

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНОГО И ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В статье приводятся результаты лабораторных исследований интерференции температурных волн, которые используются для интерпретации особенностей термограмм скважин. Установлено, что температурные волны при наложении интерферируют аналогично электромагнитным и акустическим волнам, что может послужить основой для характеристики источников тепла и их пространственного распределения в земных недрах.

Ключевые слова: температурные волны, интерференция, биения, температуропроводность, термограммы скважин.

Температурные волны – периодические изменения распределения температуры в среде, связанные с периодическими колебаниями плотности тепловых потоков, поступающих в среду. Они несут в себе информацию о тепловых свойствах вещества и характере порождающих их процессов.

Наряду с акустическими и электромагнитными волнами температурные волны широко используются для зондирования тепловых свойств вещества и исследования различных явлений, связанных выделением или поглощением тепла (Филиппов, 1984; Шкловер, 1961).

Для однородной среды, теплопроводность которой не зависит от температуры, решение уравнения теплопроводности при граничном условии $T_{x=0} = T_0 \cos \omega t$, имеет вид (Лыков, Берковский, 1974):

$$T = T_0 \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\chi}}x\right) \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\chi}}x\right), \quad (1)$$

где χ – коэффициент температуропроводности среды, ω – частота колебаний температуры на поверхности. Возмущения в среде, описываемые уравнением (1), представляют собой температурную волну. В каждой точке простран-

Окончание статьи В.Г. Заводинского, Е.А. Михайленко, А.И. Ханчука «Сравнительное моделирование поведения атомов благородных металлов в графитовых сланцах»

ник благородных металлов на Дальнем Востоке России. *Вестник Дальневосточного отделения РАН*. №3. 2010. 3-12.

Beckstedte M., Kley A., Neugebauer J., Scheffler M. Density functional theory calculations for poly-atomic systems: electronic structure, static and elastic properties and ab initio molecular dynamics. *Comp. Phys. Commun.* 107. 1997. 187-205.

Cohen M.L., Heine V. Pseudopotential theory of cohesion and structure. *Solid State Physics*. 24. 1970. 38-249.

Fuchs M., Scheffler M.. Ab initio pseudopotentials for electronic structure calculations of poly-atomic systems using density functional theory. *Comp. Phys. Commun.* 119. 1999.67-165.

Hohenberg H., Kohn W. Inhomogeneous Electron Gas. *Phys. Rev.* 136. 1964. B864-B871.

Ishii A., Yamamoto M., Asano H., Fujiwara K. DFT calculation for adatom adsorption on graphene sheet as a prototype of carbon nano tube functionalization. *Journal of Physics: Conference Series*. 100. 2008. 052087-052090.

Kittel C. Introduction to Solid State Physics. 6th ed. Wiley, New York. 1986.

Kohn W., Sham J.L. Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects. *Phys. Rev.* 140. 1965. A1133-A1138.

Perdew J.P., Wang Y. Accurate and simple density functional for the electronic exchange energy. *Phys. Rev. B*. 33. 1986. 8800-8802.

Yang S.H., Drabold D.A., Adams J.B., Ordejon P., Glassford K.J. *Phys: Condens. Matter*. 9. 1997. L39-L45.

Zavodinsky V.G. Ab initio simulation of diamond epitaxial growth on copper. *Comp. Mater. Set* 36. 2006. 139-142.

with structure defects and attract each other, forming plate clusters. Gold atoms do not penetrate into graphite layers but link with edges of the graphite breaks, forming three-dimensional particles.

Keywords: noble metals, graphite, shales, nanoparticles, accumulation, simulation.

Виктор Григорьевич Заводинский

Д.физ.-мат.н., профессор. Директор Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН. Научные интересы: материаловедение, физика конденсированного состояния, нанотехнологии, моделирование процессов и систем на атомном уровне.

Елена Альбертовна Михайленко

К.физ.-мат.н., научный сотрудник Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН. Научные интересы: материаловедение, физика конденсированного состояния, моделирование процессов и систем на атомном уровне.

680042 Хабаровский край, Хабаровск, ул. Тихоокеанская 153. Тел.: (4212) 226-956.

Александр Иванович Ханчук

Д.геол.-мин.н., академик РАН, директор Дальневосточного геологического института ДВО РАН. Научные интересы: геология и металлогения Тихоокеанского сегмента Земли, благородные металлы в графитизированных породах.

690022 Приморский край, Владивосток, просп. 100 летия Владивостока, д. 159. Тел.: (4232) 318-323.

V.G. Zavodinsky, E.A. Mikhailenko, A.I. Khanchuk. **Comparative simulation of the noble metal atoms behaviors in graphite shales.**

A theoretical approach based on quantum mechanics is applied to study diffusion processes of the noble metal atoms (platinum, palladium and gold) and their accumulation in graphite. It is shown that platinum and palladium atoms can easily migrate within graphite. They can link

ства температура T совершает гармонические колебания во времени с одним и тем же периодом $\tau = 2\pi/\omega$. Фаза этих колебаний меняется от точки к точке. Плоскость равной фазы $\omega t - \sqrt{\omega/2\chi}x = const$ параллельна поверхности среды и перемещается в направлении оси x со скоростью v :

$$v = dx/dt = \sqrt{2\chi\omega} = \frac{4\pi\chi}{\lambda}. \quad (2)$$

Температурная волна испытывает сильное затухание при распространении. Для волны характерна значительная дисперсия – зависимость скорости распространения от частоты. Чем больше частота колебаний, тем быстрее температурная волна распространяется и затухает на меньших расстояниях.

В соответствии с принципом суперпозиции волн, в случае сложения двух волн $A_1 \cdot \cos(\omega t - kx_1)$ и $A_2 \cdot \cos(\omega t - kx_2)$ с одинаковыми частотами ω амплитуда результирующей волны равна (Иродов, 1999):

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos [2\pi(x_1 - x_2)/\lambda], \quad (3)$$

где $[2\pi(x_1 - x_2)/\lambda]$ – разность фаз волн не зависит от времени. Косинус равен единице, и амплитуда колебаний результирующей волны $A = A_1 + A_2$ не зависит от времени и максимальна во всех точках среды, для которых разность хода $x_1 - x_2 = m\lambda$, где $m = 0, 1, 2, \dots$. Амплитуда $A = |A_1 - A_2|$ минимальна во всех точках среды, для которых $x_1 - x_2 = (2m + 1)\lambda/2$.

В случае сложения двух волн $A_1 \cdot \cos(\omega_1 t - \phi_1)$ и $A_2 \cdot \cos(\omega_2 t - \phi_2)$ с разными частотами ω_1 и ω_2 амплитуда результирующих колебаний:

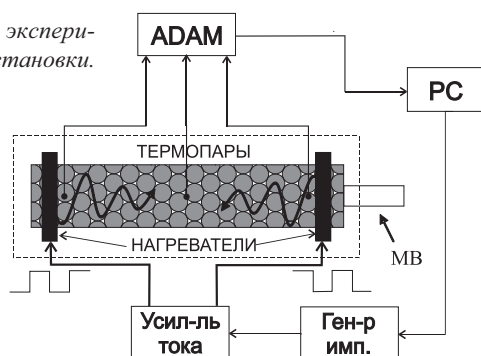
$$A = 2A \cdot \sin[t(\omega_1 + \omega_2)/2 - (\phi_1 + \phi_2)/2] \cdot \cos[t(\omega_1 - \omega_2)/2 - (\phi_1 - \phi_2)/2]. \quad (4)$$

Разность фаз волн $[t(\omega_1 - \omega_2)/2 - (\phi_1 - \phi_2)/2]$ зависит от времени, и амплитуда результирующей волны представляет собой периодическую функцию времени. Если частоты волн отличаются мало, то результирующая волна испытывает биения с частотой, равной разности частот $\omega_1 - \omega_2$.

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном подтверждении способности температурных волн интерферировать и испытывать биения, что может быть использовано при интерпретации температурных полей в земных недрах.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В неё входят колонка, наполненная стеклянными шариками $\varnothing 0,25 \pm 0,05$ мм. Пространство между ними заполнено жидким углеводородом $C_{12}H_{26}$. На концах колонки установлены проволочные нагреватели, на которые подаются импульсы тока с усилителя тока. Генератор формирует импульсы напряжения необходимой длительности.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки.



ти. Температура внутри колонки измеряется при помощи термопары. ЭДС термопары преобразуется в температуру аналого-цифровым конвертером ADAM-4018 и передается в компьютер в цифровом виде. Термопара помещена в капилляр, центрированный по оси колонки, и может перемещаться по её оси при помощи микрометрического винта МВ.

На рис. 2 представлено распределение амплитуд колебаний температуры по длине колонки при «синфазном» и «противофазном» включении нагревателей. Период колебаний в обоих случаях одинаков: $\tau = 50$ с. Температурные волны, создаваемые источниками, когерентны. Их разность фаз не изменяется во времени. Положение нагревателей обозначено зачернёнными прямоугольниками. Из рисунка видно, что при «синфазном» включении, когда оба нагревателя включаются и выключаются одновременно, амплитуда колебаний температуры достигает максимума в промежутке между нагревателями. Здесь температурные волны складываются в фазе и усиливают друг друга. При «противофазном» включении, когда нагреватели работают попеременно, колебания температуры в промежутке между нагревателями почти полностью подавляются, что свидетельствует об интерференции температурных волн на минимум. В точке с координатой $x = 18$ мм температурные волны от двух источников тепла складываются в противофазе и гасят друг друга.

Используя приведённое выше условие интерференции волн на минимум: $x_1 - x_2 = (2m + 1)\lambda/2$, можно определить длину волны по положению минимума и максимума амплитуды температурной волны на рис. 2. Расстояние между нагревателями 8 мм, диаметр колонки 9 мм, $m = 0$. Отсюда: $\lambda \approx 0,007$ м. Таким образом, проведенный эксперимент подтверждает правило сложения амплитуд колебаний (3) для когерентных ($\omega_1 = \omega_2$) температурных волн.

Коэффициент температуропроводности среды, заполняющей колонку, можно определить из соотношения (2):

$$\chi = v \frac{\lambda}{4\pi} = \frac{\lambda^2}{4\pi\tau} \approx 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

На рис. 3 приведена зависимость температуры при фиксированном положении термопары посередине между нагревателями от времени для температурных волн с отличающимися периодами: $\tau_1 = 460$ с, $\tau_2 = 420$ с. Такие волны некогерентны. Их разность фаз изменяется во времени. Как видно из рисунка, температурные волны испытывают биения. Частота биений результирующей волны при сложении двух волн разных частот равна разности частот исходных волн. Следовательно, период биений результирующей волны: $\tau_6 = \tau_1 \cdot \tau_2 / (\tau_1 - \tau_2)$. Как видно из рис.3 период биений двух волн с указанными выше периодами приблизительно соответствует рассчитанному по приведённой формуле $\tau_6 = 4830$ с.

Правило сложения амплитуд некогерентных ($\omega_1 \neq \omega_2$) температурных волн (4) также выполняется.

Авторами настоящей статьи обнаружено, что на термограммах скважин присутствуют слабые периодические колебания температуры (Христофоров и др., 2005). Путём вейвлет-разложения термограмм, были выявлены колебания температуры с амплитудой от долей до единиц градусов различной пространственной протяжённости.

На термограмме каждой скважины присутствует индивидуальный набор колебаний с разными длинами волн

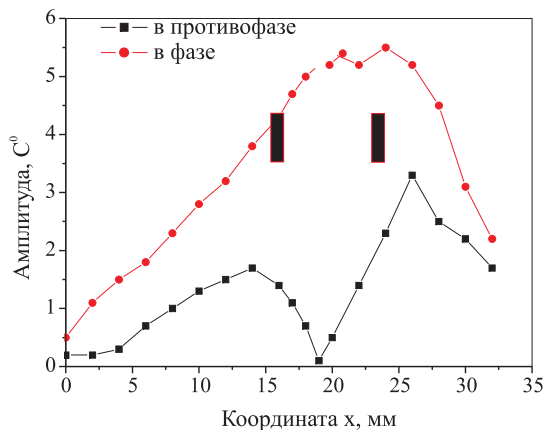


Рис. 2. Зависимость амплитуды колебаний температуры от координаты по оси колонки (пояснения в тексте).

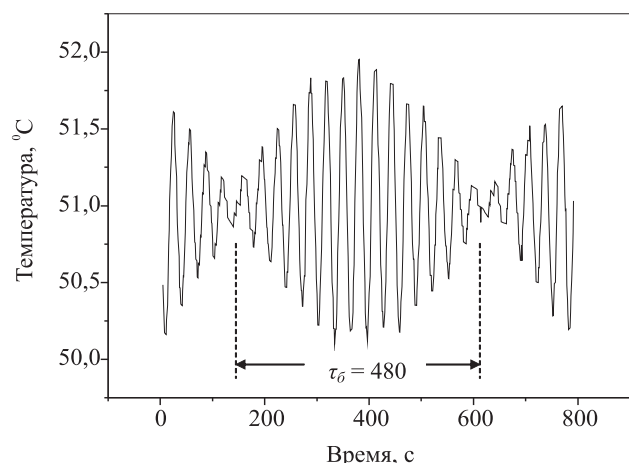


Рис. 3. Колебания температуры в середине между нагревателями при отличающихся периодах температурных волн.

и разным характером распределения амплитуд колебаний по глубине. Например, на рис. 4 приведена «экстрагированная» из термограммы скважины №20009 Ромашкинского месторождения Татарстана температурная волна длиной $\lambda \approx 500$ м. По оси абсцисс отложено отклонение температуры от геотермы, или значения коэффициентов вейвлет-разложения термограммы скважины, переведённые в градусы. Из сопоставления рис. 3 и 4 видно, что температурная волна в горных породах имеет вид, характерный для биений двух волн разных периодов.

Для оценки скорости температурной волны v перемещения гребней волны длиной $\lambda = 500$ м используем выражение (2). Величина теплопроводности кернов пород, извлечённых из скважины №20009, приведена в (Липаев, 2003): $\chi \approx 18 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Отсюда $v = 0,45 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}$. Полученное значение скорости распространения температурной волны крайне мало. Авторами настоящей статьи были проведены повторные измерения в той же скважине через несколько лет. Анализ результатов показал, что положение гребней волны того же периода сдвинулось всего лишь на несколько метров, в то время как её форма осталась неизменной.

По приведённым на рис. 4 данным можно оценить длину другой волны λ_2 , при сложении которой с исходной $\lambda_1 = 500$ м, можно получить изображённую на рис. 4 картину. Полагая, что скорости волн v близких частот мало отличаются, можно записать:

$$v/\lambda_2 = v/\lambda_1 - v/\lambda_0 = v(\lambda_0 - \lambda_1)/\lambda_1 \cdot \lambda_0. \quad (6)$$

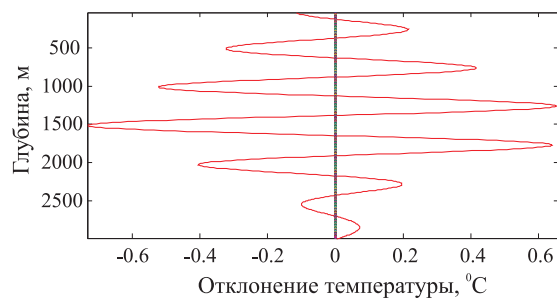


Рис. 4. Отклонения температуры от геотермы, полученные вейвлет-разложением термограммы скв. №20009.

Длина биений λ_0 приблизительно равна 3000 м (Рис. 4). Из уравнения (6) получаем: $\lambda_2 \approx 600$ м.

Проведённые лабораторные исследования интерференции температурных волн показывают, что характер распределения амплитуд колебаний температуры в веществе связан с взаимным расположением источника тепла и частотами колебаний температуры, которые они создают. Вероятно, появление слабых колебаний температуры в горных породах связано с наличием каких-то глубинных периодических источников тепла. Исследование характера распределения амплитуд температурных волн может послужить основой для выявления источников тепла и их пространственного распределения в земных недрах.

Литература

- Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний. 1999. 256
- Липаев А.А., Хисамов Р.С., Чугунов В.А. Теплофизика горных пород нефтяных месторождений. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». 2003. 304.
- Лыков А. В, Берковский Б. М. Конвекция и тепловые волны. М.: Энергия. 1974. 336.
- Филиппов Л.П. Измерение теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева. М.: Энергоатомиздат. 1984. 105.
- Христофоров А.В., Христофорова Н.Н., Бурганов Б.Т. Температурные волны в природных средах. Фурье и вейвлет-анализ термограмм. *Георесурсы*. 2005. №2 (17). 2-6.
- Шкловер А.М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1961.

A.V. Khristoforov, I.S. Abrosimova, B.T. Burganov. **Interference of the temperature waves. Laboratory experiment.**

The paper presents the results of laboratory studies the interference of thermal waves. Found that the temperature waves interfere with superposition the same electromagnetic and acoustic waves. The results can serve as a basis for the characterization of heat sources and their spatial distribution in the interior of the earth.

Key words: temperature waves, interference, beats, thermal conductivity, well thermogram.

Анатолий Владиславович Христофоров
К.физ.-мат.н., доцент кафедры радиоэлектроники.

Ирина Семеновна Абросимова
Аспирант кафедры радиоэлектроники.

Булат Талгатович Бурганов
Аспирант кафедры радиоэлектроники.

Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет.
420008, Казань, Кремлёвская, 18. Тел: (843) 292-44-54.