

О ПРИМЕНЕНИМОСТИ СВЧ-МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Крамаренко В.В.¹, Никитенков А.Н.¹, Молоков В.Ю.¹

¹ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, ТПУ, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия (634050, г. Томск, проспект Ленина, 30), e-mail: kramarenko-v-v@mail.ru

Статья посвящена методике определения влажности грунта при помощи СВЧ-излучения, что позволит значительно ускорить процесс, снизить трудоемкость и стоимость лабораторных исследований. В работе приведен детальный обзор методик определения влажности грунтов, особенности и границы их применения. Работа содержит результаты проведенных авторами исследований влажности песчаных грунтов разного состава, методом сушки в микроволновой печи и методом, приведенным в действующих отечественных стандартах, сравнение результатов, а также рекомендации по применению метода сушки грунтов методом СВЧ. Проблема ускоренной сушки дисперсных грунтов при инженерно-геологических изысканиях в полевых и лабораторных условиях регулярно возникает при подготовке грунта перед определением его гранулометрического состава, коэффициентов фильтрации, углов естественного откоса, плотности частиц грунта, градуировке радиоизотопных приборов (плотномеров, влагомеров), определении показателей влажности и многих других характеристик грунтов.

Ключевые слова: грунт, влажность, метод СВЧ

ABOUT APPLICATION OF MICROWAVE METHOD FOR DETERMINING THE MOISTURE CONTENT OF SOILS

Kramarenko V.V.¹, Nikitenkov A.N.¹, Molokov V.Y.¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30) e-mail: kramarenko-v-v@mail.ru

Article is devoted to the method of determining water content soil by using microwave radiation, which will greatly speed up the process, reduce the complexity and cost of laboratory tests. The paper presents a detailed overview of methods for determining water content, features and bounds of their application. The paper contains the results of the study authors water content sand soils of different compositions, by drying in a microwave oven and the method given in the existing national standards, comparison of results, as well as recommendations for the use of the method of drying the soil by microwave. The problem of the accelerated drying of disperse soil at engineering-geological researches in field and laboratory conditions regularly arises by preparation of soil before definition of its particle size distribution, coefficients of a filtration, corners of a natural slope, solid particles density of of soil, graduation of radioisotope devices (densitometers, hydrometers), definition of water content and many other characteristics of soil.

Keywords: soil, water content, microwave method

Проблема ускоренной сушки дисперсных грунтов при инженерно-геологических изысканиях в полевых и лабораторных условиях регулярно возникает при подготовке грунта перед определением его гранулометрического состава, коэффициентов фильтрации, углов естественного откоса, плотности частиц грунта, градуировке радиоизотопных приборов (плотномеров, влагомеров), определении показателей влажности и многих других характеристик грунтов. В международной практике для сушки грунтов широко используются СВЧ-печи бытового назначения, что значительно сокращает время определения влажности грунтов, снижает стоимость испытаний и оборудования, поэтому особый интерес вызывает сравнительный анализ определения влажности грунтов в микроволновых печах и сушильных шкафах.

Целью данной работы являлось исследование особенностей применения микроволновых печей для определения влажности песчаных грунтов различного гранулометрического состава.

В рамках достижения поставленной цели решался ряд локальных задач, среди которых: обзор отечественных и зарубежных работ посвященных методикам определения влажности грунтов; лабораторные определения влажности песков, отобранных в карьерах в пределах Томской области; составление методики работ по определению влажности песчаных грунтов различного гранулометрического состава с использованием микроволновой печи.

Обзор литературных источников показал, что существует немало методов определения влаги в грунтах [1, 3–16]. По действующим нормативам влажность определяется методом высушивания до постоянной массы [5, 6], методом нейтронного измерения влажности при помощи нейтронных влагомеров и влагоплотномеров определением по зарегистрированной плотности потока замедленных нейтронов с помощью градуировочного графика нейтронного влагомера или по специальным формулам [3]. Выпускаются малогабаритные электропечи для сушки образцов в составе полевой лаборатории Литвинова.

Согласно ГОСТ 5180 [6] пробу грунта для определения влажности массой 15–50 граммов и гигроскопической влажности массой 10–20 граммов высушивают до постоянной массы при температуре $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$. Песчаные грунты сушат в течение 3 ч, последующие высушивания производят в течение 1 ч. Загипсованные грунты высушивают при температуре $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ в течение 8 ч, повторные высушивания производят в течение 2 ч до получения разности масс грунта со стаканчиком не более 0,02 грамма при двух последующих взвешиваниях.

Согласно ВСН 164–69 [1] Влажность обломочных и песчаных смесей определяют с помощью карбида кальция в приборе ВП–2 (Госавтодорнии). Для этого навеску материала крупностью до 10 мм в количестве 70 граммов или навеску песка 30 граммов помещают внутрь прибора, затем высыплют молотый карбид кальция. Плотнo завернув крышку прибора, влажный материал энергично перемешивают с карбидом кальция путем встряхивания в течение трех минут, после чего берут отсчет по манометру. Влажность крупнообломочного материала определяют также на фракции меньше 10 мм, для этого среднюю пробу просеивают через сито с размером отверстий 10 мм, из которой навеску в 100 – 200 граммов помещают в фарфоровую чашу диаметром 10 – 12 см и взвешивают. Материал в чаше смачивают денатуратом и поджигают. Затем чашу с навеской охлаждают, и эту операцию повторяют до тех пор, пока разница между последующими взвешиваниями будет не более 0,1 грамма. Влажность фракции крупнее 10 мм в зависимости от содержания ее в смеси и происхождения каменного материала принимают с поправками по формуле:

$w=w(1-a)+w_2$, где w_1 – влажность, % фракции мельче 10 мм, определенная по одному из способов, a – содержание крупных включений размером более 10 мм, доли единиц; w_2 – ориентировочная влажность, % по весу, частиц крупнее 10 мм в зависимости от их содержания (таблица 1) [1].

Таблица 1

Ориентировочные значения влажности фракций размером более 10 мм, содержащихся в крупнообломочном материале [1]

Материал	Ориентировочное значение влажности, % по весу, при содержании фракций крупнее 10 мм, доли единицы							
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,3	0,7	0,8
Изверженные породы	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Осадочные	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	3,5	4,1	4,7
Смешанные	0,5	0,9	1,4	1,9	2,4	2,8	3,3	3,8

Из зарубежных исследований наибольший интерес представляет работа авторов Ernest S. Verney IV, James D. Kuzar, and Lawrence O. Oyelami [14], в которой приводятся результаты определения влажности грунтов и сравнение оборудования применяемого для сушки грунтов в полевых условиях. Рассмотрены методы – гравиметрический, сушки в лабораторных печах, с применением стандартной и портативной микроволновой печи, анализаторов влажности, при помощи плиток и газовых горелок, приборов химического тестирования влажности, датчиков определения плотности радиоизотопными методами, электрических приборов определения плотности и влажности (рис. 1).



а) микроволновая печь



б) газовая горелка



в) плотномер радиоизотопный



г) определитель влажности



д) электрический плотномер



е) плотномер TransTesh SDG200

при помощи карбида кальция

Рис.1. Оборудование для определения влажности грунтов [14]

После изучения рынка предлагаемого оборудования: влагомеров, анализаторов влажности зарубежных и отечественных производителей, невольно возникают вопросы – из чего складывается стоимость оборудования, его окупаемость и срок эксплуатации, соответствует ли качество цене, а главное насколько методика сушки соответствует действующим нормативам. Мы не стали изобретать велосипед и обратились к ASTM 4643–08 [9], так как микроволновое излучение является эффективным средством для быстрого высушивания грунтов, а процедуры, разработанные и используемые для просушивания грунтов с использованием микроволновой печи эффективны, точны и безопасны [21].

СВЧ-излучатели были использованы еще в 1939 году во время Второй Мировой войны для обнаружения самолетов противника. Офицеры заметили, что холодный кофе возле микроволнового радара разогревался, и, следовательно, определили тепловой эффект микроволн [17]. Первые попытки использования микроволнового нагрева для измерения влажности грунтов предпринимались инженерами, начиная с 1960-х годов. В 1987 году, американское общество по испытанию материалов публикует первый стандартный метод испытаний для определения влажности грунта с помощью микроволновой печи ASTM D 4642–87 “Standard Test Method for Determination of Water Moisture Content of Soil by the Microwave Oven Method”. Было заявлено, что СВЧ метод не предназначен в качестве замены для обычного метода сушки в конвекционной печи, но может использоваться как дополнение, когда быстрые результаты необходимы для ускорения выполнения работ на отдельных этапах испытаний.

Согласно источнику [21] для большинства типов грунтов метод сушки с использованием СВЧ-печи дает результат с точностью 0,4% влажности. В рассмотренных работах использовались микроволновые печи с выходной мощностью 500–2000 Вт, при времени сушки от 10 до 15 минут. В другой работе [15] говорится, что разница в содержании влаги между обычной конвекционной печью и микроволновой печью колеблется от 0,01% (для песка) до 1,4 % (для глины с индексом пластичности равным 53 %). В данной работе используется выходная мощность печи в 700 Вт и время сушки от 10 до 24 минут. В работе [18] опробованы две разные процедуры определения влажности грунтов. В первом случае сушка в конвекционной печи продолжалась 30 часов и 15 минут для микроволновой печи. Во втором случае сушка в конвекционной печи по времени составила 24 часа и в микроволновой печи – 35 минут. Было установлено, что обе процедуры отличаются полученными значениями содержания влаги, и требуемое время высыхания увеличивается с размером образца и начальной величиной влажности.

В работе [18] также изучалась сушка грунтов с использованием микроволновой печи, и было установлено, что грунтам с высоким содержанием влаги требуется больше времени для микроволновой сушки. Так, при испытаниях использовалась СВЧ-печь с выходной мощностью 970 Вт и время сушки 20 минут. В работе [16] были использованы выходная мощность микроволновой печи в 700 Вт и время сушки от 8 до 28 минут.

Процедура сушки грунтов в микроволновой печи, согласно ASTM D 4643 [9], применяется для большинства грунтов с целью определения общего содержания влаги. Необходимо отметить, что для глин, которые содержат значительные количества галлуазита, слюды, монтмориллонита, гипса, органики, или грунтов, в которых поровая вода содержит растворенные соли (например, в случае морских месторождений), этот метод может дать не достоверные значения влажности.

Необходимая для испытаний аппаратура включает весы с точностью 0,01 грамма, микроволновую печь, микроволновое блюдо, стеклянную палочку, шпатель, радиатор. Предпочтительно, чтобы микроволновая печь была с конвекцией, имела мощность около 700 ватт с возможностью ею управления. Первоначальная мощность микроволновой печи может быть выше, чем мощность размораживания. Оптимальная мощность может быть определена только экспериментальным путем, и опытом работы с конкретной печью.

Ход работы. Предварительно проводится взвешивание пустых контейнеров, затем контейнеров с грунтом до и после сушки в микроволновой печи. Масса навески определяется по таблице 2. Контейнер с влажным грунтом помещается на 1 минуту (минимум) в микроволновую печь в режиме разморозки, затем взвешивается через 1 минуту сушки до постоянной массы. После этой процедуры, если грунт имеет постоянную массу, то опыт считается завершенным, а грунт непригодным для дальнейших испытаний. Постоянный вес определяется как вес, при котором после последующей сушки потери в массе при взвешивании составляют менее 0,1 %. Влажность рассчитывается как отношение массы воды в грунте к массе сухого грунта, точность результатов – до 0,1 %.

Таблица 2

Определение массы навески влажного образца грунта

Номер сита (размер частиц, не более чем 10 % выборки)	Рекомендуемая масса, граммов
№ 10 (2,0 мм)	100–200
№ 4 (4,75 мм)	300–500
3/4" (19 мм)	500–1000

Тонкодисперсные грунты с высокой влажностью требуют больше времени сушки, поэтому первоначальное время нагрева для них может быть увеличено до 12 минут. Следует проявлять осторожность, и доводить размер кусочков связного грунта до 1/4" (6,35 мм), для

обеспечения ускорения сушки и предотвращения образования корок или перегрева поверхности образца при высыхании внутри крупных микроагрегатов [9].

В ходе данной работы были определены гранулометрический состав и влажность (w) песков. Для того, чтобы исследовать особенности процесса сушки песчаных грунтов в микроволновой печи при определении их влажности были отобраны пески разного гранулометрического состава: мелкие, средней крупности и гравелистые. Показатели определялись в соответствии с методиками, приведенными в действующих нормативных документах [2, 4, 6]. Основное оборудование и устройства, используемые в этом исследовании включали шкаф сушильный ШСП-0.25-100, суховоздушный шкаф ШСВЛ-80-Касимов, микроволновая печь LG мощностью 900 Ватт, печь с регулируемыми уровнями мощности Wellton WMO-1700GW, муфельная печь МИМП-10 УЭ, весы с высокой точностью 0,01 и 0,001 грамма, специальные фарфоровые чашки и чашки Петри и пластиковые контейнеры для микроволновой печи.

Образцы песков были испытаны следующим образом: из каждого были взяты восемь равных долей – по 4 образца для сушки в конвекционной и по 4 в микроволновой печах. Вес образцов, согласно методике определения гигроскопической и естественной влажности [6], был принят, соответственно, в интервале 10–20 и 15–50 граммов, а также были взяты более крупные навески – по 100–200 граммов [1]. Предварительно часть проб грунтов была водонасыщена. Для сушки в конвекционной печи образец помещался в обычную металлическую чашку, в то время как для микроволновой печи образец был помещен в фарфоровый контейнер, чтобы избежать искрения между металлической тарой и микроволновой печью внутри микроволновой печи. В ходе предварительной серии испытаний было установлено, что оптимальная мощность нагрева при тестировании песков составляет порядка 640 Вт, что позволяет соблюдать баланс между хорошей скоростью сушки и не допускать перегрева испытываемых образцов и используемой в ходе опытов посуды. Первое взвешивание образца при сушке в СВЧ печи проводилось через 1 минуту (2 и более минуты при массе навески грунта более 50 граммов), затем проводились повторные взвешивания через 1 минуту сушки до постоянной массы образца. Время испытаний в микроволновой печи в первую очередь определялось массой образца и составляло до 10 минут для навески порядка 15 граммов; 15–20 минут для навески в 35 граммов и порядка 30 минут для навески ~150 граммов. Следует отметить, что интервал повторного взвешивания определялся также объёмом образца и составлял 1 минуту для навески порядка 15 граммов и 2 минуты для больших навесок. Обусловлено это в первую очередь инерционностью процесса разогрева образца в микроволновой печи, и существенным замедлением процесса сушки в случае использования коротких интервалов взвешивания. Песчаные грунты в

конвекционной печи высушивали в течение 3 ч, последующие высушивания производили в течение 1 ч. Результаты исследований влажности приведены в таблице 3 и на рис. 2–4.

Таблица 3

Влажность песков

Название грунта	Влажность, % при сушке в								Разница между средними значениями влажности
	микроволновой печи*				конвекционной печи*				
	минимум	максимум	разница	среднее	минимум	максимум	разница	среднее	
Навеска 5–20 граммов									
Песок мелкий	4,3	4,7	0,4	4,4	3,7	4,1	0,4	3,9	0,5
Песок средней крупности	5,5	6,3	0,8	6,0	5,0	5,2	0,2	5,1	0,9
Песок гравелистый	5,2	5,4	0,2	5,3	5,3	5,6	0,3	5,4	0,1
Навеска 15–50 граммов									
Песок мелкий	4,3	4,5	0,2	4,4	3,9	4,6	0,7	4,2	0,2
Песок средней крупности	5,5	5,6	0,1	5,6	5,1	5,6	0,5	5,4	0,1
Песок гравелистый	5,2	5,4	0,2	5,3	5,3	5,6	0,3	5,4	0,1
Навеска 100–300 граммов									
Песок мелкий	4,3	4,6	0,3	4,4	4,1	4,8	0,7	4,5	0,1
Песок средней крупности	5,5	5,9	0,4	5,6	5,9	6,2	0,3	6,0	0,4
Песок гравелистый	5,0	5,1	0,1	5,1	5,2	5,3	0,1	5,2	0,1

Как видно из таблицы 3, влажность песков получилась невысокой, что в соответствии с нормативом [6] требует существенной точности опыта, так как разница между параллельными определениями у образцов с влажностью до 5 % не должна превышать 0,2 %, и от 5 до 10 % – не более 0,6 %. Наименее удачные результаты получены для песка мелкого, как в микроволновой (разница 0,2–0,4 %), так и в конвекционной печи (разница 0,4–0,7 %). Значения его влажности при сушке в микроволновой печи в разных навесках практически не отличаются, также отмечен минимальный разброс значений у остальных разновидностей в навесках по 15–50 и 100–300 граммов. Лучшие результаты получены для песка гравелистого – во всех случаях наблюдается полное соответствие нормативным требованиям. В целом, необходимо отметить, что разница между средними значениями, полученными при сушке в разных печах для навесок по 15–50 и 100–300 граммов, вполне удовлетворяют требованиям нормативов, хотя у высушенных в сушильном шкафу образцов разница между параллелями была немного выше, а у мелких песков не соответствовала нормам. Графики зависимости

влажности от времени сушки (рис. 2–4) в целом похожи для всех проанализированных разновидностей песка, различаясь визуально в основном за счет варьирования продолжительности промежутков времени между замерами веса. Некоторые вариации между влажностью отдельных образцов на графиках могут быть объяснены небольшими отличиями в их составе и наличием небольших по объёму и не характерных в целом для анализируемого грунта органических и минеральных включений.

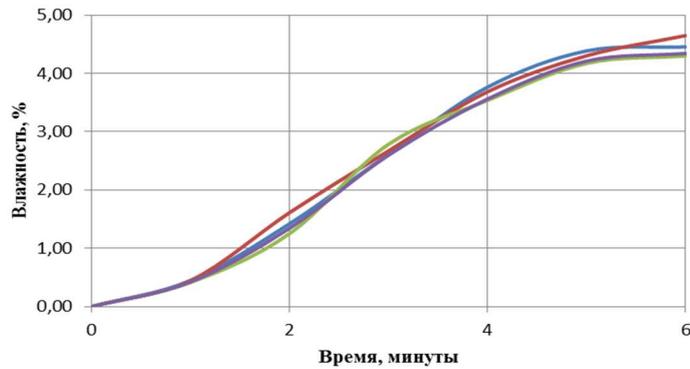


Рис. 2. Зависимость влажности от времени сушки: навеска 15 граммов, песок мелкий

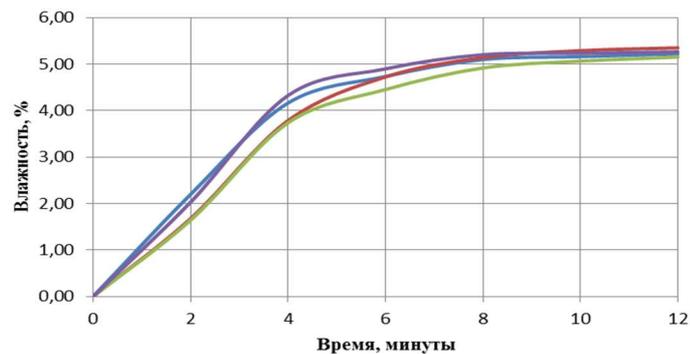


Рис. 3. Зависимость влажности от времени сушки: навеска 40 граммов, песок гравелистый

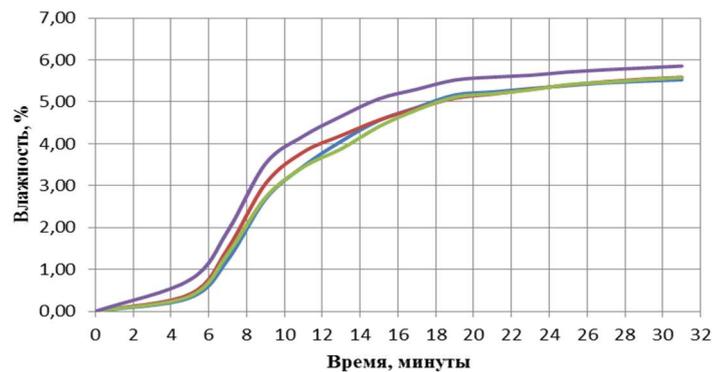


Рис. 4. Зависимость влажности от времени сушки: навеска 150 граммов, песок средней крупности

Анализ графиков показал, что для каждой разновидности песков можно выделить три этапа сушки. Первый – начальный этап, со сравнительно пологим ходом графика вверх. На данном этапе происходит разогрев имеющейся в образце влаги и начало её испарения (менее 1 %). Затем на графике выделяется интервал более интенсивного испарения – соответствует

второму этапу, на котором происходит выход из образца основного объема содержащейся в нем влаги (до 4 %). Затем, на третьем завершающем этапе сушки, на который приходится еще около 1–1,5 % влажности, вновь наблюдается более медленное испарение: данная часть графика предположительно характеризует выход влаги из сцементированных частиц в объеме грунта и завершение процесса испарения основного объема влаги, которым определяется влажность грунта. Вместе с тем следует отметить, что, как правило, на завершающий этап сушки уходит больше половины времени проведения испытания (для навесок массой более 15 граммов). Исходя из этого, для ускорения проведения опытов можно предложить при переходе к данной стадии испарения влаги из образца увеличивать интервал между замерами до $2/3 - 1/2$ от предшествующего ему времени сушки. Учитывая инерционность процесса разогрева и накопление тепла в образце в ходе непрерывной сушки можно предположить, что в большинстве случаев данного времени должно быть достаточно для практически полного испарения влаги из образца.

Отдельно необходимо отметить важность пробоподготовки в случае использования при опытах образцов навеской менее 50 граммов. В нашем случае некоторый разброс значений влажности, полученных при малых навесках грунта, обусловлен тем, что в испытываемые образцы попадали включения органики, глины и т.п., что неизбежно вносило некоторую погрешность в получаемый результат. При фильтрации экстремальных значений (не более одного из четырех полученных) качество получаемых результатов заметно повышается.

В целом исследования сушки в СВЧ-печах выявили хорошую сходимость результатов для навесок крупнее 15 граммов при минимальном разбросе значений, который не противоречит действующим нормативам. Анализируя данные таблицы 3, можно сделать вывод, что в рассматриваемых грунтах, влажность песчаных грунтов можно определить с помощью MWO, сокращая время высыхания с 3–4 часов до 30 минут. Результаты исследований позволили предложить в качестве методических рекомендаций несколько советов по работе с песчаными грунтами данным методом.

1. Оптимальная масса песка для определения влажности находится в интервале между 50–200 граммов. Более крупные навески будут требовать больше времени для сушки, что приведет к ненужному расходу энергии.

2. Подходящее время для сушки песков в СВЧ-печи определено как 30 минут, вместо нормированного времени согласно [7].

3. Минимальный интервал между взвешиваниями составляет 1 минуту.

4. Контейнеры, используемые в микроволновой печи, должны пропускать микроволны, что исключает использование металлических емкостей. Пески, содержащие глинистую фракцию и органику в значительных количествах, не позволяют применять полиэтиленовые

чашки для СВЧ, так как они плавятся под разложившимся торфом и связными грунтами, поэтому рекомендуется использовать стеклянную, фарфоровую или глиняную посуду.

Техническое ограничение применения СВЧ:

1. Образцы испытываемых грунтов должны иметь высокое сопротивление (низкое содержание электропроводящих минералов).

2. Водонасыщение образцов должно осуществляться с использованием пресных растворов.

3. Сушка образцов со сравнительно небольшим содержанием влаги (к которым относятся и пески) должна осуществляться на пониженной мощности микроволновой печи, чтобы не допускать ее перегрева.

Таким образом, полученные результаты подтвердили, что бытовые микроволновые печи являются эффективным средством для быстрого определения влажности песчаных грунтов. Установлено, что влажность песков разного фракционного состава, определенная с использованием для сушки микроволновой печи, хорошо сопоставима с данными, полученными при применении конвекционной печи: оба метода дали близкие результаты, с минимальной разницей между ними. Исследование позволит повысить эффективность лабораторных работ, поскольку время сушки образцов может быть сокращено максимум до 30 минут. Кроме того, бытовые СВЧ-печи являются более дешевыми приборами по сравнению с сушильными шкафами, влагомерами и анализаторами влажности.

Список литературы

1. ВСН 164-69 Технические указания по устройству дорожных оснований из обломочных материалов, укрепленных цементом.
2. ГОСТ 12536–79. Методы лабораторного определения гранулометрического и микроагрегатного состава.
3. ГОСТ 23061–2012. Грунты. Методы радиоизотопных измерений плотности и влажности.
4. ГОСТ 30416–2012 Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения.
5. ГОСТ 30672–2012 Грунты. Полевые испытания. Общие положения.
6. ГОСТ 5180–84 Грунты методы лабораторного определения физических характеристик.
7. ASTM D 1558–10. Standard Test Method For Moisture Content Penetration Resistance Relationships Of Fine-Grained Soils.
8. ASTM D 2216–10. Standard Test Methods For Laboratory Determination Of Water (Moisture) Content Of Soil And Rock By Mass.

9. ASTM D 4643–08. Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Microwave Oven Heating.
10. ASTM D 4718–87(2007). Standard Practice For Correction Of Unit Weight And Water Content For Soils Containing Oversize Particles.
11. ASTM D 4944–11. Standard Test Method For Field Determination Of Water (Moisture) Content Of Soil By The Calcium Carbide Gas Pressure Tester.
12. ASTM D 425– 88(2008) Standard Test Method for Centrifuge Moisture Equivalent of Soils.
13. ASTM D 6938–10 Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth).
14. Device Comparison for Determining Field Soil Moisture Content Ernest S. Berney IV, James D. Kyzar, and Lawrence O. Oyelami Geotechnical and Structures Laboratory U.S. Army Engineer Research and Development Center 3909 Halls Ferry Road Vicksburg, MS 39180-6199.
15. Gilbert, P. A., “Evaluation of soil mechanics laboratory equipment, Report 13, feasibility study, microwave oven used for rapid determination of soil water contents”. Misc Paper No. 3–478. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1974
16. Hagerty, D. J. et al., “Microwave drying of soils. Geotechnical Testing”. Journal, Vol. 13, No. 2, p. 138–141, 1990
17. He, X. Y., “Theory and application of microwaves”. Science Monthly, Vol. 292, Science Monthly and King-Taiwan Information Technology Inc., 1994.
18. Lade, P. V. and Nejadi-Babadai H., “Soil drying by microwave oven. Soil specimen preparation for laboratory testing”. ASTM STP 599. ASTM, Philadelphia, p. 320–335, 1975.
19. Miller, R. J. et al., “Soil water content microwave oven method”. Soil Science Society of America Proceedings, Vol. 38, No. 3, p. 535–537, 1974.
20. Philip W. K. Chung and Tony Y. K. Ho, “Study on the determination of moisture content of soils by microwave oven method”. Geo Report no. 221, Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, 2008.
21. Ryley, M. D., “The use of a microwave oven for the rapid determination of moisture content of soils”. RLR Report LR280. Road Research Laboratory, Crowthorne, England, 1969

Рецензенты:

Савичев О.Г., д.г.н., профессор кафедры гидрогеологии инженерной геологии и геоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск;

Попов В.К., д.г.-м.н., профессор кафедры гидрогеологии инженерной геологии и геоэкологии
Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского
политехнического университета, г. Томск.