или рудника начинается с определения по формулам (1) и (2) среднегодовых значений температур t' и Θ' в цепи горных выработок, имеющих срок службы $\tau > 8760$ *ч* (больше одного года).

При этом k_τ определяется по формуле [3]

$$k_\tau = 0{,}75\,\frac{\alpha^{0{,}06}\,\lambda^{0{,}94}}{R_0^{0{,}48}\,(a\tau)^{0{,}23}}, \tag{13}$$

где λ и a — коэффициенты теплопроводности, *ккал/м·град·ч*, и температуропроводности, $м^2/ч$, горных пород; $R_0 \approx 0{,}564\sqrt{S}$ — эквивалентный радиус, *м*, поперечного сечения выработки S; α — коэффициент теплоотдачи стенок выработки, $ккал/м^2 \cdot град \cdot ч$, определяемый по известной методике [8].

Методика определения коэффициента нестационарного теплообмена для транспортируемого ископаемого изложена в работе [3].

Для определения t_2 в выражении (8) приближенно принимается

$$\Theta_{ср} \approx \Theta_1 + 0{,}5 A_w\, l\,(t_1 - \Theta_1). \tag{14}$$

Перед расчетом Θ_2 подсчитывается средняя температура поверхности выработки

$$T_{ст} = 0{,}5\left[t_1 + t_2 + \frac{k_\tau}{\alpha}\,(T_1 + T_2 - t_1 - t_2)\right], \tag{15}$$

а значение $k_{тр}$ дополняется радиационной составляющей

$$\alpha_р = 4{,}4\,\frac{(2{,}73 + 0{,}01 T_{ст})^4 - (2{,}73 + 0{,}01\Theta_{ср})^4}{0{,}5\,(t_1 + t_2) - \Theta_{ср}}. \tag{16}$$

После определения Θ_2 среднее значение $\Theta_{ср}$ уточняется, и при его существенном отличии от (14) расчеты повторяются.

При расчете среднегодовых значений t' учитывается постепенное охлаждение породного массива, имевшего при $\tau = 0$ естественную температуру T_0, а в формуле (1) принимается $T_1 = T_{0,1}$ и $T_2 = T_{0,2}$.

Для определения температуры воздуха в любой момент времени при колебаниях t в течение года учтено очевидное положение о близости среднегодовых температур рудничного воздуха и прилегающих к выработке пород, а в формуле (1) принимается:

$$T_1 = t_1' + \frac{k_\tau}{\alpha}\,(T_{0,1} - t_1'); \tag{17}$$

$$T_2 = t_2' + \frac{k_\tau}{\alpha}\,(T_{0,2} - t_2'). \tag{18}$$

В результате моделирования теплообменных процессов для этих условий получена зависимость [3]

$$k_{\tau'} \approx \frac{1 + 0{,}7\lambda}{10 + 5{,}6 R_0}\left[6{,}4 + 0{,}1\alpha + \frac{T_{0,1} + T_{0,2}}{T_1 + T_2} + 3\left(1 + 1{,}2\,\frac{\tau'}{w}\right)\operatorname{ctg}\frac{2\pi\tau'}{w}\right], \tag{19}$$

где τ' — время от последнего перехода t через среднегодовое значение (15 апреля или 15 октября); w — период температурных колебаний, равный 8760 *ч*.

Для выработок с общим сроком службы менее года ($\tau < 8760$) значения k_τ определяются по номограмме О. А. Кремнева [9] при расчетах как среднегодовых, так и текущих значений t.

В табл. 1 приведены результаты определения по формуле (1) среднегодового, летнего и зимнего значений температуры воздуха в конце конвейерного уклона при следующих условиях: $l=1000$; $H_1=850$; $H_2=1000$; $T_{0,1}=33,5$; $T_{0,2}=38,5$; $\varphi_1=0,85$; $\varphi_2=0,9$; $P_1=837$; $P_2=850$; $c_p=0,24$; $r=0,59$; $S=10$; $U=12,8$; $v=2$; $W=0$; $\tau=3\times8760$; $\tau'=2190$; $\lambda=2,2$; $a=0,0044$; $G_т=50$; $T_т=38$; $R_т=0,05$; $b_т=0,016$; $\tau_т=1,5$; $v_т=1$; $q_т=0,6$; $q_0(\tau)=4,5$; $q_0(\tau_т)=25$; $q_{эм}=5$; $q_р=250$ и $n_р=6$. Для сравнения в табл. 1 показаны результаты теплового расчета в тех же условиях по методикам А. Н. Щербаня и О. А. Кремнева [10] и А. Ф. Воропаева [1].

Таблица 1

Результаты теплового расчета горной выработки

t_1, °С	Расчетные значения t_2, °С		
	по методу Щербаня и Кремнева	по методу Воропаева	по формуле (1)
	Среднегодовые		
20	24,4 * / 22,2	25,4 / 22,8	23,5 / 22,2
	Середина лета		
23	25,1 / 24,0	27,6 / 25,0	24,9 / 23,6
	Середина зимы		
17	22,9 / 21,4	25,2 / 20,6	20,8 / 19,1

Как и следовало ожидать, среднегодовые значения t_2', рассчитанные по любому из сравниваемых методов, различаются несущественно, чего никак нельзя сказать о результатах определения максимальных и минимальных температур.

Следует заметить, что ни одно из известных решений не позволяет надежно прогнозировать тепловой режим выработок при изменяющихся за период τ схемах и интенсивности их проветривания. Сложным является учет в тепловых расчетах утечек и подсосов воздуха. Недостаточно изучены условия массообмена и интенсивность тепловыделений от окислительных процессов с учетом их зависимости от времени и температуры. Требует дальнейшего развития методика тепловых расчетов очистных забоев при системах разработки рудных месторождений с магазинированием, твердеющей закладкой и т. д. От успешного решения этих актуальных задач горной теплофизики в значительной мере будет зависеть эффективность управления тепловым режимом шахт и рудников при дальнейшем углублении горных работ.

Тепловой режим шахт и рудников в зоне вечной мерзлоты. Область распространения многолетнемерзлых горных пород занимает почти 50% территории СССР. Здесь разведаны многочисленные месторождения различных полезных ископаемых, с освоением которых в значительной мере связано дальнейшее развитие горнодобывающей промышленности нашей страны.

Вечная мерзлота — тепловое явление. Поэтому использование методов горной теплофизики в рассматриваемых специфических условиях

* В числителе при $G_т=50$, в знаменателе при $G_т=0$.

открывает широкие возможности повышения безопасности и совершенствования технологии подземных и открытых горных работ.

Для создания надежной методики теплового расчета шахт и рудников в зоне вечной мерзлоты необходимо решить ряд сложных теплофизических задач, связанных со знакопеременным характером тепло- и массообмена и участием в этих процессах скрытой теплоты оттаивания и промерзания пород, сублимации и кристаллизации влаги и т. д. В последние годы приближенное решение этих задач найдено в Ленинградском горном институте [2].

При усреднении и подстановке численных значений ряда мало изменяющихся физических параметров получена, в частности, упрощенная расчетная формула

$$t_2 = t_2' - (t_1' - t_1)g + \Phi(1 - g),\ ^\circ\text{C}, \tag{20}$$

где

$$t_2' = T_{0,2} - (T_{0,1} - t_1')\left[1 - \frac{0{,}012l}{v}\sqrt[4]{\frac{1}{\tau}\left(\frac{\lambda}{S}\right)^3}\right] + \\ + 0{,}065(H_2 - H_1) + \frac{1{,}2G_\text{т}l}{Sv \cdot 10^4}; \tag{21}$$

$$g = \exp\left[-0{,}00153\frac{k_\text{a}k_{\tau'}l}{v\sqrt{S}(0{,}42 + n)}\right]; \tag{22}$$

$$\Phi = \frac{2{,}6v\sqrt{S}}{k_\text{a}k_{\tau'}}\left[\frac{H_2 - H_1}{l} + 0{,}02\frac{G_\text{т}}{vS} + 250(0{,}42 + n)\frac{t_1' - t_2'}{l}\right]; \tag{23}$$

$$k_\text{a} = \frac{0{,}27\sqrt[4]{\rho_\text{л}^3}}{\sqrt[3]{-tt'}}\ \text{(при } t < 0 \quad k_\text{a} = 1); \tag{24}$$

при $t > t'$

$$k_{\tau'} = \frac{1 + 0{,}73\lambda}{3 + \sqrt{S}}\left[2{,}3 + \left(1{,}1 + \frac{\tau'}{w}\right)\operatorname{ctg} 0{,}04\tau'\right]; \tag{25}$$

при $t < t'$

$$k_{\tau'} = \frac{1 + 0{,}73\lambda}{3 + \sqrt{S}}\left[3{,}1 + \left(1{,}7 - \frac{\tau'}{w}\right)\operatorname{ctg} 0{,}04\tau'\right]; \tag{26}$$

$\rho_\text{л}$ — льдистость мерзлых горных пород, %; остальные обозначения указаны выше.

Большой объем проверочных тепловых расчетов для угольных шахт и рудников Якутии, Магаданской области, Чукотки и Норильска позволяет принять точность расчетных формул, предложенных ЛГИ, равной $\pm 1^\circ$ С. Для большинства задач, связанных с проектированием и эксплуатацией горных предприятий, такая точность приемлема. Тем не менее расчетная методика нуждается в совершенствовании, поскольку не учитывает колебания расхода воздуха и изменения пределов его подогрева или охлаждения за время существования выработок, процессы тепло- и массообмена при замерзании воды или оттаивании льда, при смерзании или оттаивании отбитой руды в магазинах, рудоспусках и т. д.

При этом следует подчеркнуть, что тепловой режим северных шахт и рудников определяет не только гигиенические условия труда шахтеров, но и своеобразие всей горнофизической обстановки. Проявления

горного давления, величина и направление естественной тяги, интенсивность пылеобразования, условия оседания и выноса пыли, газовый режим и газовый баланс выработок, развитие окислительных процессов и опасность самовозгорания угля, условия оледенения выработок и смерзания добытого ископаемого при магазинировании и транспортировке, энергоемкость разрушения пород, возможность защитного заземления электрооборудования и многие другие условия, определяющие безопасность и эффективность горных работ, связаны именно с тепловым режимом породного массива и горных выработок [2, 4].

Весьма важной задачей при проектировании северных горных предприятий является разработка методики технико-экономического анализа и оптимизации различных горнотехнических параметров с учетом теплового фактора. Целый комплекс сложных теплофизических вопросов возникает при переходе горных работ из зоны вечной мерзлоты на подмерзлотные горизонты.

Извлечение и использование глубинного тепла Земли. До последнего времени практическое использование тепловых ресурсов земной коры ограничивалось эксплуатацией естественных источников или неглубоко залегающих месторождений термальных вод и пара.

Однако несравненно большее количество тепла заключено в высокотемпературном массиве твердых горных пород на достаточно больших глубинах. Этот энергетический потенциал только для первых 8 *км* земной коры в пределах суши составляет около $2 \cdot 10^{23}$ *ккал*, то есть примерно в 5000 раз превосходит суммарную теплотворную способность мировых запасов угля, нефти и газа. Академики В. А. Кириллин и М. А. Стырикович указывают, что «...использование тепла земных недр по своему значению сопоставимо с осуществлением в энергетических целях управляемой термоядерной реакции» [7].

Уже около 10 лет Институт технической теплофизики АН УССР и Ленинградский горный институт работают над созданием циркуляционных систем извлечения тепла Земли, основой которых является «подземный котел» — зона искусственной проницаемости, созданная на глубоких горизонтах породного массива камуфлетными взрывами [5, 6].

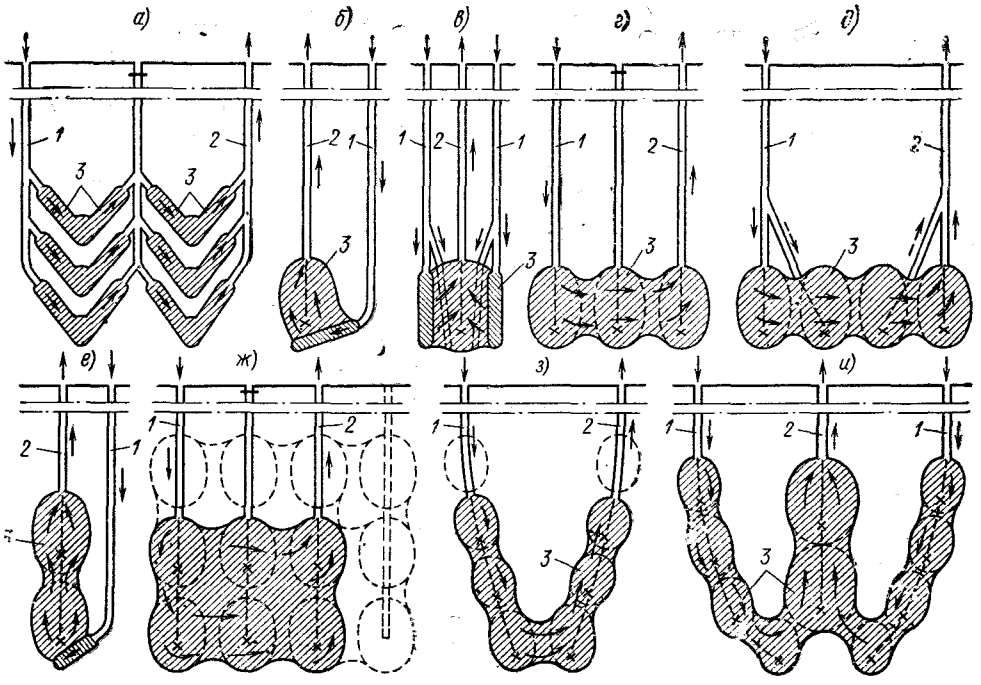
Основным научным направлением Проблемной лаборатории горной теплофизики ЛГИ является инженерно-физическое и технико-экономическое обоснование такого рода систем для горнодобывающей промышленности Северо-Востока СССР. В этих районах при их весьма суровом климате и сплошном распространении вечной мерзлоты извлечение тепла Земли может дать наибольший народнохозяйственный эффект, несмотря на сравнительно неблагоприятные геотермические условия и повышенную стоимость бурения скважин. Такой, на первый взгляд, парадоксальный вывод следует из возможности эффективного использования теплоносителя низкого потенциала для оттаивания дражных полигонов и добытых подземным способом мерзлых песков на золотых, оловянных и алмазных приисках, разрабатывающих россыпные месторождения. Циркуляционная система со скважинами глубиной 3—3,5 *км* ($T \approx 70 \div 90^\circ$ С), обеспечивающая в течение 5—10 лет нагревание 150—300 $м^3/ч$ воды до 40—50° С, может удовлетворить потребности крупного прииска с переводом его от сезонного на круглогодовой режим работы и удвоением годовой производительности. При высокой стоимости электроэнергии и привозного топлива на северных приисках затраты на создание такой автономной системы теплоснабжения по расчетам, проведенным в ЛГИ, окупаются в первые же годы.

В США по-иному подходят к проблеме извлечения и использования тепла Земли. Там наиболее перспективным считается создание подобных циркуляционных систем для получения электроэнергии в отдельных

районах с аномально высокими температурами горных пород — не менее 300° С на глубине 2—3 *км* [11].

При любом назначении рассматриваемых систем с их созданием связан широкий комплекс весьма сложных и пока еще недостаточно изученных вопросов.

В ЛГИ разработаны варианты циркуляционных систем (рисунок), подземный комплекс которых состоит из трех основных элементов: нагнетательной и водоподъемной скважин, примыкающих на глубоком горизонте к зоне активной фильтрации, где вода нагревается за счет теплообмена с разрушенными взрывом породами, и кондуктивного переноса тепла из окружающего слабопроницаемого массива.



Принципиальные схемы некоторых вариантов циркуляционных систем извлечения и использования глубинного тепла Земли:

1 — нагнетательные скважины; *2* — водоподъемные скважины; *3* — зоны активной фильтрации на глубоком горизонте

Достоинствами циркуляционной системы с продольными зонами фильтрации (рисунок, *а*), образованными торпедированием сближенных боковых ветвей вертикальных скважин, являются возможность использования обычных взрывчатых веществ, отсутствие сейсмической опасности при сооружении системы в густонаселенном районе или вблизи промышленных объектов, а также минимальный диаметр скважин.

Технико-экономическая оценка этого варианта системы в условиях Северо-Востока показывает, что при теплопроизводительности $Q = 4$ *Гкал/ч* и сроке службы $\tau = 10$ лет полные приведенные затраты на получение 1 *Гкал* тепла составляют 20—30 руб. в сравнении с 25—50 руб./*Гкал* при использовании котельных на угольном топливе, т. е. даже при современной стоимости бурения эти системы могут оказаться экономически целесообразными для северных районов с высокой стоимостью топлива.

Все остальные варианты систем извлечения тепла Земли, показанные на рисунке, предполагают использование мощных подземных взрывов и, естественно, являются в настоящее время более эффективными.

В техническом отношении наиболее простыми представляются варианты *г* и *ж*, которые предполагают возможность последовательного взрывания умеренных по мощности зарядов, уменьшение сейсмического эффекта и увеличение проницаемости в зоне активной фильтрации и ее объема $V_ф$ при дополнительном разрушении массива от взаимодействия взрывов.

Чрезвычайно сложной является проблема теплового расчета подземных котлов. Быстро изменяющаяся с удалением от центра взрыва проницаемость нарушенного им массива, отсутствие надежных данных о раскрытии трещин и размерах оконтуренных ими породных отдельностей в различных зонах, сложное распределение скоростей фильтрации в пределах $V_ф$, зависящее от гидродинамического режима и конструктивной схемы котла, — вот далеко не полный перечень факторов, делающих практически невозможным точное решение задачи нестационарного теплообмена разрушенных пород и окружающего зону $V_ф$ непроницаемого массива с потоком теплоносителя.

Приближенное решение задачи можно получить, если допустить, что за время τ в пределах $V_ф$ происходит выравнивание температур разрушенных пород и воды. Тогда тепловой баланс котла можно записать в виде

$$Wc_w\gamma_w(t_к-t_0)\tau=V_ф c\gamma[T_н-T'_н(\tau)]+2S_ф[T_н-T''_н(\tau)]\sqrt{\frac{\lambda c\gamma\tau}{\pi}}, \qquad (27)$$

где t_0 и $t_к$ — температура потока воды W, $м^3/ч$, на входе и выходе из зоны $V_ф$ с внешней поверхностью $S_ф$; $T_н$ и $T'_н(\tau)$ — начальная и средняя температура пород в зоне $V_ф$ на момент τ; $T''_н(\tau)$ — средняя за период τ температура пород в котле.

Поскольку в течение некоторого периода τ_1 фильтрационный поток в зоне $V_ф$ будет нагреваться до первоначальной температуры породного массива $t_к=T_н$, то можно принять:

$$T'_н(\tau_1)\approx\frac{T_н-t_0}{2}=\frac{t_к-t_0}{2}; \qquad (28)$$

$$T''_н(\tau_1)\approx\frac{T_н-t_0}{4}=\frac{t_к-t_0}{4}. \qquad (29)$$

Решая при этих условиях уравнение (27), получим

$$\tau_1=k_1\left[\frac{S_ф}{k_2W}\left(1+\sqrt{1+k_3\frac{WV_ф}{S_ф^2}}\right)\right]^2, \qquad (30)$$

где

$$k_1=\frac{\lambda c\gamma}{16\pi}; \quad k_2=c_w\gamma_w; \quad k_3=\frac{8\pi k_2}{\lambda}.$$

Зная τ_1, нетрудно получить выражение для $t_к$ при любом времени эксплуатации системы $\tau>\tau_1$

$$t=\frac{V_ф k_5 T_н-k_2W(\tau-\tau_1)(T_н-2t_0)+}{k_5V_ф+k_2W(\tau-\tau_1)+k_4S_ф\sqrt{\tau-\tau_1}}$$

$$\frac{+k_4S_ф[(T_н-t_0)(\sqrt{\tau}-\sqrt{\tau_1})+(2T_н-t_0)\sqrt{\tau-\tau_1}]}{k_5V_ф+k_2W(\tau-\tau_1)+k_4S_ф\sqrt{\tau-\tau_1}}, \qquad (31)$$

где

$$k_4 = \sqrt{\frac{\lambda c \gamma}{\pi}}; \quad k_5 = c\gamma.$$

В табл. 2 приведены некоторые результаты расчетов на ЭВМ разработанной в ЛГИ экономико-математической модели рассматриваемых систем с использованием формул (30) и (31) для глубины скважин 3000 *м* и мощности единичного заряда 50 *кт* применительно к конкретным условиям одного из приисков Северо-Востока СССР.

Таблица 2

Основные расчетные показатели циркуляционных систем извлечения тепла Земли в условиях Северо-Востока

Вариант системы (см. рисунок)	Производительность, *Гкал/ч*	Объем котла, $м^3 \cdot 10^7$	Срок службы, годы	Максимальный расход воды, $м^3/ч$	Конечная температура воды, °С	Приведенные затраты, *руб./Гкал*
Схема *г* (2 скважины, 2 заряда)	5	2,3	12	85	63,7	27,4
	10	1,5	5	317	36,5	20,0
Схема *ж* (2 скважины, 4 заряда)	10	4,5	12	170	63,7	16,2
	15	3,0	6	370	45,6	13,8
	20	3,0	4	356	61,1	13,1
Схема *ж* (2 скважины, 6 зарядов)	10	4,6	14	232	48,0	14,5
	15	4,6	9	304	54,3	12,0
	20	4,6	6	360	59,3	11,0
	25	4,6	5	486	56,4	10,8

Для каждого конструктивного варианта системы при заданной ее производительности Q в табл. 2 показаны оптимальные сочетания W, τ и пограничной проницаемости котла (определяющей значение V_Φ), при которых обеспечивается минимальный уровень приведенных затрат. Из табл. 2 видно, что с увеличением Q эффективность системы возрастает. Даже при учете определенной приближенности расчеты, полученные нами, дают основание полагать, что осуществление рассматриваемых систем в условиях Северо-Востока СССР может дать значительный экономический эффект.

В заключение следует отметить, что как создание «низкопотенциальных» циркуляционных систем для Севера, так и извлечение тепловых ресурсов геотермоаномалий являются лишь первыми шагами к широкому использованию тепла Земли в энергетике будущего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воропаев А. Ф. Управление тепловым режимом в глубоких шахтах. Госгортехиздат, 1961.

2. Дядькин Ю. Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. Недра, 1968.

3. Дядькин Ю. Д., Буденный Ю. А. Теоретические и экспериментальные основы прогноза теплового режима шахт Севера. Зап. ЛГИ, т. 50, вып. 1, 1968.

4. Дядькин Ю. Д., Зильберборд А. Ф., Чабан П. Д. Тепловой режим рудных, угольных и россыпных шахт Севера. Наука, 1968.

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

6. Дядькин Ю. Д., Парийский Ю. М., Романов В. А. Исследование тепловых процессов в системах извлечения геотермических ресурсов Северо-Востока СССР. В сб. «Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых Севера». Изд. ЛГИ, 1972.

7. Кириллин В. А., Стырикович М. А. Технический прогресс в энергетике. Наука и жизнь, 1970, № 4.

8. Щербань А. Н. Основы теории и методы тепловых расчетов рудничного воздуха. Углетехиздат, 1953.

9. Щербань А. Н., Кремнев О. А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. Изд. АН УССР, 1959—1960.

10. Щербань А. Н., Кремнев О. А., Журавленко В. Я. Справочное руководство по тепловым расчетам шахт и проектированию установок для охлаждения рудничного воздуха. Недра, 1964.

11. Burnham J. B., Stewart D. H. Symposium on Engineering with Nuclear Explosives. Jan. 14—16, 1970. Las Vegas, Nevada.