

Экспериментальное определение эффективных тепловых свойств почв *in situ*

И. И. Фадеева^{1,2}, Ю. Г. Карин¹

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный университет (НГУ), г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: FadeevaII@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Тепловое состояние почвы в определенном месте в определенное время характеризуется окружающей температурой, наличием солнечного излучения, способностью почвы к поглощению ее поверхностью солнечной радиации, наличием источников/стоков тепла и способностью толщи почвы поглощать и передавать тепло, что в математическом описании соответствует её тепловым свойствам. В работе представлено описание попытки создания измерительного устройства для определения тепловых свойств почв *in situ* (на месте). Метод определения тепловых свойств состоит в создании постоянного радиального теплового потока с помощью заглубленного на полтора метра линейного источника и измерении температур с помощью параллельных нагревателю температурных кос (1 и 2), расположенных на расстояниях 5 (1-ая коса) и 10 (2-ая коса) см от нагревателя. Измерения происходили до наступления морозов 1 ноября 2021 и 11-12 апреля 2022.

Ключевые слова: тепловые свойства, линейный источник постоянной мощности, экспериментальные измерения

Experimental determination of effective thermal properties of soils *in situ*

I. I. Fadeeva^{1,2}, Y. G. Karin¹*

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation

² Novosibirsk State University (NSU), Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: FadeevaII@ipgg.sbras.ru

Abstract. The report presents a description of an attempt to create a measuring device for determining the thermal properties of soils *in situ* (*in situ*). The method of determining soils thermal properties consists in creating by linear source of constant radial heat flux and measuring temperature by two electrical cable (wich is parallel to the heater and locate at distances of 5 (1st cable) and 10 (2 th cable) cm from the heater) with 7 soldered temperature sensors with 20 cm from each other. The measurements were taken on November 1, 2021 before the onset of frost and after frost on April 11, 12, 2022. The thermal state of the soil in a certain place and time is characterized by the ambient temperature, the presence of solar radiation, the ability of the soil to absorb solar radiation, the presence of sources/sinks of heat, and the ability of the soil to absorb and transfer heat, which in the mathemati-cal description corresponds to its thermal properties, which we want to determine.

Keywords: soils thermal properties, linear source of constant power, experimental measurements *in situ*

Введение

Тепловое состояние почвы зависит от окружающей температуры, внутренних/внешних источников тепла и от её способности поглощать и передавать тепло, что в математическом описании соответствует тепловым свойствам почвы. Способность почвы поглощать и удерживать определенное количество тепла определяется теплоемкостью почвы (C , Дж/кг/К), способность почвы передавать (проводить) тепло от горячего к холодному определяется ее теплопроводностью (λ , Вт/м/К). Температуропроводность определяется известным отношением теплопроводности к объемной теплоемкости: $a = \lambda/\rho C$ [1], где ρ , кг/м³ – плотность.

Цикличность поступающей солнечной энергии определяет годовую и суточную периодичность изменений температуры почв. Наибольшая амплитуда суточных колебаний температуры наблюдается на поверхности почвы, с глубиной амплитуда значительно снижается и затухает на глубине больше полуметра. Процесс передачи тепла от поверхности вглубь длительный, и экстремумы суточных температур с глубиной запаздывают более чем на 2 ч на каждые 10 см глубины. Почвы бывают разных типов, это определяет их особенности суточного хода температур. Годовая динамика температуры почвы характеризуется наличием летнего (прогрев почвы) и зимнего (охлаждение) периодов, зависит от зоны её расположения, имеет большую амплитуду и выражена на большей глубине (более 3 метров). Растительность и снег предохраняют почву от резких перепадов температуры. В районах крайнего севера имеет значение глубина промерзания почвы, которая зависит от мощности и длительности снежного покрова.

Цель данного исследования состоит в экспериментальном определении тепловых свойств почв в их естественных условиях (*in situ*), для дальнейшего определения теплового режима.

Методы и материалы

Предлагаемый экспериментальный метод определения тепловых свойств почвы *in situ* состоит в создании в почве трех параллельных длинных (1.5 метра) тонких (диаметр 12 мм) отверстий в одно из которых помещается нагреватель и в другие два, находящиеся на расстояниях 5 и 10 см от нагревателя, температурные косы. Температурная коса представляет собой электрический кабель с припаянными к нему семью терморезисторами на одинаковом расстоянии 20 см друг от друга, кабель с резистивными датчиками изолирован от влаги внешней среды самоклеящейся термоусадкой. С помощью линейного нагревателя в изучаемой почве создается радиальный тепловой поток и одновременно происходит запись изменений во времени температур с помощью датчиков кос.

Схема измерительной установки представлена на рис. 1: один тонкий (диаметр 9 мм), длинный (1.5 метра) нагреватель и две температурные косы на расстояниях 5 (1-ая коса) и 10 (2-ая коса) см от нагревателя.

Для создания в земле трех строго параллельных 1.5 метровых отверстий использовалась вбиваемая в землю штанга диаметром 12 мм и направляющая данную штангу конструкция (рис. 2).

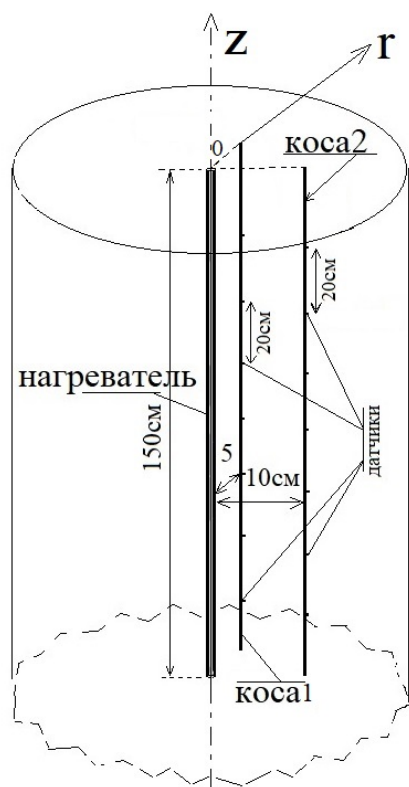


Рис. 1. Схема расположения нагревателя и измерительных кос с датчиками измерительной установки



Рис. 2. Фото деревянной направляющей конструкции с забиваемой в землю длиной (>1.5м) штангой

Для измерения сопротивлений терморезистивных датчиков 1-ой и 2-ой кос (для дальнейшего перевода их в температуры) во времени использовались изготовленные станции (1 и 2), на базе микроконтроллера stm32L с 8-ми канальным 24-х битным АЦП и памятью для хранения измеренных значений. Для измерения тепловой мощности, выделяемой линейным нагревателем, на базе платы Arduino Uno был изготовлен измеритель потребляемой нагревателем электрической мощности, записывающий дату, время, ток через нагреватель, падение напряжения на нагревателе и потребляемую нагревателем электрическую мощность.

Первые измерения проводили в конце осени 1 ноября 2021. С помощью направляющей конструкции и длинной металлической штанги в земле вблизи домика немагнитного павильона лаборатории электромагнитных исследований ИНГГ СО РАН пробили три тонких длинных параллельных отверстия, в которые далее помещали нагреватель и две температурные косы. В качестве источника электрической мощности нагревателя сначала использовался автомобильный аккумулятор, что оказалось совсем не подходящим так как большую часть времени выделяемая нагревателем тепловая мощность падала от 70 до 40 Вт на 1.5 метра, см. рис. 3.

12 апреля 2022 были получены данные, представленные на рис. 4. В качестве источника электрической мощности нагревателя использовался источник постоянного тока (автомобильное зарядное устройство «Кедр»), который запи-

тывался от сети. Через нагреватель два раза пропускаться постоянный электрический ток в течение 40 мин, при этом записывалась потребляемая нагревателем электрическая мощность (см. зависимость мощности от времени, нижний график, рис. 5) и одновременно происходила запись изменения температур датчиков, расположенных на разных глубинах и на расстояниях 5 и 10 см от нагревателя (верхний график, рис. 5).

Математическое описание полученных термограмм может дать представление о тепловых свойствах изучаемой почвы. В однородном пространстве с бесконечно длинным и тонким источником тепла, распределение температуры вблизи источника можно определить, решив уравнения теплопроводности в осесимметричной постановке с источником на оси симметрии.

В случае нагрева среды линейным нагревателем постоянной мощности в течение времени t_0 и дальнейшего ее остывания изменение температуры будет выражаться в следующем виде [2, 3]:

$$T(r,t) = \begin{cases} \frac{Q}{4\pi\lambda} \cdot E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right), & 0 \leq t \leq t_0 & (a) \\ \frac{Q}{4\pi\lambda} \cdot \left[E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right) - E_1\left(\frac{r^2}{4a(t-t_0)}\right) \right], & t > t_0 & (b) \end{cases}$$

С момента, когда среда начинает разогреваться постоянной линейной мощностью Q [Вт/м], температура растет согласно выражению (a). После отключения электрической мощности нагревателя изменение температуры на разных расстояниях от нагревателя выражается согласно формуле (b), где $T(r,t)$ [K] - созданная линейным источником дополнительная температура среды в момент времени t [с] на расстоянии r [м] от оси нагревателя. λ [Вт/м/К] - теплопроводность среды, a [м²/с] - температуропроводность среды и $E_1(s) = \int_s^\infty \frac{\exp(-\xi)}{\xi} d\xi$ -

есть интегральная показательная функция.

Результаты

На рис. 3 представлены, полученные до морозов (1 ноября 2021), термограммы датчиков 1-ой и 2-ой косы, расположенные на разных глубинах начиная от 19 см с шагом 20 см от поверхности. Начало нагрева соответствует 0 мин на временной шкале графика. Отрицательное время соответствует температурам кос до включения нагревателя. Первая коса (k1) располагалась на расстоянии 5 см от нагревателя и ее температура значительно выше 2-ой косы (k2) в конце нагрева (90 – 111 минут). В связи со сбоем на первой станции часть записанных ею данных была утеряна.

На рис. 4 представлено распределение температуры (k1 и k2) по глубине в разные моменты времени: начало нагрева (0 min) и 40, 94, 111 минут после начала нагрева.

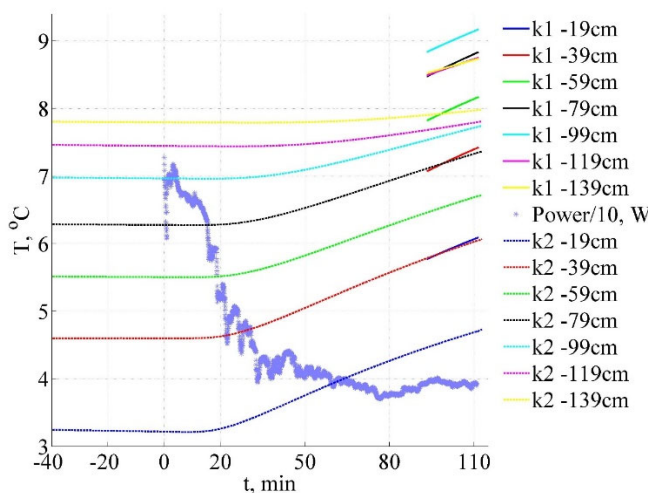


Рис. 3. Термограммы температурных датчиков 1-ой косы (сплошные линии) и 2-ой косы (пунктирные линии). Маркер звездочка – потребляемая нагревателем электрическая мощность.

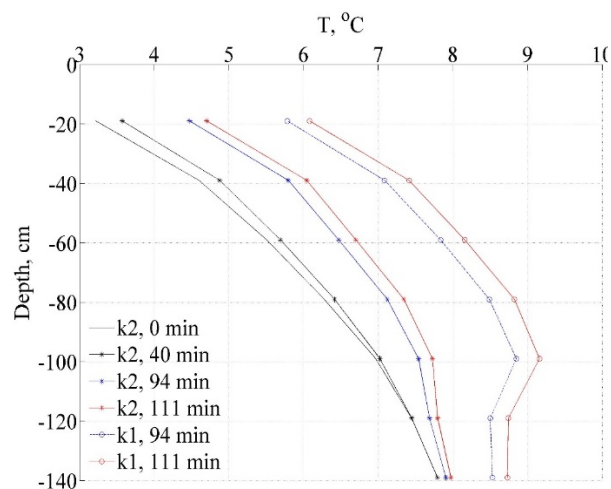


Рис. 4. Распределение температуры кос (k1 и k2) по глубине в разные моменты времени: начало нагрева (0 min) и 40, 94, 111 минут после начала нагрева

Как видно при сравнении термограмм (рис. 3), полученных датчиками на малых (до 100 см) и больших (больше 100 см) глубинах, а также из изменения распределения температуры с глубиной, видно, что тепловой поток не везде радиальный. Так температура нижнего датчика слабо изменяется в процессе нагрева среды тонким полтораметровым цилиндрическим зондом. Из равномерности прогрева температурных датчиков (термограммы, рис. 3) можно заключить, что почву можно описать однородной средой с эффективными тепловыми свойствами.

На рис. 5 представлены, полученные после морозов (12 апреля 2022), термограммы датчиков 1-ой и 2-ой кос, расположенных на глубинах: 22, 42, 62, 82, 102, 122, 142 см. На нижнем графике рис. 5 представлено время включения нагревателя и потребляемая нагревателем электрическая мощность. Через нагреватель пропускался ток, два длительных (40 мин) импульса постоянной мощности, одновременно происходила запись изменения температур датчиков температурных кос (верхний график, рис. 5).

При рассмотрении полученных 12 апреля термограмм видно, что в этот раз почва крайне неоднородна по тепловым свойствам. В случае однородной среды модельные термограммы выглядят как на рис. 7.

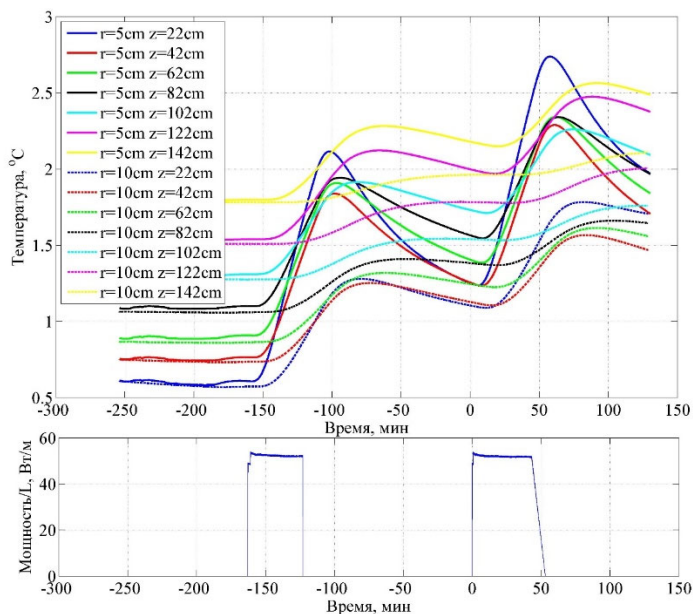


Рис. 5. Изменения температур датчиков кос 1-ой ($r=5\text{cm}$, сплошные линии) и 2-ой ($r=10\text{cm}$, пунктирные линии), согласно подаваемой на линейный нагреватель мощности (нижний график).

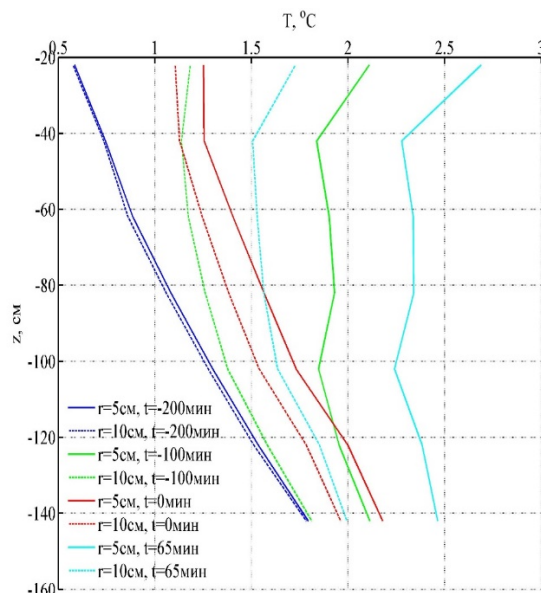


Рис. 6. Распределение температуры по глубине в разные моменты времени: до нагрева (-200 мин), в процессе 1-го/2-го нагрева (-100, 65 мин), 0 мин – после 1-го нагрева.

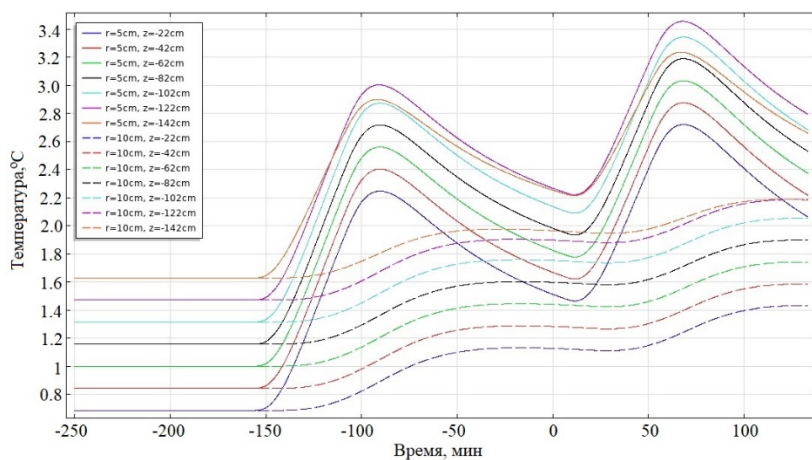


Рис. 7. Численные термограммы для однородной среды нагреваемой линейным нагревателем, с потребляемой мощностью, представленной на нижнем графике (рис. 5).

Заключение

На данном этапе были сделаны первые попытки постановки теплового эксперимента и подходящего для него математического описания.

При рассмотрении полученных 1 ноября 2021 и 12 апреля 2022 термограмм складывается понимание, что тепловые свойства почвы - это динамические ве-

личины, и понимание их динамики даст представление о тепловом режиме почвы в ее естественных условиях.

Для правильного математического описания экспериментальных измерений необходимо учитывать все тепловые процессы, которые вносят значительный вклад в изменения температуры датчиков заглубленных в почву кос в процессе нагрева почвы заглубленным на 1.5 метра длинным цилиндрическим нагревателем и исключать неизвестный вклад внешних источников, например, неизвестное количество солнечной энергии поглощаемое поверхностью почвы в процессе эксперимента.

Благодарности

Выражается благодарность за финансовую поддержку исследования по базовому проекту НИР 0266-2022-0029.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lide D. R. CRC Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton: CRC Press, 2009. – P. 2–65.
2. Kluitenberg, G. J., J. M. Ham, and K. L. Bristow. Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity // Soil Science Society of America Journal. – 1993. – Vol. 57. – № 6. – P. 1444-1451.
3. Bristow K.L., Kluitenberg G.J., Horton R. Measurement of soil thermal properties with a dual-probe heat-pulse technique January // Soil Science Society of America Journal. – 1994. – Vol. 58. № 5. – P. 1288–1294.

© И. И. Фадеева, Ю. Г. Карин, 2022