

УДК 556:622.7

С.М. Федосеев, Ю.А. Хохолов, А.И. Матвеев

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ ДЛЯ РАЗОГРЕВА МЕРЗЛОЙ ВЛАЖНОЙ РУДЫ

Рассмотрен тепловой баланс разогрева мерзлой влажной руды горячей водой. Рассчитаны энергетические затраты на нагревание воды, а также время оттаивания мерзлой влажной руды в зависимости от начальной температуры воды и от размера зерен руды.

Ключевые слова: температура, теплоемкость, количество теплоты, теплофизические свойства, фазовый переход, время, энергетические затраты, руда, размер зерен руды.

Для разупрочнения и дезинтеграции, отбитых в толще многолетнемерзлых пород погребенных россыпей, необходим разогрев руды до положительных температур, для чего применяют горячий воздух, пар, а также энергию различных физических полей [1]. Наиболее эффективным способом разогрева руды является подогрев с помощью горячей воды. Преимуществами данного способа являются большая теплоемкость воды, технологичность и доступность получения горячей воды.

Рассмотрим тепловой баланс при разогрева мерзлой влажной руды с массой (M_P), весовой влажностью (W_{BEC}) и начальной температурой ($T_{P.H.} \leq 273K$) до определенной конечной температуры ($T_{P.K.} \geq 273K$) горячей водой с массой (M_B) и начальной температурой ($T_{B.H.}$). Для разогрева мерзлой влажной руды необходимо подвести количество теплоты (Q_1) равное:

$$(Q_1) = W \cdot M_P \cdot C_P \cdot (T_{P.K.} - T_{P.H.}) + (1 - W) \cdot M_P \cdot C_L \cdot (273 - T_{P.H.}) + (1 - W) \cdot M_P \cdot C_B \cdot (T_{P.K.} - 273) + (1 - W) \cdot M_P \cdot L_{\phi} \quad (1)$$

где C_P , C_B , C_L – теплоемкости сухой руды, воды, и льда; L_{ϕ} – скрытая теплота фазового перехода льда.

Следует отметить, что данное количество необходимой теплоты (Q_1) не зависит от вида подводимой энергии (механической, электрической, волновой лучистой, и т.д.).

Для рационального разогрева мерзлой влажной руды с массой M_P от $T_{P.H.}$ до $T_{P.K.}$ без побочных потерь и до полного теплового равновесия т.е. ($T_{P.K.} = T_{B.K.}$) необходимо подвести количество теплоты (Q_2) равное:

$$Q_2 = Q_1 \quad (2)$$

при котором соблюдается тепловой баланс.

Количество подводимого количества теплоты (Q_2) в виде горячей воды равно:

$$Q_2 = M_B \cdot C_B \cdot (T_{B.H.} - T_{B.K.}), \quad (3)$$

где M_B – масса горячей воды; C_B – теплоемкость воды.

Таблица 1

Необходимое количество горячей воды ($M_B^{(1)}$) для разогрева 1 кг мерзлой влажной руды от 268К до 278К в зависимости от начальной температуры воды ($T_{В.Н}$).

| | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $T_{В.Н}, K$ | 373 | 333 | 313 | 293 | 283 |
| $M_B^{(1)} (кг)$ | 0,091 | 0,158 | 0,248 | 0,579 | 1,738 |

Таблица 2

Необходимое количество горячей воды по тепловому балансу с начальной температурой $T_{В.Н}$ для разогрева 217,8 т влажной руды от 268К до 278К

| | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|
| $T_{В.Н.}, K$ | 373 | 353 | 333(60°C) | 313 | 293 | 283 |
| $M_{Г.В.}, (т)$ | 19,82 | 25,04 | 34,41 | 54,01 | 126,1 | 378,5 |

Проведем расчет количества теплоты необходимой для разогрева 1 кг мерзлой влажной руды с начальной температурой $T_{Р.Н} = 268K (-5^0 C)$ до конечной температуры руды $T_{Р.К.} = T_{В.К.} = 278K (+5^0 C)$.

При исходных параметрах:

Теплоемкости:

руды $C_P \approx 0,8$ кДж/кг·К,

льда $C_L = 2,09$ кДж/кг·К,

воды $C_B = 4,21$ кДж/кг·К;

теплота фазового перехода льда

$L_\phi = 334$ кДж/кг

весовая влажность руды

$W \approx 8\%$ (0,08 долей ед.)

Тогда количество теплоты для разогрева 1 кг влажной руды и при исходных параметрах численно равно:

$$(Q_1) = 0,92 \cdot 0,8 \cdot 10 + 0,08 \cdot 2,09 \cdot 5 + 0,08 \cdot 4,21 \cdot 5 + 0,08 \cdot 334 = 36,59 \text{ кДж.} \quad (4)$$

Количества необходимого подводимого количества теплоты для разогрева 1 кг мерзлой влажной руды в виде горячей воды согласно, теплового баланса (2) в зависимости от начальной температуры горячей воды ($T_{В.Н}$) равно:

$$Q_2 = M_B^{(1)} \cdot C_B \cdot (T_{В.Н} - 278) = 36,59 \text{ кДж.} \quad (5)$$

Отсюда количество необходимой горячей воды $M_B^{(1)}$ для разогрева 1 кг мерзлой влажной руды с начальной температурой $T_{Р.Н} = 268K (-5^0 C)$ до конечной температуры $T_{Р.К.} = 278K (+5^0 C)$ в зависимости от начальной температуры воды ($T_{В.Н}$) находим из соотношения:

$$M_B^{(1)} (кг) = \frac{8,69(кг \cdot K)}{(T_{В.Н} - 278)K} \quad (6)$$

Теперь оценим возможность использования горячей воды для разогрева мерзлой влажной руды в практических целях. Месторождение «Солур-Восточный» Западной Якутии расположено в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, температура пород составляет $-5^0 C$, естественная весовая влажность отбитых руд – 8%. Горные породы погребенной россыпи золота представлены средне и мелкогалечными конгломератами. Обогажительная фабрика имеет производительность 217,8 т/час мерзлой влажной руды

Таблица 3

Пористость упаковок и минимально необходимый объем воды

| Вид упаковки | ε | $V_{B.} = V_P \cdot \varepsilon \text{ (м}^3\text{)}$ |
|---|---------------|---|
| Гексагональная и кубическая гранецентрированная | 0,2595 | 31,09 |
| Кубическая объемноцентрированная | 0,3198 | 38,31 |
| Кубическая простая | 0,4764 | 57,07 |

или объем перерабатываемой руды (V_P), за 1 час с учетом коэффициента разрыхления 1,8178 составляет $V_P = 119,81 \text{ м}^3/\text{час}$.

Необходимое количество горячей воды по тепловому балансу за час работы фабрики равно:

$$M_{Г.В.} = M_B^{(1)} \cdot M_P = M_B^{(1)} 217,8 \text{ т} \quad (7)$$

Однако, для максимальной теплопередачи, для создания максимального контакта «вода–руда» необходимо заполнение всех пор руды. Пусть зерна руды после дробления и грохочения имеют шарообразную форму и упакованы определенным образом. Минимально необходимый объем воды ($V_{B.}, \text{ м}^3$) при заполнении всех пор с учетом пористости (ε) и объема руды будет:

$$V_{B.} = V_P \cdot \varepsilon \quad (8)$$

Пористость (ε) не зависит от размера сферических зерен, а зависит только от вида упаковки [2]. Необходимый объем воды равный объему пор руды согласно формуле (8) в зависимости от типа наиболее вероятных упаковок шарообразных зерен руды приведен в табл. 3.

$$\text{Необходимый объем горячей воды } V_{Т.В.} = \frac{M_B}{\rho_B},$$

где ρ_B – плотность воды = 1000 кг/м^3 , рассчитанный по тепловому балансу (см. табл. 2) должен быть равно или больше объема пор, рассчитанных по формуле (8) с учетом пористости;

$$V_{Г.В.} \geq V_{B.} \quad (9)$$

Такое условие выполняется для всех видов упаковок зерен руды: при $T_{В.Н.} < 330\text{К}$ (57°C). При нагреве воды выше данной температуры согласно теплового баланса требуется меньшее количество воды, которое не полностью заполняет весь объем пор и часть зерен руды не будет контактировать с горячей водой уменьшая теплообмен.

Энергозатраты. Здесь необходимо отметить, что при соблюдении условий (2) и (8) значение подводимой энергии (Q_2) для разогрева руды M_P не зависит от начальной температуры горячей воды ($T_{В.Н.}$) и равно:

$$Q_2 = M_B \cdot C_B \cdot (T_{В.Н.} - T_{В.К.}) = 7967,6 \text{ МДж} \quad (10)$$

Поскольку $1 \text{ ккал} = 4,19 \text{ кДж}$, то $Q_2 = 7967,6 \text{ МДж} = 1901583,6 \text{ ккал} = 1,90 \text{ Гкал}$.

Иначе говоря, для набора необходимого количества теплоты (Q_2) при более низких температурах воды ($T_{Г.В.} \geq T_{Р.К.}$) потребуются большее количество воды. Температура горячей воды играет существенную роль только на времени разогрева руды, что рассматривается ниже.

Таблица 4

Расход топлива для разогрева 217,8 т руды с 268К до 278К разными источниками тепла

| Вид источника нагрева | Теплотворная способность МДж/кг | Расход топлива, кг (м ³) |
|-------------------------------------|------------------------------------|---|
| Электрoэнергия | ---- | 2213,2 кВт·ч |
| Природный газ ($M_{CP}=20,45$) | 45 | 177,05 (161,64 м ³) |
| Дизтопливо | 42 | 189,7 |
| Бурыи уголь | 15 | 531,1 |
| Дрова | 10 | 796,7 |

В случае нагрева электрическим током переведем энергию на размерность *кВт·час*, поскольку $3,6 \text{ кДж} = 1 \text{ ватт} \cdot \text{час} = 0,001 \text{ кВт} \cdot \text{час}$. Тогда $7967635,5 \text{ кДж} = 2213,2 \text{ кВт} \cdot \text{час}$.

Для нагрева воды (теплоносителя) возможно использование различных видов, доступных в условиях старательской добычи, источников тепла (табл. 4).

Расчет времени протаивания. Предположим, что кусок горной породы имеет форму шара и его окружает слой воды с заданной толщиной. В начальный момент времени горная порода имеет отрицательную температуру, а вода – положительную. Рассмотрим процесс протаивания горной породы при отсутствии теплового потока на поверхности воды.

Процесс распространения тепла в горных породах и в слое воды с учетом фазовых переходов влаги и принятых выше допущениях описывается следующими уравнениями [3, 4]:

$$\left[C(T) + L_{\phi} W \rho \delta(T - T^*) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad 0 < r < R, \quad t > 0; \quad (11)$$

$$C(T) = \begin{cases} c_1 \cdot \rho_1, & T < T^*; \\ c_2 \cdot \rho_2, & T > T^*; \end{cases} \quad \lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T < T^*; \\ \lambda_2, & T > T^*; \end{cases} \quad (12)$$

где T – температура горных пород (воды), °С; T^* – температура фазовых переходов лед-вода, °С; L_{ϕ} – скрытая теплота плавления (замерзания) льда (воды), Дж/кг; W – влажность, доли единиц; c_1, ρ_1, λ_1 (c_2, ρ_2, λ_2) – удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), плотность (кг/м³) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) соответственно для мерзлых (талых) пород (льда и воды); $\delta(T - T^*)$ – дельта-функция Дирака. Здесь R_1 – радиус шара (куска породы), м; $\Delta = R - R_1$ – толщина слоя воды, м. При $0 \leq r \leq R_1$ теплофизические свойства соответствуют свойствам горной породы, а при $R_1 < r \leq R$ – свойствам воды.

Фазовые переходы учитываются с помощью δ -функция Дирака.

В центре шара и на внешней границе области задается граничное условие II рода, т.е. потоки тепла отсутствуют:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = 0, \quad t > 0. \quad (13)$$

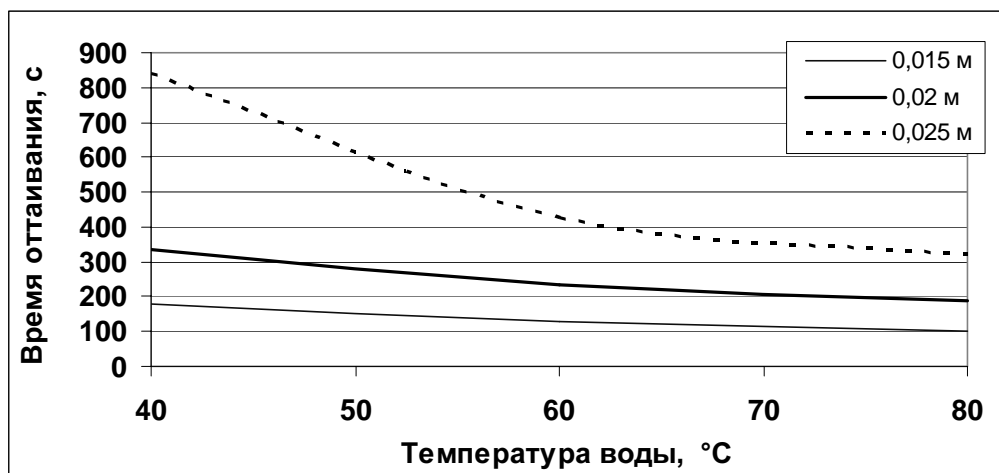


Рис. 1. Зависимость времени оттаивания руды от температуры воды при различных радиусах кусков

На границе порода-вода задается граничное условие IV рода (условие контакта):

$$\left. \frac{\partial T_n}{\partial r} \right|_{r=R_1} = \left. \frac{\partial T_e}{\partial r} \right|_{r=R_1}, \quad T_n|_{r=R_1} = T_e|_{r=R_1}, \quad (14)$$

где T_n – температура породы, °C; T_e – начальная воды, °C.

В начальный момент времени задается распределение температур в горной породе и слое воды:

$$T(r, 0) = T_{п0}, \quad 0 \leq r \leq R_1. \quad (15)$$

$$T(r, 0) = T_{в0}, \quad R_1 \leq r \leq R, \quad (16)$$

где $T_{п0}$ – начальная температура мерзлой породы, °C; $T_{в0}$ – начальная температура теплой воды, °C.

Система уравнений (11)–(16) решается численными методами конечных разностей [4, 5].

Расчёты проведем при следующих исходных данных: радиус куска отбитой руды 0,015 м, 0,02 м и 0,025 м; начальная температура руды -5°C ; масса воды 0,041 кг; начальная температура воды $+40^\circ\text{C}$, $+60^\circ\text{C}$, $+80^\circ\text{C}$; удельная теплоемкость скелета руды 810 Дж/(кг·K); плотность руды 2520 кг/м³; коэффициент теплопроводности мерзлой руды 1,6 Вт/(м·K); коэффициент теплопроводности талой руды 1,29 Вт/(м·K); весовая влажность руды 0,08 доли единиц.

Внешний радиус рассчитывался в зависимости от радиуса руды и массы воды по формуле:

$$R = \sqrt[3]{R_1^3 + \frac{3 \cdot m_e}{4 \cdot \pi \cdot \rho_e}}, \quad (17)$$

где m_e – масса воды, кг; ρ_e – плотность воды, кг/м³.

На рис. 1 приведены результаты расчетов времени оттаивания руды в зависимости от начальной температуры воды при различных значениях радиуса куска руды.

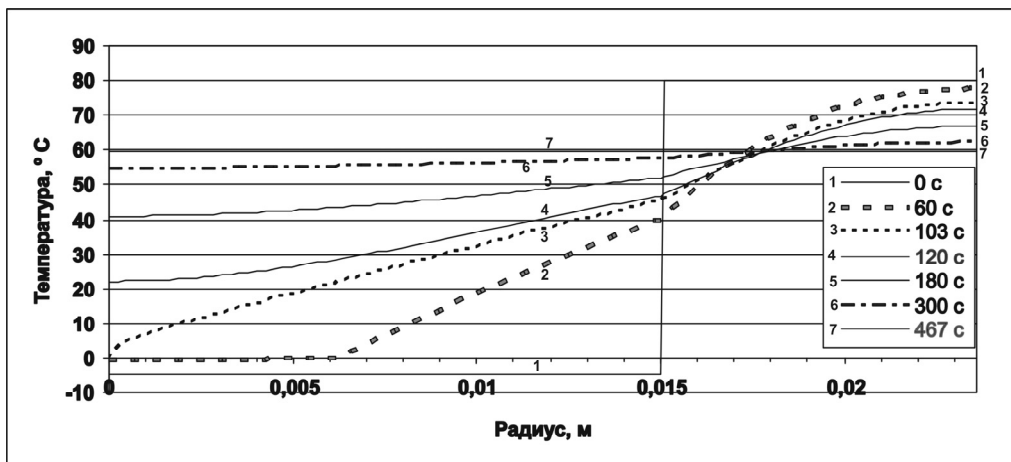


Рис. 2. Распределения температур в руде и слое воды в различные моменты времени

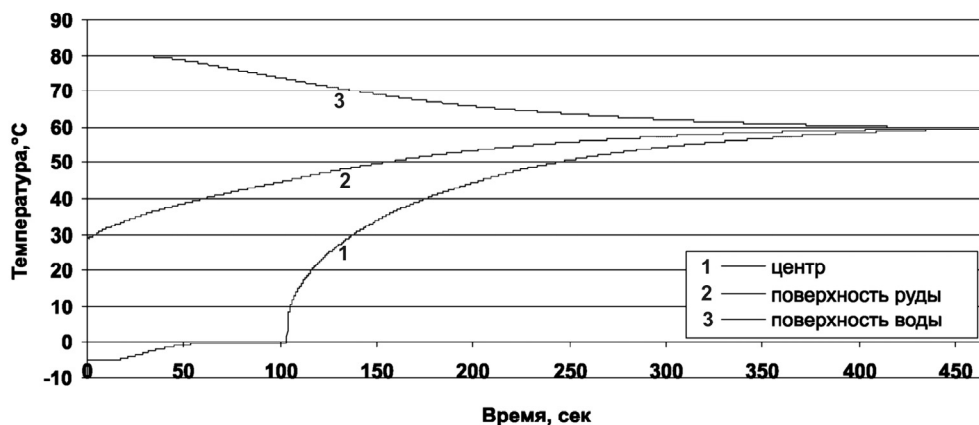


Рис. 3. Динамика изменений температур руды в центре, на поверхности руды (при $r=R_1$) и на поверхности воды (при $r=R$)


Поскольку в последнюю очередь руда протаивает в центре шара, руда считается оттаявшей, если температура руды в центре достигнет положительного значения. Расчеты показали что, важную роль играет размер кусков мерзлой отбитой руды, причем при малых радиусах куска породы влияние температуры воды на время оттаивания руды незначительно.

На рис. 2 приведены распределения температур в руде и слое воды в различные моменты времени. При этом расчеты проведены до момента наступления теплового равновесия.

На рис. 3 показана динамика изменений температур руды в центре, на поверхности руды (при $r=R_1$) и на поверхности воды (при $r=R$) до момента наступления теплового равновесия. Температура равновесия равна $+60^\circ\text{C}$. Следует заметить что после прекращения фазовых переходов лед-вода в центре шара

(через 103 с) происходит резкое повышение температуры в этом районе. Тепловое равновесие наступает через 467 сек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рябец Н.И.* Основы разупрочнения и оттаивания мерзлых горных пород СВЧ энергией [Текст] / Н.И.Рябец. - Якутск, 1991. - 154 с.
2. *Моделирование пористых материалов* / [Текст]. - Новосибирск, ИК СО АН СССР, 1976. - 190 с.
3. *Тихонов, А.Н.* Уравнения математической физики [Текст] / А.Н.Тихонов, А.А. Самарский. - М.: Наука, 1977. - 736 с.
4. *Самарский А.А.* Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана [Текст] / А.А. Самарский, Б.Д. Моисеенко // Журнал вычислит. мат. и мат. физики. - 1965. - Т. 5, №5. - С. 816-827.
5. *Самарский А.А.* Теория разностных схем [Текст]: уч. пособие / А.А.Самарский. -2-е изд., исправ. - М. : Наука, 1983. - 616 с. 

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Федосеев Семен Михайлович – научный сотрудник,
Хохолов Ю.А. – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,
Матвеев Андрей Иннокентьевич - доктор технических наук, ст. научный сотрудник,
Учреждение Российской Академии наук Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАНг. Якутск, vaviro @ mail. ru.



РУКОПИСИ, ДЕПониРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

КОНЦЕПЦИЯ ВНУТРЕННЕГО КОНТРОЛЯ В СОВРЕМЕННОЙ ЭКОНОМИКЕ (848/12-11 от 16.09.2011)

Ефремова Елена Ильинична, ст. преподаватель, РЭА им. Г.В. Плеханова,
тел.: 8-916-650-51-76

Исследована концепция системы внутреннего контроля в современной экономике России. Раскрыты понятия внутреннего контроля. Проанализированы определения внутреннего контроля, данные известными отечественными экономистами, а также международная практика концепции внутреннего контроля.

Ключевые слова: внутренний контроль; система внутреннего контроля.

Efremova E.I. THE CONCEPT OF INTERNAL CONTROL IN MODERN ECONOMY

In article analyses thy concept of systems internal control in modern Russia. Disclosed concepts of internal control. Analyzed the definition of internal control, data famous Russian economists, as well as the international practice of the concept of internal control.

Key words: Internal control; system of internal control.