

Таким образом, проведенный лабораторный опыт показал, что гамма-облучение (^{60}Co) влияет на развитие листового салата сорта «Московский парниковый». Радиобиологический эффект воздействия зависит от поглощенной дозы. Ингибирующее действие радиации проявилось при облучении посевного материала дозами 3 и 6 Гр, где было зафиксировано достоверное снижение длины корня, а также при поглощенной дозе в 6 Гр статистически значимо снижалась и масса 10 проростков. Однако было обнаружено и стимулирующее действие радиации. Эффект радиационного гормезиса отмечен при поглощенных дозах 2 и 4 Гр, где достоверно увеличивалась длина ростка.

Библиографический список

1. Гераськин, С.А. Модификация развития ячменя на ранних этапах онтогенеза при воздействии γ -излучения на семена / С.А. Гераськин, Р.С. Чурюкин, Е.А. Казакова // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2015. – Т. 55. – № 6. – С. 607. – DOI 10.7868/S0869803115060065.

2. Перспективы использования радиационных технологий в агропромышленном комплексе Российской Федерации / Р.М. Алексахин, Н.И. Санжарова, Г.В. Козьмин [и др.] // Вестник РАЕН. – 2014. – Т. 14. – № 1. – С. 78-85.

3. Чурюкин, Р.С. Проявление эффекта гормезиса у растений ячменя (*Hordeum vulgare* L.) в контрастных условиях произрастания при γ -облучении семян / Р.С. Чурюкин, С.А. Гераськин // Сельскохозяйственная биология. – 2017. – Т. 52. – № 4. – С. 820-829. – DOI 10.15389/agrobiology.2017.4.820rus.

4. Волкова, П.Ю. Влияние γ -облучения семян на активность ферментов в проростках ячменя / П.Ю. Волкова, Р.С. Чурюкин, С.А. Гераськин // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2016. – Т. 56. – № 2. – С. 190. – DOI 10.7868/S0869803116020144.

5. Bitarishvili, S.V. γ -Irradiation of Barley Seeds and Its Effect on the Phytohormonal Status of Seedlings / S.V. Bitarishvili, P.Y. Volkova, S.A. Geras'kin // Russian Journal of Plant Physiology. – 2018. – Vol. 65. – No 3. – P. 446-454. – DOI 10.1134/S1021443718020024.

УДК 631.436

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЫ МЕТОДОМ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЛИНЕЙНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

Кожунов Андрей Викторович, аспирант кафедры метеорологии и климатологии ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, avkozhinov@mail.ru

Аннотация: В работе рассмотрены теоретические основы определения теплофизических свойств почвы методом нестационарного линейного источника тепла. Экспериментально определена теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность дерново-подзолистой почвы.

Полученные значения теплофизических коэффициентов могут быть использованы при параметризации математической модели теплопереноса в почвах.

Ключевые слова: теплофизические свойства почвы, теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность, дерново-подзолистая почва.

Метод нестационарного линейного источника тепла используется для измерения теплопроводности пористых материалов. Обычно такой «измеритель» состоит из контроллера и зонда, внутри щупа которого расположен нагреватель и датчик температуры. Ток поступает от нагревателя, при этом контроллер регистрирует изменение температуры. Информация о зависимости температуры щупа зонда от времени выполнения измерения при нахождении зонда в образце даёт теплопроводность образца. Однако для почв применение зондовых методов ограничено, что позволяет считать изучение особенностей для их применения актуальными [1, 2].

Реально существующие зонды отличаются от идеальных в следующих моментах:

- Зонд, по размерам близкий к идеальному, будет слишком хрупким для установки в материал.
- При измерении на улице сохранить внешнюю температуру одинаковой невозможно.
- Нагревание ненасыщенного влажного материала приводит к тому, что вода уходит из места нагрева, изменяя содержание влаги в месте измерения.
- Прodelьвание отверстий в материале приводит к дополнительному контактному сопротивлению между зондом и материалом.
- Достаточно трудно создать условия для идеального измерения.

Рассмотрим зонд с двумя щупами (SH-3) прибора Tempos [3]. К одному из щупов зонда подводится тепло в течении заданного времени нагрева (t_h). При этом изменение температуры во время нагрева и охлаждения фиксируется вторым щупом, расположенным на расстоянии 6 мм от первого. Данные обрабатываются вычитанием величины температуры окружающей среды и температурного дрефта. Результаты рассчитываются по уравнениям (1) и (2):

$$\Delta T = (q/4\pi k) * Ei(-r^2/4Dt) \text{ при } t \leq t_h \quad (1)$$

$$\Delta T = (q/4\pi k) \cdot [Ei((-r^2/4D(t-t_h)) - Ei((-r^2/4Dt))] \text{ при } t > t_h \quad (2)$$

где:

ΔT – рост температуры во втором щупе;

q – количество тепла, подводимого к первому щупу (Вт/м);

k – теплопроводность [Вт/(м·К)];

r – расстояние между двумя щупами, равное 6 мм;

D – температуропроводность ($m^2/сек$);

t – время общее (сек);

t_h – время нагрева (сек);

Ei – экспоненциальный интеграл.

Прибор TEMPOS собирает данные в течение 30 сек для расчёта температурного дрефта. Если дрефт ниже пограничного значения, ток подаётся к щупу в течение 30 сек, в это же время другим щупом регистрируется температура. Затем подача тока приостанавливается, а температура измеряется ещё в течение 90 сек. Начальная температура и дрефт вычитаются из конечной температуры и дают нам значение ΔT , рассчитанное по уравнениям (1) и (2).

Поскольку нам известны значения q , r , t и t_h , то мы можем рассчитать значения k и D . Это можно сделать, используя уравнение нелинейных наименьших квадратов. Но метод даёт ошибки в точках локальных минимумов. Если выбрать значение для D в уравнениях (1) и (2), то эти уравнения становятся линейными уравнениями наименьших квадратов. Затем мы находим значение D , при котором разница между измеренной и смоделированной температурой минимальна. Когда определены теплопроводность k и температуропроводность D , рассчитывается объёмная теплоёмкость:

$$\rho C = k / D \quad (3)$$

Если дрефт выше пограничного значения, прибор выдаст ошибку.

В зондах с одним щупом (TR-3, KS-3) для расчёта температурного дрефта тепло также подводится к щупу в течение 30 сек. Далее значения начальной температуры и температурного дрефта вычитаются из полученных результатов. Далее ток подаётся в течение 60 сек и при этом регистрируется температура зонда. Если бы зонд был линейным источником тепла, для предсказания его температуры можно было бы использовать уравнение 1. Однако при использовании уравнения 1 для зонда с одним щупом, экспоненциальный интеграл раскладывается в бесконечный ряд, где влияет только первый член. Поэтому уравнение 1 можно упростить:

$$\Delta T = (q/4\pi k) \cdot \ln t + C \quad (4)$$

Данное разложение применимо только в случае длительного времени измерения, таким образом начальными значениями пренебрегают. При длительном времени измерения температура практически не меняется, но возможны другие эффекты, снижающие точность измерений. Например, возникающее контактное сопротивление материалов, значительная объёмная теплоёмкость самого зонда и другое.

Для изучения данных эффектов были проведены исследования теплопроводности, теплового рассеивания и контактного сопротивления. В результате было выяснено, что главной проблемой является время. Если изменить уравнение на:

$$\Delta T = (q/4\pi k) \cdot \ln(t+t_0) + C \quad (5)$$

Где t_0 – заданное время, тогда все данные получаются хорошими при времени нагрева 60 сек. В этом случае эффект контактного сопротивления и теплового рассеивания либо отсутствует, либо крайне мал.

Данная методика была применена на образцах с известной теплопроводностью, таких как глицерин и водный агар, а также на сухой и влажной почве [3]. Для всех испытаний, проведённых в течение 1 минуты,

точность была выше, чем при 10-минутном измерении при расчёте по уравнению (4).

В нашем исследовании измерялись теплофизические показатели дерново-подзолистой почвы. Зависимости теплофизических параметров от влажности почвы были составлены на основе сглаженных значений влажности почвы, полученных после испарения примерно одинакового количества влаги из почвы (≈ 30 г с включением изменений массы стакана с почвой на целое число грамм).

Анализируя зависимость теплопроводности, измеренной зондами TR-3 и KS-3, от влажности почвы, видно, что до влажности, равной 35%, значения теплопроводности, полученные обоими зондами, практически совпадают и мало изменяются (таблица 1). Затем теплопроводность почвы возрастает до влажности почвы 47%, после чего начинается снижение теплопроводности, фиксируемое обоими зондами. По данным зонда TR-3, теплопроводность снижается до влажности почвы 55%, а по данным зонда KS-3 – до влажности 50%, причём минимальные значения теплопроводности по данным обоих зондов одинаковы и составляют 0,1 Вт/(м·К). Далее теплопроводность почвы снова возрастает, причём по данным зонда TR-3 она возрастает очень быстро, достигая максимума при влажности, близкой к полной влагоёмкости почвы и составляя чуть более 1 Вт/(м·К). По данным зонда KS-3, теплопроводность почвы возрастает сначала быстро, а затем более медленно, достигая максимума также при влажности, близкой к полной влагоёмкости почвы и составляя около 0,8 Вт/(м·К).

Таблица 1

Теплопроводность дерново-подзолистой почвы при различной влажности почвы в процессе высушивания почвенного образца

<i>m</i> почвы с зондами, г	<i>W</i> , %	<i>K</i> (TR-3), Вт/(м·К)	<i>K</i> (KS-3), Вт/(м·К)
746,7	67,7	1,037	0,7836
716,8	57,1	0,1458	0,5088
696,8	50,0	0,2084	0,1128
686,9	46,4	0,45	0,2947
656,9	35,7	0,2124	0,1866
627,2	25,2	0,2088	0,2028
597,5	14,6	0,1375	0,1234

На зависимости теплофизических параметров от влажности почвы, измеренных зондом SH-3 в маломощном режиме измерения, можно выделить три области изменения этих параметров с изменением влажности почвы (таблица 2). Одновременно увеличивается и объёмная теплоёмкость. Поскольку рост теплопроводности и объёмной теплоёмкости происходит параллельно и практически равномерно, то их отношение, т.е. температуропроводность, слабо зависит от влажности, линейно слабо возрастая с повышением последней. При влажности почвы 47% температуропроводность достигает максимума, после чего в диапазоне влажности 47-52 %, теплопроводность и объёмная теплоёмкость резко снижаются параллельно друг другу и равномерно. В результате температуропроводность также снижается. После влажности почвы,

равной 52%, теплопроводность начинает медленно повышаться, а объёмная теплоёмкость возрастает довольно быстро. В результате температуропроводность почвы снижается.

Таблица 2

Теплофизические параметры дерново-подзолистой почвы, измеренные зондом SH-3 в маломощном режиме измерения при различной влажности почвы

<i>m</i> почвы с зондами,	<i>W</i> , %	<i>D</i> , мм ² /с	<i>C</i> , МДж/(м ³ ·К)	<i>K</i> , Вт/(м·К)
746,7	67,7	0,282	3,177	0,8946
716,8	57,1	0,317	2,132	0,6756
696,8	50,0	0,545	1,307	0,7119
686,9	46,4	0,763	2,455	1,874
656,9	35,7	0,668	2,213	1,478
627,2	25,2	0,536	1,568	0,8404
597,5	14,6	0,282	1,248	0,3524

Анализируя зависимость теплофизических параметров от влажности почвы, измеренных зондом SH-3 в мощном режиме измерения (таблица 3), также можно выделить несколько разных областей изменения теплофизических параметров с изменением влажности почвы. В диапазоне влажности почвы от 15% до 27% теплопроводность и объёмная теплоёмкость увеличиваются, в результате температуропроводность также увеличивается. В диапазоне от 27% до 35% теплопроводность увеличивается, а объёмная теплоёмкость несколько уменьшается, в результате температуропроводность продолжает увеличиваться и достигает максимума при влажности 36-37%. В диапазоне от 36% до 47% рост теплопроводности замедляется, а объёмная теплоёмкость, напротив, растёт значительно быстрее. В результате температуропроводность почвы снижается. В диапазоне влажности почвы от 47% до 51% теплопроводность и объёмная теплоёмкость резко снижаются. В результате температуропроводность слабо зависит от влажности почвы, лишь немного снижаясь. С дальнейшим ростом влажности почвы до величины, близкой к полной влагоёмкости (68%), теплопроводность сначала несколько возрастает, а затем начинает медленно убывать. В то же время объёмная теплоёмкость сначала возрастает в диапазоне влажности почвы от 51% до 57%, а затем её возрастание резко замедляется. В результате температуропроводность почвы продолжает снижаться.

Таблица 3

Теплофизические параметры дерново-подзолистой почвы, измеренные зондом SH-3 в мощном режиме измерения при различной влажности почвы

<i>m</i> почвы с зондами, г	<i>W</i> , %	<i>D</i> , мм ² /с	<i>C</i> , МДж/(м ³ ·К)	<i>K</i> , Вт/(м·К)
746,7	67,7	0,306	2,696	0,823
716,8	57,1	0,37	2,599	0,962
696,8	50,0	0,474	2,036	0,965
686,9	46,4	0,552	3,495	1,930
656,9	35,7	0,767	2,334	1,791
627,2	25,2	0,488	2,383	1,162
597,5	14,6	0,285	1,327	0,378

По результатам измерений зонд SH-3 показал удовлетворительные результаты определения теплофизических свойств образца дерново-подзолистой почвы. Однако положительные результаты получены лишь для одного образца почвы. Поэтому необходимо использовать зонд SH-3 для определения теплофизических свойств других почвенных образцов, чтобы лучше убедиться в применимости или неприменимости данного зонда для измерения теплофизических свойств почв.

В результате проведения экспериментальных исследований по определению теплофизических свойств различных образцов почвы были получены следующие результаты. С помощью трёх различных зондов прибора TEMPOS были измерены теплопроводность K , объёмная теплоёмкость C и температуропроводность D дерново-подзолистой почвы и был оценён характер изменения этих показателей с изменением влажности почвы. Зонд SH-3 показал удовлетворительные результаты определения теплофизических свойств образца дерново-подзолистой почвы. В дальнейших наших исследованиях полученные значения теплофизических коэффициентов будут использованы при параметризации математической модели теплопереноса в почвах.

Библиографический список

1. Болотов А.Г. Теплофизическое состояние почв и совершенствование инструментальной базы для его исследований // дисс. канд. с.-х. наук / Алтайский государственный аграрный университет. Барнаул, 2003г
2. Болотов А.Г., Беховых Ю.В., Семёнов Г.А. Определение теплофизических свойств капиллярно-пористых тел импульсным методом с использованием технологии визуального программирования // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. № 6 (68). С. 37-40.
3. Келле А.Н. Приборы TEMPOS для измерений теплофизических параметров материалов. Руководство по эксплуатации // ООО «ЛабДепо». – М.: 2020. - 38 с.

УДК631.432.23

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ МЕТОДОМ СУШКИ

Кожунов Андрей Викторович, аспирант кафедры метеорологии и климатологии ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, avkozhuinov@mail.ru

Аннотация: *Определены погрешности расчёта влажности почвы при неучёте изъятой из образца почвы в ходе определения гидрофизических характеристик почвы с помощью прибора HYPROP2.*

Ключевые слова: *HYPROP2, влажность почвы, гидрофизические свойства, лугово-каштановые почвы.*