

УДК 550.834; 550.836

**О ТЕПЛОВОМ ЭФФЕКТЕ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ  
ВОЗБУЖДЕНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН**

**В. И. Юшин, Д. Е. Аюнов**

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
E-mail: yushinvi@ipgg.sbras.ru,  
просп. Академика Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия*

Исследован сейсмотермический эффект (СТЭ) — внутренний нагрев грунта под воздействием внешних вибрационных и импульсных механических колебаний в частотном диапазоне от единиц до сотен герц. Установлены некоторые общие особенности СТЭ, такие как “усталость”, релаксация и замерзание. Приведены результаты длительного мониторинга температуры под плитой периодически включаемого мощного вибратора. Предложена эмпирическая формула зависимости уровня СТЭ от глубины под платформой поверхностного вибратора. Показана прямая взаимосвязь уровня СТЭ с мощностью колебаний.

*Температурный мониторинг, сейсмотермический эффект, скорость нагрева, диссипация, виброисточник, вибровоздействие, свип-сигнал, частотно-энергетическая характеристика*

Геотермические исследования играют существенную роль в решении фундаментальных и прикладных задач геофизики и горного дела. Важную информацию о природе естественных физических процессов, происходящих в земной коре, приносят измерения температуры на микроуровне. Они позволяют, например, измерять реликтовый тепловой поток из недр Земли [1], выявлять предвестники землетрясений в сейсмоактивных районах [2], исследовать миграцию флюидов в разведочных и продуктивных скважинах [3, 4] и решать ряд других прикладных задач. Новый толчок геотермическим исследованиям в геомеханике дан основополагающими работами [5–7], в которых отмечается, что предсказание и открытие волн маятникового типа открывает новые возможности исследования напряженно-деформированного состояния реальных массивов горных пород.

Это открытие “дало мощный импульс для разработки принципиально новых методов и систем комплексного сейсмо-деформационно-электромагнитного мониторинга природных и техногенных землетрясений, горных ударов и других динамических форм проявления горного давления, развития геомеханических основ увеличения нефтеотдачи пластов виброволновыми геотехнологиями” [5].

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-05-33-00337), интеграционного проекта СО РАН № 54, интеграционного проекта № 45 (совместно с Институтом геофизики УрО РАН).

В последние годы интенсивно развивается ряд вибрационных технологий [8], одна из задач которых состоит в дистанционном воздействии на углеводородные резервуары с целью повышения выхода полезного продукта [9–13]. Мощные вибрации, возбуждаемые на дневной поверхности, существенно ослабляются на пути к залежи. Процесс превращения механической энергии в сейсмические волны сопровождается потерями, особенно интенсивными в ближней зоне источника колебаний. Часть энергии воздействия идет на разрушение сплошности среды, часть переходит в тепловую. Сейсмотермическим эффектом авторы называют нагрев среды при механическом воздействии, необходимом для образования сейсмических волн.

Впервые СТЭ обнаружен и описан в [14]; был зарегистрирован разогрев грунта под действием интенсивных механических колебаний в области средних сейсморазведочных частот. Следующая попытка представлена в работе [15]. В ней изучен СТЭ в области низких частот 6–12 Гц. Эксперименты выполнялись с помощью двух рядом стоящих стационарных вибраторов и выявили ряд новых особенностей СТЭ. Помимо физически очевидных зависимостей от интенсивности колебаний и удаленности их от источника, замечено явление, которое можно условно назвать эффектом “усталости”, состоящим в снижении уровня СТЭ при длительных вибровоздействиях. Кроме того, установлено, что после прекращения вибрационного воздействия в течение нескольких часов происходит релаксация — постепенное восстановление исходных механических свойств среды, но не до конца. Так, вибратор, проработавший несколько лет на одном месте, после установки на новое соседнее место показал в 2 раза более высокий уровень СТЭ.

В задачи настоящей работы входит экспериментальное выявление закономерностей пространственного распределения СТЭ при мощных вибрациях в области низких частот, обнаружение и измерение СТЭ при непрерывных колебаниях в высокочастотной (геоакустической) области, а также при импульсных ударных воздействиях. Кроме того, важная часть работы — долговременный мониторинг температуры в ближней зоне мощного вибратора, совмещенный с активным вибросейсмическим мониторингом.

#### ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В соответствии с задачами в качестве возбудителей колебаний использовались мощный низкочастотный виброисточник ЦВ-40 (рис. 1), построенный в Геофизической службе СО РАН, маломощный высокочастотный геоакустический пьезокерамический источник (рис. 2), разработанный в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (ИНГГ СО РАН), а также различные устройства ударного действия, такие как “падающий груз” и удар ручной кувалды.



Рис. 1. Низкочастотный сейсмический вибратор ЦВ-40



Рис. 2. Геоакустический пьезокерамический источник в рабочем положении

Метод измерения температуры основан на традиционном способе с использованием терморезисторов. Датчиками служили терморезисторы КМТ-1, оформленные в виде щупов и протарированные в термокамере по  $k$  точкам ожидаемого рабочего диапазона температур. На полученный ряд дискретных значений сопротивлений  $R_k(T_k)$  для каждого датчика ( $T_k$  — температура по Цельсию в  $k$ -й точке диапазона,  $R_k$  — соответствующее текущее значение сопротивления датчика) путем подбора констант  $A$ ,  $B$  и  $C$  методом наискорейшего спуска "натягивалась" аналитическая функция, известная как формула Кутасова [16]:

$$R = A \exp\left(\frac{B}{K} + \frac{C}{K^2}\right), \quad (1)$$

где  $K = T^{\circ}\text{C} + 273.15$  — температура Кельвина, после чего по измеренному сопротивлению  $R$  данного датчика определялась его температура Цельсия по формуле

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{B + \sqrt{B^2 + 4 \operatorname{Ln}\left(\frac{R}{A}\right)C}}{2 \operatorname{Ln}\left(\frac{R}{A}\right)} - 273.15. \quad (2)$$

В диапазоне температур  $-1 \div +20$  °С в контрольных точках отклонение аппроксимирующей функции (1) не превысило 0.1 °С. Как показали последующие эксперименты, дифференциальная чувствительность измерений температуры достигала  $0.1 \cdot 10^{-3}$  °С.

Каждый датчик был выполнен в виде щупа, представляющего собой термистор, припаянный и покрытый влагостойким электроизоляционным лаком на конце длинной витой пары из жесткого медно-стального провода. Такая конструкция позволяла внедрять датчики на глубину до 6 м через тонкий прокол в грунте, предварительно выполненный стальным составным прутком, забиваемым молотком и извлекаемым специальным приспособлением. В забое каждой скважины устанавливался один датчик, что гарантировало его плотный контакт с породой и минимальное влияние подводящих проводников. Простота и дешевизна датчиков позволяет изготавливать их в большом количестве собственными силами, а технология проколов обеспечивает точную установку в желаемую "точку" полупространства. Регистрация проводилась двумя видами аппаратуры, созданной в ИНГГ СО РАН: автономной 8-канальной цифровой станцией температурного мониторинга [17] и быстродействующим аналоговым измерителем дифференциальных сопротивлений с регистрацией на цифровой осциллограф.

#### НАГРЕВ ГРУНТА МОЩНЫМИ НИЗКОЧАСТОТНЫМИ ВИБРАЦИЯМИ

В экспериментах с тяжелыми низкочастотными вибраторами главная задача заключалась в регистрации СТЭ в возможно более широкой окрестности источника колебаний. При этом маскирующими факторами и причинами ошибок могли быть: 1) нагрев среды под действием тепла приводных электродвигателей, передаваемого в грунт с помощью теплопроводности, 2) нагрев среды под действием блуждающих промышленных токов и 3) естественные температурные тренды — суточный и сезонный.

Первые два фактора оценены с помощью эксперимента при заторможенных дебалансах, имитирующего рабочий по тепловым потерям режим двигателей при отсутствии механических колебаний. В этом эксперименте не было выявлено видимого повышения температуры среды, превышающего фоновый шум, хотя электродвигатели нагревались даже сильнее, чем при нормальной работе (в дальнейшем упомянутые факторы во внимание не принимались).

Погодно-климатический тренд температуры оказывает существенное влияние на результаты измерений. Наиболее эффективным приемом его распознавания оказался режим повторно-кратковременного включения вибратора, который позволял выявлять “пилообразную” составляющую вариации температуры, очевидно связанную с тепловой диссипацией механической энергии. Такие вариации заметны и измеримы даже на фоне более интенсивного, но гладкого погодно-климатического тренда. Иногда для его выделения на записи конкретного датчика использовался ход температуры на вспомогательном датчике, размещенном на такой же глубине в стороне от вибратора. При отсутствии контрольного датчика тренд основного датчика до начала цикла вибровоздействий экстраполировался линейно.

На рис. 3 представлена запись температур типичного полусуточного температурного мониторинга под излучающей платформой низкочастотного вибратора. Датчики располагались на глубине от 20 до 50 см у края вибратора, а также в стороне от него. Жирные части линий графика соответствуют интервалам работы вибратора, тонкие — паузам. В интервале времени 18:00–18:36 видны пробные включения вибратора. В интервале 22:00–22:47 запускается линейная развертка частоты (свип) в полосе частот 8–11.3 Гц; в интервале 00:00–00:47 — свип в полосе 6.25–9.5 Гц; в интервале 02:00–03:00 — непрерывная серия из 6 моночастот с шагом 0.5 Гц от 8 до 10.5 Гц; в интервале 04:00–04:47 — свип в полосе 8–11.3 Гц (дубль свипа в 22:00); в интервале 06:00–07:15 — удлиненный линейный свип в полосе 6.25–11.3 Гц, перекрывающий оба диапазона.

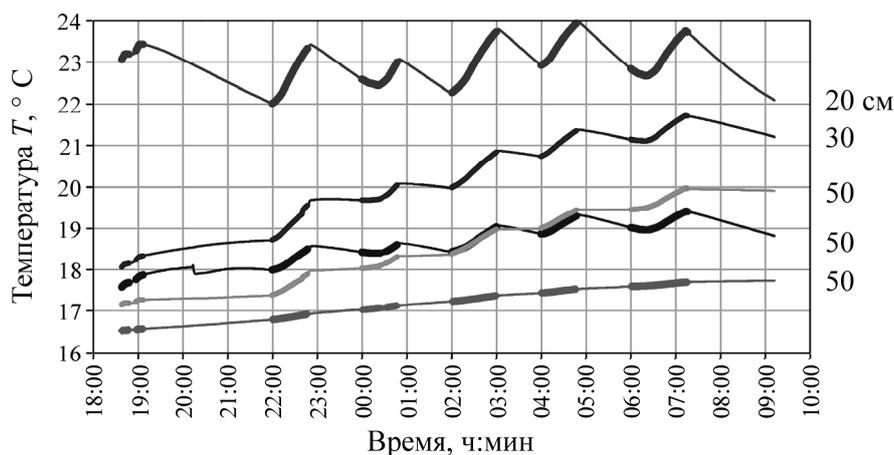


Рис. 3. График полусуточного мониторинга температуры в 5 точках под платформой вибратора ЦВ-40 и на удалении от нее

На этой записи можно заметить, что видимая температурная чувствительность некоторых точек среды явно зависит от предшествующих воздействий. Так, сравнивая нагрев на глубине 20 см в двух идентичных сеансах вибрации, начавшихся в 22 и 04 ч, видим, что в первом из них нагрев оказался приблизительно на 40 % выше. Это явление постепенного ослабления сейсмотермического эффекта под действием предшествующих длительных интенсивных колебаний, несомненно, сродни эффектам насыщения. Мы назвали его “эффектом усталости”. Эту аналогию можно продолжить, поскольку отмечается и обратный процесс самопроизвольного восстановления сейсмотермических свойств — релаксации, или “отдыха”.

Следующее наблюдение касается зависимости СТЭ от электрической мощности, потребляемой вибратором от сети. На рис. 4 сопоставляются две характеристики работы вибратора: энергочастотная (мощность, затрачиваемая на создание колебаний) и термочастотная (скорость

роста температуры под плитой). Взаимная коррелированность этих графиков очевидна. Низкая скорость нагрева в области низких частот сопровождается малым уровнем энергозатрат вибратора и может быть связана как с низкой частотой, так и с низкой амплитудой силы дебалансного вибратора на низкой частоте, зависящей от частоты квадратично. Возможна также зависимость СТЭ от обоих этих факторов, но графики на рис. 4, к сожалению, не дают ответа на этот вопрос. Частотная зависимость отмечается в вариациях температуры при вибровоздействиях разного частотного диапазона. Например, при одинаковой длительности сеансов вибрации в 22 и 00 ч наблюдаются существенно разные их термические реакции (см. рис. 3). Если в первом из них рост температуры начинается после включения вибратора, то во втором — в первый момент СТЭ настолько слаб, что не может преодолеть естественный отрицательный суточный температурный тренд. Действительно, в первом случае вибратор начинает развертку частоты с 8 Гц, а во втором — с 6.5 Гц. С ростом частоты амплитуда и мощность колебаний растут, вследствие чего интенсивность нагрева возрастает, изменяя общее направление хода температуры. Отметим также, что на удлиненном сеансе вибровоздействия в 06:00, перекрывающем полосы частот первого и второго сеансов, общий прирост температуры оказался ниже, чем в одном лишь первом сеансе. По мнению авторов, это можно объяснить эффектом “усталости” вследствие длительной предшествующей работы.

Благодаря использованию разных режимов работы вибратора в широком частотном диапазоне, удалось построить зависимость скорости тепловой диссипации сейсмической энергии и затраты электрической энергии на механическую работу вибратора.

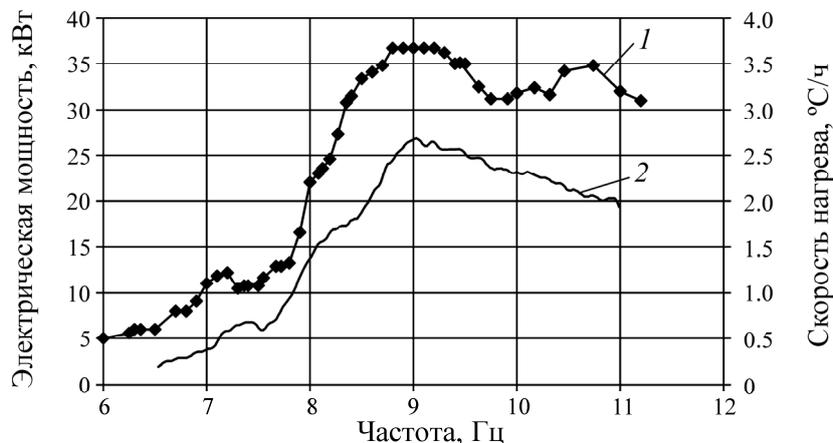


Рис. 4. Электрическая мощность (1) вибратора ЦВ-40 и сглаженная по частоте скорость нагрева (2) грунта на глубине 20 см как функция частоты

С помощью вибратора ЦВ-40 на протяжении последних лет силами Геофизической службы СО РАН выполняется активный вибросейсмический мониторинг [18]. На базе этих работ в ИНГТ СО РАН с 2011 г. организован долговременный температурный мониторинг с помощью 8 термощупов, установленных в ближней зоне виброисточника на глубине от 1 до 6 м. Первым важным результатом такого мониторинга явилось пространственное распределение интенсивности СТЭ (рис. 5) ниже 1 м в подвибраторном массиве в летний период [19, 20].

Оценим максимальную механическую работу вибратора  $Q$ , затраченную на нагрев среды под платформой. Введем обозначения:  $c$  — удельная теплоемкость грунта,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot 1^\circ\text{C})$ ;  $h$  — глубина под платформой вибратора, м;  $S$  — площадь платформы,  $\text{м}^2$ ;  $\mu(h)$  — скорость роста температуры на глубине  $h$  при работе вибратора ЦВ-40 с максимальной потребляемой мощно-

стью. Для согласования размерностей используем величину  $\mu$ , отнесенную к секунде ( $\Delta T^\circ\text{C}/\text{с}$ ), а также допустим, что нагреванию подвержен столб грунта сечением, равным площади платформы, и глубиной до наиболее глубокой точки заложения датчика (6 м). При этом в каждом горизонтальном сечении на глубине  $h$  величину  $\mu$  будем считать постоянной. С учетом такого допущения можно провести приближенный расчет по формуле

$$Q(H) = c\rho S \int_0^H \mu(h) dh, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность грунта.

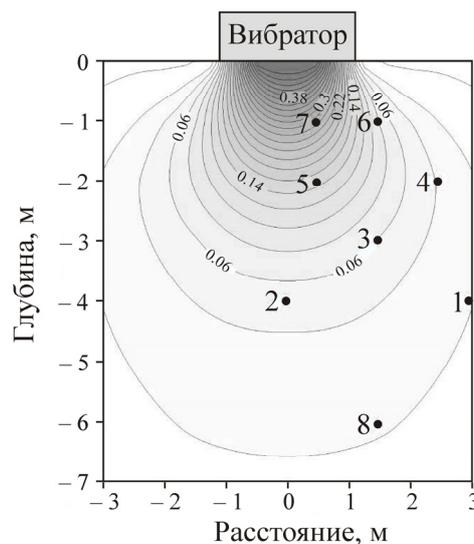


Рис. 5. Распределение интенсивности СТЭ ( $^\circ\text{C}/\text{ч}$ ) в ближней зоне вибратора ЦВ-40 в летний период: 1 – 8 — номера термощупов

Эмпирическая зависимость  $\mu(h)$ , полученная путем анализа множества экспериментов в летний период, в билигарифмической шкале представлена на рис. 6. Начиная с глубины  $h = 0.2$  м, она хорошо аппроксимируется степенной функцией

$$\mu(h) = 0.068h^{-1.16}, \quad (4)$$

которая также показана на рис. 6 сплошной линией. Эта аппроксимация дает основание экстраполировать зависимость (4) до несколько больших глубин.

Примем для расчета значение теплоемкости сухого утрамбованного грунта по справочнику [21]:  $c = 1.8$  кДж/(кг· $1^\circ\text{C}$ ). По нашим измерениям, плотность грунта  $\rho = 1800$  кг/м<sup>3</sup>, площадь платформы  $S = 8$  м<sup>2</sup>. Расчет показал, что до глубины 6 м мощность тепловых потерь в столбе грунта сечением 8 м<sup>2</sup> составила около 9 кВт, или 20 % от максимальной электрической мощности вибратора, а с использованием экстраполяции до глубины 10 м можно ожидать потери до 9.7 кВт (27 %).

Рассмотрим далее результаты длительного температурного мониторинга. На рис. 7 представлен график изменения температуры в различных точках грунтового массива под вибратором в период 26.10.2012 – 01.03.2013 гг. В начальной (осенней) части этого 4-месячного периода на фоне круто падающего климатического тренда видны положительные скачки температуры, связанные с еженедельными вибросессиями. В начале ноября в процессе постепенного промерзания грунта в верхнем слое (на рис. 7 не показаны) до  $-2^\circ\text{C}$  датчики на глубине 0.2 м прак-

тически перестают отвечать на вибровоздействия. В то же время нижние датчики, расположенные в еще не замерзшем грунте, продолжают реагировать на вибрацию, хотя и с постепенно снижающейся чувствительностью. Следует отметить, что эта “постепенность” связана с реальным ослаблением амплитуды колебаний вибратора до 3 раз вследствие замерзания подстилки. Углубляющееся промерзание повышает жесткость верхнего слоя, что приводит к снижению амплитуды динамической деформации, в том числе и в незамороженных слоях.

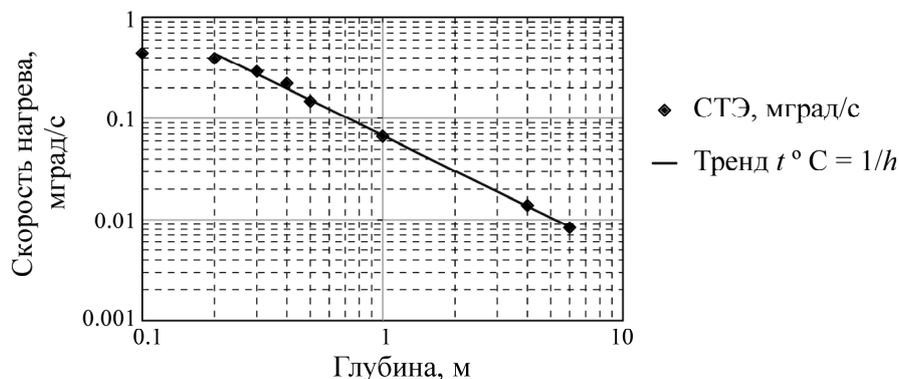


Рис. 6. Максимальная скорость нагрева грунта под вибратором ЦВ40 как функция глубины (точки — эксперимент; линия — аналитическая аппроксимация)

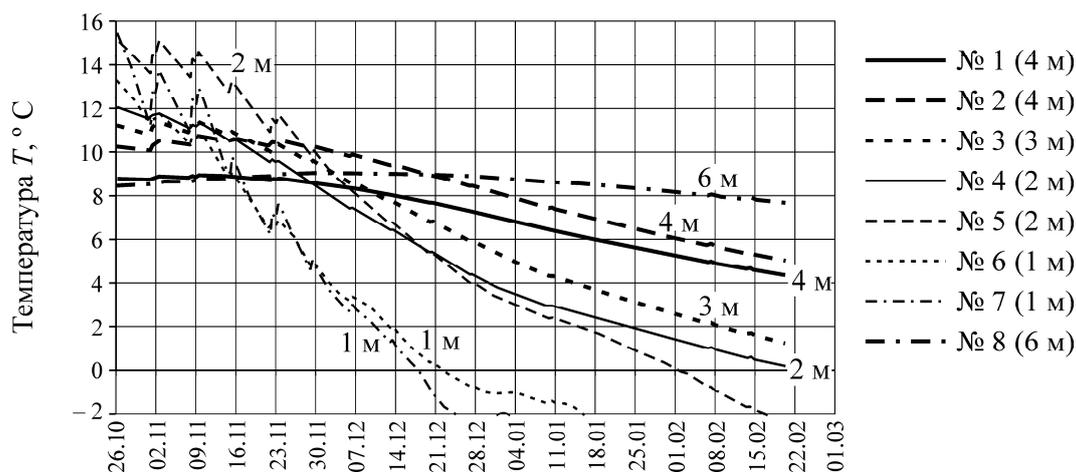


Рис. 7. Ход температуры под вибратором в период 26.10.2012–01.03.2013 гг. Положительные скачки температуры — проявления СТЭ — связаны с еженедельными включениями вибратора. 1–8 — номера термошупов

#### НАБЛЮДЕНИЯ СТЭ ПРИ ОТНОСИТЕЛЬНО СЛАБЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Высокочастотный с сейсмологической точки зрения пьезокерамический источник, показанный на рис. 2, развивает и отдает в грунт в режиме непрерывных колебаний активную мощность в диапазоне частот 50–500 Гц не более 10 Вт. В эксперименте с этим источником датчик температуры был установлен на глубине 10 см под излучающей плитой. Воздействие представляло собой серию из 60 периодически повторяющихся свип-сигналов 2-секундной продолжительности в частотном диапазоне 250–500 Гц, чередующихся 2-секундной паузой. На рис. 8 показан 11-минутный интервал записи температуры этого датчика, включающий в себя указанную серию свип-сигналов. Интервал работы источника хорошо заметен на фоне естественного температурного тренда.

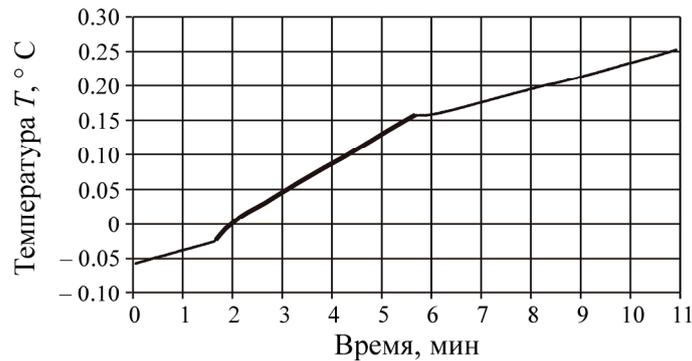


Рис. 8. Тепловое действие акустических волн в грунте на глубине 10 см (интервал акустических воздействий выделен утолщением)

На рис. 9 интервал серии свип-воздействий вычленен и редуцирован: из него вычтена линейная часть тренда, после чего увеличен графический масштаб по оси ординат. В результате оказалась видна реакция температуры на каждую 2-секундную посылку свип-сигнала (их можно буквально пересчитать). Кроме того, в начальной части серии скорость нагрева грунта достигала  $0.7 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ , т. е. оказалась почти такого же порядка величины, как и при работе мощного вибратора. В течение первых 4–6 воздействий ярко проявился эффект насыщения, или “усталости”. При этом тепловые потери акустической мощности в слое толщиной 10 см, прилегающем к платформе, рассчитанные по формуле (3), составили около 3 Вт, или около 30 % мощности вибратора.

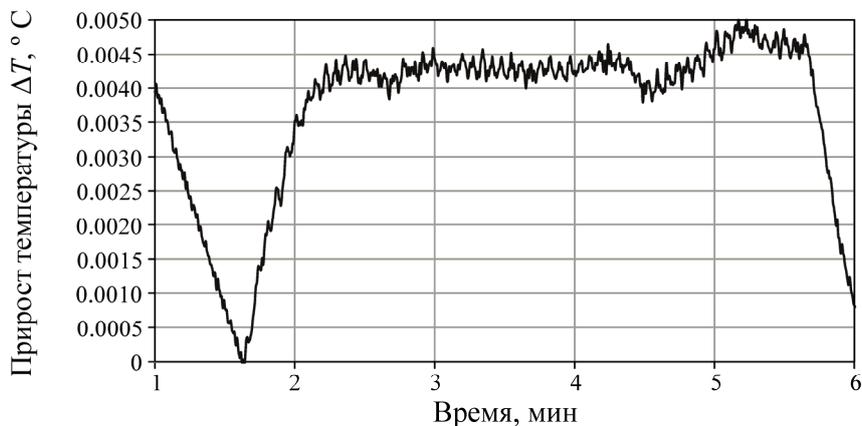


Рис. 9. Дифференциальный ход температуры, обусловленный акустическими воздействиями (получено из рис. 8 путем вычитания естественного из общего тренда)

Факт близости абсолютных значений тепловых потерь при мощных низкочастотных и слабых высокочастотных вибрациях можно объяснить следующим образом. Если вычесть из графика мощности НЧ-вибратора на рис. 4 мощность холостого хода электродвигателей (около 3 кВт), то можно заметить простую пропорциональность скорости нагрева текущей мощности вибратора.

#### ТЕМПЕРАТУРНАЯ РЕАКЦИЯ НА ИМПУЛЬСНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В качестве импульсного источника использовался калиброванный по кинетической энергии удар кувалды по лежащей на грунте стальной пластине размером 14×1.5 см. Контрольная точка температуры выбрана на глубине 25 см. В момент удара контролировалось также импульс-

ное давление в грунте в близкой точке, которое измерялось мембранным резистивно-тензометрическим датчиком. В силу принципиально разных требований к технике регистрации коротких импульсов давления и относительно медленных изменений температуры, эксперименты по регистрации указанных процессов выполнялись отдельно. Сначала регистрировалась медленная непрерывная реакция температуры на серию из 10 ударов по еще не нарушенному грунту, а в повторном эксперименте записывались только импульсы давления. На рис. 10 последние показаны с наложением. Вследствие постепенного погружения ударной пластины фактическая глубина датчиков уменьшалась, отчего амплитуда давления возрастала и на глубине 25 см достигла 15 атм.

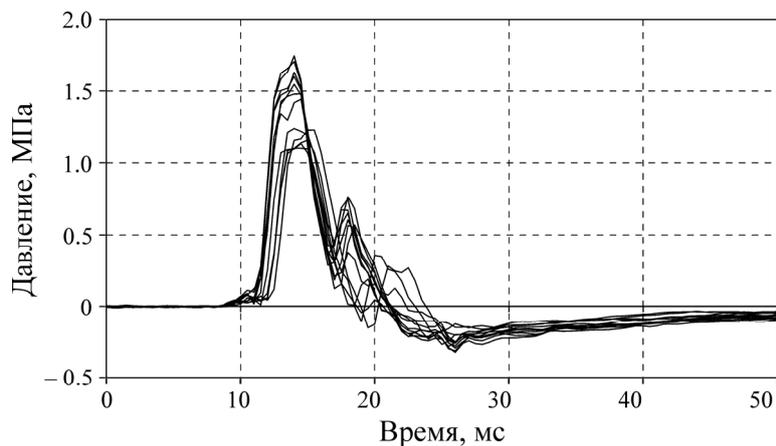


Рис. 10. Импульсы давления в грунте на глубине 30–25 см при ударах по поверхности с энергией 100 Дж

На рис.11 показан редуцированный (путем удаления естественного суточного тренда) ход температуры в данном эксперименте. Удары производились с периодом 3 с и энергией 100 Дж каждый.

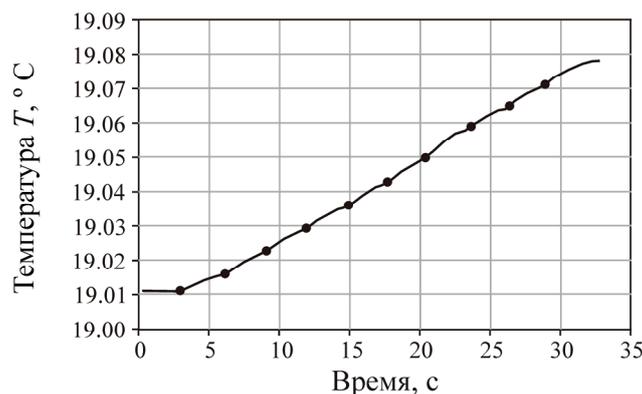


Рис. 11. Редуцированный прирост температуры в грунте на глубине 25 см вследствие ударов кувалды по поверхности (моменты ударов отмечены точками)

До первого удара редуцированный температурный тренд был “горизонтальным”. Каждый удар вызывал нагрев приблизительно на  $7 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ . После последнего удара тренд плавно вернулся на “горизонталь”, что свидетельствует о достоверности эксперимента. Таким образом, за

30 с суммарная механическая энергия в 1 кДж, приложенная к поверхности, нагрела грунт на глубине 25 см на  $0.07^\circ\text{C}$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сейсмоотермический эффект, по нашему мнению, является важнейшей составной частью процесса поглощения упругих волн. Физическая причина СТЭ, по-видимому, заключается во внутреннем трении частиц колебательных деформаций связной среды. Преобладающую роль в описанных экспериментах играет вязкое трение, связанное с наличием внутриводной воды. Об этом свидетельствует исчезновение нагрева в случаях, когда температура понижается до  $0^\circ\text{C}$ . В результате замерзания воды происходит фазовое превращение структуры среды из дисперсной в квазикристаллическую. Другое свидетельство тому — эффект насыщения, или “усталости”, который можно объяснить тиксотропными свойствами грунта. Как известно [22], тиксотропность объясняется обратимым разупрочнением структурных связей между минеральными частицами связной породы. При механическом воздействии происходит переход связанной воды в свободную, что вызывает снижение прочности структурных связей, снижение вязкости грунта и, следовательно, уменьшение тепловых потерь. Прекращение вибрационного воздействия приводит к обратному переходу воды из свободного состояния в связанное и к восстановлению прочности грунта. О наличии разуплотнения связной среды под воздействием вибрации свидетельствует также снижение скорости сейсмических волн под воздействием интенсивных вибрационных колебаний [23, 24].

### ВЫВОДЫ

Сейсмоотермический эффект — внутренний нагрев сплошной среды, вызванный воздействием сейсмических волн или механических деформаций, — исследован при непрерывных и импульсных возмущениях в диапазоне частот от единиц до сотен герц. Уровень СТЭ определяется величиной скорости возрастания температуры, обусловленной данным воздействием.

Для наблюдения СТЭ необходима регистрация температуры с дифференциальной чувствительностью не хуже  $10^{-3}^\circ\text{C}$  в полосе частот от 0 до не менее 1 Гц.

На существующем уровне техники СТЭ можно наблюдать только в связанной неконсолидированной среде типа мягкого грунта. При консолидации грунта в результате замерзания СТЭ исчезает. Предположена взаимосвязь СТЭ с тиксотропностью грунта.

Для области низких частот (8–12 Гц) в летнее время получено пространственное распределение интенсивности СТЭ до глубины 6 м под плитой 40-тонного вибратора с механической мощностью до 36 кВт. Выведена эмпирическая формула затухания СТЭ с глубиной, имеющая четко выраженный степенной характер, и на ее основе дана оценка тепловых потерь сейсмической энергии в ближней зоне вибратора, составившая 20 % мощности вибратора.

Сейсмоотермический эффект обнаружен и измерен при маломощных колебаниях в области высоких частот (250–500 Гц). При этом, несмотря на значительно (на 3 порядка) меньшую мощность по сравнению с низкочастотным случаем, уровень СТЭ оказался близким к низкочастотному. Потери на тепло в ближней зоне ВЧ-источника составили около 30 % его мощности.

Близость уровней СТЭ при мощных низкочастотных и слабых высокочастотных воздействиях дает основание предполагать, что уровень СТЭ, помимо зависимости от мощности колебаний, зависит от их частоты квадратично.

При продолжительных воздействиях большой интенсивности наблюдается постепенное снижение уровня СТЭ (эффект насыщения, или “усталости”). В покое происходит обратный процесс восстановления исходного уровня СТЭ — релаксация. Время релаксации значительно превышает время насыщения.

Авторы благодарят А. Д. Дучкова, С. А. Казанцева, М. Е. Пермякова за ценные консультации и предоставленную аппаратуру, И. Н. Злыгостева и С. С. Полозова за помощь в проведении экспериментов. Авторы отмечают исключительно важную роль В. М. Носова в подготовке и метрологическом обеспечении экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Handbook** of terrestrial heat-flow density determination, Ed. by R. Haentel, L. Rybach and L. Stegena, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston–London, 1988.
2. **Shimamura H., Ino M., Hikawa H., and Iwasaki T.** Groundwater microtemperature in earthquake regions, *Pageoph*, 122, 1985.
3. **Cermak V., Safanda J., and Bodri L.** Precise temperature monitoring in boreholes: evidence for oscillatory convection? Part 1: Experiments and field data, *International Journal of Earth Sciences*, 2007, 97(2).
4. **Cermak V., Safanda J., and Kresl M.** Intra-hole fluid convection: High-resolution temperature time monitoring, *Journal of Hydrology*, 2008, Vol. 348.
5. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
6. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. II // ФТПРПИ. — 2013. — № 2.
7. **Опарин В. Н., Киряева Т. А., Гаврилов В. Ю. и др.** О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // ФТПРПИ. — 2014. — № 2.
8. **Активная сейсмология** с мощными вибрационными источниками / отв. ред. Г. М. Цыбульчик. — Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Фил. “Гео” Изд-ва СО РАН, 2004.
9. **Курленя М. В., Сердюков С. В.** Определение области вибросейсмического воздействия на месторождении нефти с дневной поверхности // ФТПРПИ. — 1999. — № 4.
10. **Сердюков С. В.** Влияние вибросейсмического поля на тепловые и фильтрационные процессы в битумном пласте // ФТПРПИ. — 2001. — № 2.
11. **Савченко А. В.** Сравнительный анализ волновых методов увеличения нефтеотдачи // ФТПРПИ. — 2006. — № 3.
12. **Макарюк Н. В.** Применение метода сейсмоволнового вибровоздействия для повышения фильтрационных и технологических параметров скважинного подземного выщелачивания металлов // ФТПРПИ. — 2009. — № 6.
13. **Сказка В. В., Сердюков А. С., Ерохин Г. Н., Сердюков С. В.** Анализ ближней зоны излучения сейсмического источника, действующего вдоль оси скважины // ФТПРПИ. — 2013. — № 1.
14. **Худзинский Л. Л.** Результаты температурных исследований под плитой виброисточника // ДАН. — 1990. — Т. 314. — № 4.

15. **Велинский В. В., Геза Н. И., Саввиных В. С., Юшин В. И.** О тепловых потерях механической энергии в ближней зоне сейсмического вибратора // Геофизические методы изучения земной коры: сб. науч. докл. Всерос. геофиз. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР Э. Э. Фотиади, 20–22 января 1997 г. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1998.
16. **Кутасов И. М.** Определение температуры термисторных датчиков // Тепло- и массообмен в мерзлых толщах земной коры. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.
17. **Казанцев С. А. Дучков А. Д.** Цифровая аппаратура для мониторинга температуры и других медленно меняющихся параметров // Проблемы сейсмологии III тысячелетия: материалы междунар. геофиз. конф. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003.
18. **Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли / А. С. Алексеев и др.; отв. ред. Б. Г. Михайленко, М. И. Эпов; СО РАН, ИВМиМГ.** — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010 (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 27).
19. **Аюнов Д. Е., Пермьяков М. Е. Юшин В. И.** Сейсмотермический эффект при работе вибратора на Быстровском вибросейсмическом полигоне // Сб. материалов VIII Междунар. науч. конгр. “ГЕО-Сибирь-2012”. — Т. 2: Недропользование. Горное дело. Новые направления разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. — Новосибирск: Изд. СГГА, 2012.
20. **Юшин В. И., Аюнов Д. Е.** Термический эффект при вибросейсмическом воздействии на грунт // Интерэкспо “ГЕО-Сибирь-2014”: междунар. конф. “Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология”. Т. 3. — Новосибирск: Изд. СГГА, 2014.
21. <http://www.helpw.ru/Теплоемkost.php>.
22. <http://www.edudic.ru/tsp/1588/>.
23. **Геза Н. И., Егоров Г. В., Мкртумян Ю. В., Юшин В. И.** Экспериментальное исследование мгновенных вариаций скорости и затухания сейсмических волн в рыхлой среде in situ, подвергаемой пульсирующей динамической нагрузке // Геология и геофизика. — 2001. — Т. 42. — № 7.
24. **Геза Н. И., Егоров Г. В., Юшин В. И.** Особенности напряженного состояния рыхлой среды, подвергаемой пульсирующей нагрузке // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. междунар. конф. — Новосибирск: Изд. ИГД СО РАН, 2004.

*Поступила в редакцию 24/XII 2014*