

УДК 624.131

О ПРИМЕНИМОСТИ СВЧ-ПЕЧЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ

Крамаренко Виолетта Валентиновна¹,
kramarenko-v-v@mail.ru

Никитенков Алексей Николаевич¹,
nik@tpu.ru

Молоков Виктор Юрьевич¹,
vik3011347@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Лабораторные и полевые методы определения влажности грунтов, повсеместно используемые в производственных организациях на территории РФ, принципиально не меняются уже много десятилетий, следствием чего являются их относительно высокая трудоемкость и энергозатратность. Вместе с тем в современных рыночных условиях возникает необходимость повышения скорости, качества и энергоэффективности определения физических характеристик грунтов.

Цель работы: изучение процесса сушки дисперсных грунтов в микроволновых печах при определении их влажности и разработка методики определения влажности грунтов при помощи сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения, применение которой на практике позволит решить задачи повышения ресурсоэффективности инженерно-геологических изысканий за счет снижения энерго- и трудоемкости лабораторных исследований и, как следствие, снижения их себестоимости.

Объект исследований: типичные для Западной Сибири грунты, отобранные на территории Томской области и Ханты-Мансийского автономного округа.

Методы исследования: метод определения влажности грунтов при помощи СВЧ-печей, а также анализ и обработка полученных результатов методами математической статистики, реализованными средствами программных продуктов MS Excel и Statistica.

Результаты. Рассмотрена возможность применения метода ускоренного определения влажности различных грунтов при помощи СВЧ-печей при инженерно-геологических изысканиях для проектирования, строительства, ремонта и реконструкции сооружений. Установлено, что разброс значений влажности дисперсных грунтов при сушке в СВЧ-печи в большинстве случаев не выше, чем при сушке в конвекционной. Подтверждено, что при сушке не происходит потерь органического вещества и связанной воды в грунтах, а также увеличения массы пробы, что повышает точность определений. Достоверность полученных результатов подтверждена методом сушки грунта до постоянной массы, в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Разработаны и опробованы методические рекомендации по определению влажности грунтов при их сушке в СВЧ-печи.

Ключевые слова:

Грунт, влажность, метод СВЧ, инженерная геология, энергоэффективность.

Введение

Одной из важнейших задач по обеспечению динамичного развития отечественной экономики является повышение ресурсоэффективности всех отраслей производства и, в частности, строительства, важнейшим этапом которого являются инженерно-геологические изыскания. В статье приводятся результаты исследования, позволяющие решить данную задачу путем сокращения времени испытаний и увеличения интенсивности полевых и лабораторных работ за счет ускоренной сушки грунта при подготовке к определению характеристик состава, физических и физико-механических свойств. В международной практике для определения влажности грунтов широко используются СВЧ-печи бытового назначения [1–8], что значительно сокращает время сушки, снижает стоимость испытаний и используемого оборудования. Таким образом, особый интерес представляет сравнительный анализ результатов определения влажности грунтов в микроволновых печах и сушильных шкафах в ракурсе требований отечественных стандартов по качеству определения данной характеристики.

В связи с вышесказанным целью данной работы являлось изучение процесса сушки дисперсных грунтов в микроволновых печах для определения их влажности. Задачи включали: обзор отечественных и зарубежных работ, посвященных методикам тестирования влажности грунтов; опробование и лабораторные испытания дисперсных грунтов для определения классификационных показателей состава и физических свойств, сопоставление результатов при сушке в микроволновой и конвекционной печах; выявление и анализ особенностей сушки грунтов для составления кратких рекомендаций по ускоренной методике определения влажности дисперсных грунтов в микроволновых печах.

Методика исследования

Обзор литературных источников показал, что существует немало методов определения влаги в грунтах [1–70], но требования нормативных документов обязывают применять метод сушки грунтов до постоянной массы [24, 25, 27, 35]. Температуры сушки близки [38–64], начиная от 100 ± 5 °C (ГОСТ А 1203:2009), в интервале 105–110 °C (AS

1289.2.1.1, ГОСТ 11305) до 110 ± 5 °C (ASTM D2216, IS 27202– (1973) Reaffirmed 2010, BS EN ISO 178921–:2014. В мировой и отечественной практике для определения влажности применяются влагомеры, в том числе и нейтронные, инфракрасные лампы, песчаные бани, микроволновые печи, лабораторные нагревательные плиты, газовые горелки, денатурат, карбид кальция и многие другие приборы и вещества (BIS IS 2720-2, BIS IS 12175:1987 (R2002), KS I ISO 10573:2005, BCH 164–69, ASTM D 4959: 07, ASTM D 4944: 11, ASTM D 1558: 10, ASTM D 6938, PN ISO 10573:2001, AS 1289.5.8.71–998 (R2013), AS 1289.2.1.4-2.1.6). Из зарубежных исследований интерес представляют работы E.S. Berney IV, J.D. Kuzar, L.O. Oyelami [1, 20] с анализом наиболее распространенных тестов.

Согласно ГОСТ 5180 [35], для определения влажности проба грунта массой 15–50 г (15–20 г для гигроскопической влажности, 10–15 г для влажности на границе раскатывания, 15–30 г для влажности на границе текучести) сушится при температуре 105 ± 2 °C в течение 5 ч, после чего грунты взвешиваются через 2 ч до получения разности масс при повторном взвешивании не более 0,02 г. Пески высушивают в течение 3 ч, последующие замеры производят в течение 1 ч. Засоленные и содержащие органику грунты рекомендуется сушить при более низких температурах. Согласно ASTM D2216, для уменьшения дегидратации гипса засоленных грунтов и разложения органики в торфах их рекомендуется сушить при 60 °C или при комнатной температуре в эксикаторе. Согласно ГОСТ 5180 [35], загипсованные грунты высушивают при температуре (80 ± 2) °C в течение 8 ч. Тем не менее, для сушки органических грунтов стандарты рекомендуют те же (либо даже большие) температуры, что применяются для минеральных грунтов. Так, согласно ASTM D 2974–14 [12], влажность торфа определяется двумя методами: А) путем сушки при температуре 110 ± 5 °C и В) путем удаления влаги в два этапа: сначала испарение при комнатной температуре и затем сушка в печи при 110 ± 5 °C, если торф используется в качестве топлива. По ГОСТ 11305 [24], навеску торфа массой 5–10 г помещают в нагретый до температуры 105–110 °C сушильный шкаф и сушат в течение 2,5–4,0 ч, после чего взвешивают и после подсушивают в течение 30 мин. Если потеря не превышает 0,01 г, то испытание заканчивают. При ускоренном методе [24] навески торфа массой 5–6 г помещают в шкаф, нагретый до 165–170 °C, после чего сушат при 145–150 °C в течение 30 мин, а при влаге (отношении массы воды к исходной массе влажного торфа) более 55 % – 45 мин, (или при температуре 140–150 °C в двухламповом приборе). Для текущего учета допускается производить определение на одной навеске. По ГОСТ 19723 [27], навеску торфа массой 15–20 г сушат в течение 4,5 ч при 105 °C. Массу высушенной за час навески считают постоянной, если разность результатов при двух последовательных взвешиваниях не превышает 0,02 г.

После изучения рынка современного оборудования для определения влажности: влагомеров, анализаторов влажности зарубежных и отечественных производителей, невольно возникают вопросы о том, из чего складывается стоимость оборудования, а главное – насколько достоверные результаты дают предлагаемые методы сушки, и в какой степени результаты соответствуют требованиям действующих нормативов.

Согласно исследованиям [7], наиболее экономичным методом определения влажности является применение СВЧ-печей, а микроволновое излучение является эффективным средством для быстрого высушивания грунтов. Процедуры, разработанные и используемые для просушивания грунтов с использованием микроволновой печи, эффективны, точны и безопасны [3]. СВЧ-излучатели были использованы еще в 1939 г. во время Второй Мировой войны для обнаружения самолетов. Тепловой эффект микроволн впервые был замечен офицерами британской армии, обнаружившими, что холодный кофе разогревался возле микроволнового радара [4]. Первый стандартный метод испытаний для определения влажности грунта с помощью микроволновой печи публиковало в 1987 г. американское общество по испытанию материалов: ASTM D 4642–87, «Standard Test Method for Determination of Water Moisture Content of Soil by the Microwave Oven Method». Процедура сушки грунтов в микроволновой печи, согласно ASTM 4643–08 (ASTM 2008a) [13], также применяется для определения влажности. Навеска массой 100–200 г (для грунтов, содержащих до 10 % фракции более 2 мм) помещается на 3 мин в печь в режиме разморозки, затем взвешивается через 1 мин до тех пор, пока потери массы при повторном взвешивании не составят менее 0,1 %. Оптимальная мощность печи определяется экспериментальным путем. Начальное время сушки глинистых грунтов может быть увеличено до 12 мин. Влажность рассчитывается как отношение массы воды к массе сухого грунта с точностью до 0,1 %.

Согласно исследованиям [22], для большинства типов грунтов метод сушки с использованием СВЧ-печи дает результат с точностью 0,4 % влажности. В рассмотренных источниках использовались микроволновые печи мощностью 500–2000 Вт, при времени сушки от 10 до 15 мин. В другой работе [8] говорится, что разница в содержании влаги, полученной при сушке в обычной конвекционной печи и микроволновой печи (выходная мощность в 700 Вт), колеблется от 0,01 % (для песка) до 1,4 % (для глины с числом пластичности равным 53 %) при времени сушки от 10 до 24 мин. В работе [3] опробованы две процедуры определения влажности: в первом случае сушка в конвекционной и микроволновой печах продолжалась 30 ч и 15 мин соответственно, во втором – 24 ч и 35 мин. Было установлено, что обе процедуры отличаются полученными значениями содержания влаги, а требуемое время высыхания увеличивается с размером об-

разца и начальной величиной влажности. В работе [7] 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 мин. Сопоставимые результаты были получены и в работе [3], в которой была использована микроволновая печь с выходной мощностью в 700 Вт при времени сушки от 8 до 28 мин.

Как отмечают Т.Г. Макеева и Ю.М. Егоров: «СВЧ-поле воздействует на грунт на атомно-молекулярном уровне, производя диэлектрический нагрев. При этом в грунте происходит миграция влаги и фазовые переходы связанной воды в зависимости от структурно-текстурных особенностей грунта и молекулярно-структурных особенностей воды, а также параметров СВЧ поля и возникающих поляризационных явлений на границах при фазовых переходах связанной воды и воды переходного состояния» [70]. В источнике [69] отмечено, что при температурах от 100 до 400 °С в процессе обезвоживания монтмориллонит теряет 5–6 % химически связанной воды (2/3 всей влаги), каолин – 13 %. По данным работы А.В. Прохиной [68], рентгенофазовый анализ показал, что при обработке глины СВЧ-излучением значительных изменений в составе минералов не наблюдалось. Распределение по размерам частиц показало, что преимущественной фракцией в образцах необработанной глины являются частицы радиусом 5–10 мкм, а после обработки СВЧ-излучением преобладают частицы радиусом менее 0,01 мкм. Положительным моментом сушки образцов в СВЧ-печах является их равномерный разогрев [66], что выгодно отличается их от «классических» сушильных печей, в которых сушка образцов происходит от края поверхности к центру, в результате чего из-за плохой теплопроводности внутренняя часть образца не получает достаточного количества энергии для испарения воды. Также при температуре 100–160 °С в сушильных печах происходит потеря свободной или слабосвязанной воды. Согласно [28], для глинистых грунтов и грунтов, с включениями гипса, содержание связанной воды определяют при сушке образцов при температуре 105 °С до постоянной массы и при температуре 250 °С в течение 1–2 ч; а для грунтов, содержащих гипс, – при сушке образцов при температуре 65 и 180 °С до постоянной массы – таким образом, потери связанной воды в СВЧ-печах маловероятны. В завершении обзора работ по теме исследований отметим, что, несмотря на сложность и неоднозначность процесса сушки глин в СВЧ-печах, из них удаляется в основном свободная вода и, как уже отмечалось авторами, печи весьма эффективны при лабораторных испытаниях грунтов [5, 6, 66, 67]. Таким образом, разработка методики сушки дисперсных грунтов весьма актуальна. Для решения поставленных задач авторами исследованы типичные для Западной Сибири грунты, отобранные на территории Том-

ской области и ХМАО, объемом не менее 5–6 кг. В ходе испытаний были проанализированы пески разного гранулометрического состава: мелкой, средней крупности и гравелистые (табл. 1), торфа разной степени разложения, малозольные, древесной, травяной, моховой и травяно-моховой групп, глинистые грунты, а также заторфованные глины и суглинки. В соответствии с методиками [24–27, 33, 35], были определены: гранулометрический состав песков, влажность (w), степень разложения торфов (D_{ap}), содержание органики (I_o) и влажность на границе раскатывания и текучести (w_L и w_p) глинистых и органоминеральных грунтов. Основное оборудование и устройства, используемые в этом исследовании: шкаф сушильный ПСП-0.25-100, суховоздушный шкаф ПСВЛ-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 (до 0,001 грамма), фарфоровые чашки, чашки Петри и пластиковые контейнеры для микроволновой печи.

Основная цель эксперимента – сравнение результатов определения влажности, полученных разными способами сушки, при помощи статистических методов анализа согласно требованиями нормативных документов. По плану эксперимента количество испытаний минеральных грунтов определялось следующим образом: из каждого образца были взяты восемь равных долей – всего по 4 пробы для сушки в конвекционной и в микроволновой печах (средние и минимальные значения приведены в табл. 1), разной массы навесок в соответствии с методиками определения влажности [35]. Для возможности достоверного сопоставления результатов сушки в конвекционной и микроволновой печах каждая проба грунта делилась на две равных части. В соответствии с методиками [27, 35], для органических и органоминеральных грунтов из каждой части также отбирались от 4 до 8 параллельных навесок массой 15–50 г. Из сфагнового торфа были взяты навески по 5–10 г [24], по 15–20 г [24], а также более объемные пробы массой 100–200 г [13] с целью уменьшить разброс между параллельными определениями водонасыщенных образцов. Таким образом, число значений в выборках соответствовало требованиям ГОСТ 20522–2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. Сушка проводилась до получения разности масс грунта при двух последовательных взвешиваниях не более 0,02 г [35]. Время сушки образцов в конвекционной печи соответствовало требованиям нормативов [24, 27, 35]. Время испытаний в микроволновой печи определялось влажностью и массой образца и составляло от 10 до 30 мин для навески до 50 г и до 1,5 ч для навески в 100–200 г (при мощности излучения ~200 Вт). Интервалы между взвешиваниями подбирались эмпирически с учетом массы навески, влажности, площади испарения, а также инерционности процесса разогрева, следствием которого было суще-

ственное замедление процесса сушки при интервалах между взвешиваниями менее 1–2 мин. Первое взвешивание образца проводилось через интервал в 1–2 мин при массе навески до 50 г и через 3–7 мин при массе более 50 г.

Обсуждение результатов

Полученные результаты приведены в табл. 1, динамика процесса сушки отражена на наиболее типичных графиках зависимости влажности от времени сушки (рис. 1). Анализ графиков показал, что для всех грунтов можно выделить три основных этапа процесса: I этап – начальный, со сравнительно пологим ходом графика вверх, на котором происходит разогрев содержащейся в образ-

це влаги с небольшим ускорением испарения; II этап – этап интенсивного испарения, когда происходит выход основного объема влаги из образца; III этап – завершающий процесс сушки, характеризуется относительно медленным испарением оставшейся свободной воды. Для всех образцов типично интенсивное испарение с самого начала сушки (большая часть проб, рис. 1, а, г–з), на которое приходится от 50 до 80 % времени испытания.

В программе Statistica была проведена обработка данных испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ 205222–012. Графически было проверено, что данные выборок каждого образца, связанных, несвязных и органических грунтов и всех грунтов в целом распределены по нормальному за-

Таблица 1. Влажность грунтов

Table 1. Water (Moisture) content of the soil

Название грунта Soil name	Масса навески- Sample mass (г/г)	Влажность, % при сушке в печи/Water content, % drying in the oven					
		микроволновой/microwave			конвекционной/convection		
		средняя average	минимум minimum	максимум maximum	средняя average	минимум minimum	максимум maximum
1 Песок мелкий/Fine sand	5–20	4,4	4,3	4,7	3,9	3,7	4,1
2 Песок средней крупности/Medium (fine) sand		6,0	5,5	6,3	5,1	5,0	5,2
3 Песок гравелистый/Gravel with sand		5,3	5,2	5,4	5,4	5,3	5,6
4 Песок мелкий/Fine sand	15–50	4,4	4,3	4,5	4,2	3,9	4,6
5 Песок средней крупности/Medium (fine) sand		5,6	5,5	5,6	5,4	5,1	5,6
6 Песок гравелистый/Gravel with sand		5,3	5,2	5,4	5,4	5,3	5,6
7 Песок мелкий/Fine sand	100–300	4,4	4,3	4,6	4,5	4,1	4,8
8 Песок средней крупности/Medium (fine) sand		5,6	5,5	5,9	6,0	5,9	6,2
9 Песок гравелистый/Gravel with sand		5,1	5,0	5,1	5,2	5,2	5,3
10	18–22	24,4	23,6	25,2	24,3	23,5	24,6
11 Сугесь/Silty clay	30–40	20	19,6	20,3	20	19,7	20,4
12	40–50	14,3	14,1	14,7	14,1	13,8	14,6
13	50	26,3	25,5	27,3	25	24,5	25,7
14	15	25,7	24,5	26,8	25,3	24,3	26,3
15	100	42	41	42	41	40	41
16	10	15,5	14,8	15,9	16,7	16,5	16,9
17 Суглинок/Lean clay	18–22	32	32	33	33	33	33
18		21,8	21,2	22,3	23,8	22,4	25,8
19		19,8	19,7	19,9	19,5	19,2	19,8
20		35	35	36	35	33	37
21		32	32	33	33	33	33
22 Глина/Clay		24,7	24,1	25,1	25,6	25,2	26
23		17,3	16,9	17,8	16,2	15,8	17
24 Глина мягкопластичная слабозаторфованная Plastic slightly peaty clay		58	56	60	29	58	61
25 Суглинок текучепластичный слабозаторфованный Very soft slightly peaty loam		30	29	31	29	27	30
26	100–200	3188	3125	3255	2761	2412	3327
27 Торф слаборазложившийся моховой Least decomposed moss peat low	15–20	2527	2253	2794	2816	2390	3003
28	5–10	2513	2200	2754	587	2250	3063
29 Торф среднеразложившийся травяной Hemic grass peat	15–50	609	603	617	416	574	598
30 Торф сильноразложившийся древесный Strongly decomposed woody peat		397	353	464	2447	369	485
31 Торф слаборазложившийся травяно-моховой Least decomposed grass-moss peat		2097	1925	2333	1762	2340	2506
32		1464	1443	1506	428	1465	1966
33 Торф сильноразложившийся древесно-травяной Strongly decomposed woody-grass peat		398	394	402	60	416	438

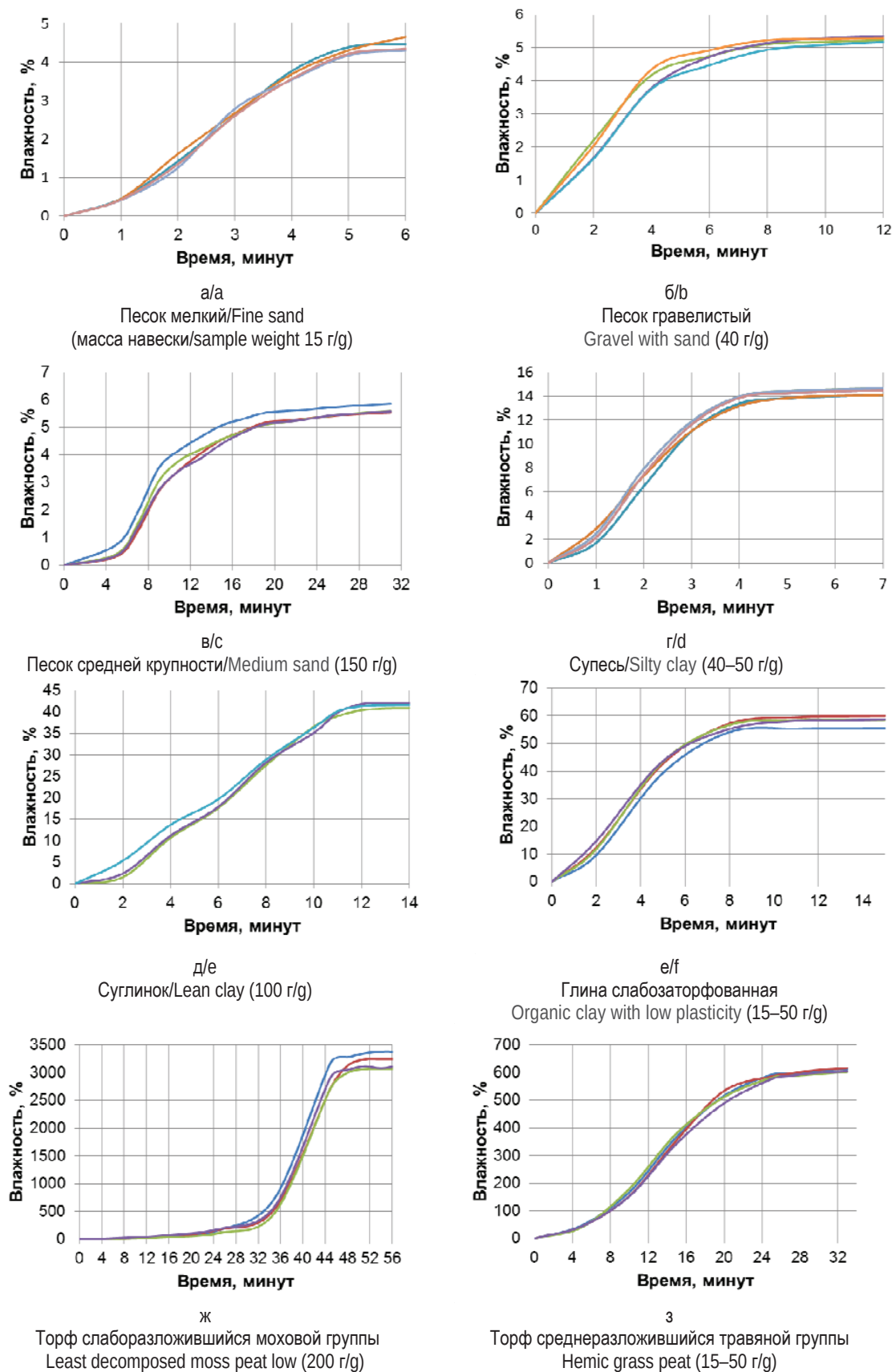


Рис. 1. Зависимость влажности грунтов от времени сушки

Fig. 1. Dependence of soil moisture on drying time

кону. В первую очередь проведено вычисление сравнительного коэффициента вариации для каждой выборки, в результате чего отбраковано несколько минимальных значений. Сравнение средних значений и среднеквадратических отклонений с доверительной вероятностью 0,95, полученных разными методами для одного грунта, показало возможность объединения данных в один расчетный геологический элемент и доказало его однородность по влажности. Затем, при доверительной вероятности 0,85 и 0,95 для выборок, включающих все полученные двумя рассматриваемыми методами результаты, были определены коэффициенты вариации, которые не превысили допустимое для физических характеристик значение ($V < 0,15$). Таким образом, требования приведенного ГОСТ соблюдаются, и получаемые результаты могут быть использованы проектировщиками при расчетах оснований сооружений.

Если же рассматривать значения выборок с учетом более высоких требований нормативов, предъявляемых к параллельным определениям влажности, то нужно более детально рассмотреть полученные для разных грунтов результаты, сравнивая их с допустимой разницей параллельных определений.

Пески. Как видно из табл. 1, влажность песков получилась невысокой, что, в соответствии с нормативом [35], требует существенной точности – разница между параллельными определениями у образцов с влажностью до 5 % не должна превышать 0,2 %, и от 5 до 10 % – 0,6 %. Значения влажности мелкого песка 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 г. 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 %). Лучшие результаты получены для песка гравелистого – во всех случаях наблюдается полное соответствие нормативным требованиям. Необходимо отметить, что разница между средними значениями, полученными при сушке в разных печах для навесок по 15–50 и 100–300 г, вполне удовлетворяет требованиям нормативов, хотя у высушенных в сушильном шкафу образцов разница между параллельными замерами немного выше, а у мелких песков они не соответствуют нормам. Для всех проанализированных в СВЧ-печи разновидностей песка графики зависимости влажности от времени сушки (рис. 1 а–в) в целом имеют схожий характер, различаясь визуально в основном за счет варьирования промежутков времени между замерами веса. Ниже приведены типичные графики зависимости влажности от времени сушки для дисперсных грунтов.

Глины. Испытания проводились для всех разновидностей глинистых грунтов с близкой влажностью и с разной массой навесок; с разной влажностью и одинаковой массой (табл. 1); с влажно-

стью на границе раскатывания после прессования (табл. 1, № 16). После тестирования влажности при сушке в конвекционной и СВЧ-печи в подавляющем большинстве случаев разброс значений влажности соответствует требованиям нормативов к результатам параллельных определений показателя. Превышены допустимые диапазоны для образца № 14 (суглинок с естественной влажностью, навески массой в 15 г), что, по-видимому, свидетельствует о том, что для достоверности результата, применительно к данному типу грунтов, требуется увеличивать массу навески. В то же время для образца № 16 массой 10 г (после прессования для определения влажности на границе раскатывания) получен приемлемый разброс значений.

Для глинистых грунтов характерен длительный II этап сушки при коротком I этапе или полном его отсутствии. Характерно, что после начала сушки на образце образуется плотная сухая корка и дальнейшее испарение происходит через неё с сильным разогревом образца, поэтому для увеличения площади испарения целесообразны частые перемешивания.

Торф и заторфованные грунты. Среди особенностей процесса сушки органических и органоминеральных грунтов (табл. 1, рис. 1) необходимо отметить его длительность, обусловленную водонасыщенностью торфа. Максимальная влажность (1500–3000 % и более) отмечена у образцов слабо-разложившегося мохового и травяно-мохового торфа; средние значения порядка 400–600 % выявлены у сильно- и среднеразложившихся торфов древесной и травяной групп, минимальные значения порядка 25–70 % – у слабозаторфованных грунтов, что в целом типично для этих разновидностей. Соответственно, с ростом влажности растет разброс её значений. При увеличении массы навески от 5 до 20 г разброс получаемых значений влажности несколько уменьшился (табл. 1). При навеске в 100–200 г у мохового торфа (рис. 1, а) также отмечены значительные вариации значений параллельных определений. Увеличение объема выборки до 8–10 проб также не улучшило итоговый результат.

В то же время исследованные разновидности органических и органоминеральных грунтов имеют свою специфику сушки. Так, для наиболее водонасыщенных слабо-разложившихся моховых и травяно-моховых торфов (рис. 1, ж) характерен длительный I этап разогрева влаги и быстрый II этап ее испарения. Для среднеразложившихся торфов древесной, травяной (рис. 1, г), древесно-травяной и травяно-моховой групп характерен более длительный II этап. Объясняется это тем, что большинство образцов имеет достаточно большую площадь испарения, которая обеспечивает хорошее проникновение микроволн. Одним из следствий этого является то, что процесс испытаний характеризуется более коротким по времени завершающим этапом сушки, в ходе которого оставшаяся влага удаляется сравнительно легко. Отдельно

следует выделить группу слабозаторфованных грунтов с относительно небольшой влажностью. Для них типично либо слабое выражение, либо практически полное отсутствие начального I этапа (рис. 1, е) за счет быстрого разогрева всего объема образца и начала интенсивного испарения уже на первых минутах проведения опыта, чему способствует относительно небольшая площадь поверхности испарения образцов, а также образование на них прочной корки, как и у глин. Следствием этого является их сильный разогрев, что накладывает ограничения на материал используемых контейнеров. В целом для них характерно, что на первые два этапа сушки приходится около половины времени испытаний, в течение которого испаряется до 90 % от начального объема влаги. На завершающий этап сушки уходит от 20 (для сильноувлажнённых торфов) до 50 % времени (для органоминеральных грунтов).

Для органических и органоминеральных грунтов ускоренное определение влажности имеет особое значение, так как при повторном взвешивании образца по окончании опыта часто наблюдается увеличение его массы. При этом требуется отследить наименьшую массу, поскольку именно её согласно ГОСТ 5180 [35] принимают за конечный результат взвешивания. В проводимых испытаниях на завершающем этапе сушки увеличение массы не только у органических, но и у всех дисперсных грунтов (рис. 1) не наблюдалось.

Как было отмечено, в стандартах рекомендуется использовать более низкие температуры при сушке торфов, чтобы избежать потери органики. Чтобы выявить возможные потери массы грунта за счет сгорания органики в конвекционной и СВЧ-печах [10], проводился их контроль методами прокаливания согласно действующим нормативам [13, 18–20]. Гравиметрический метод определения органического вещества в торфяных почвах, согласно ГОСТ 26213 и ГОСТ 23784 [18, 19], основан на определении потери массы пробы после прокаливания при температуре 525 ± 25 °С. Согласно ГОСТ 11306 [18], для торфяной продукции топливного назначения зольность определяют прокаливанием при температуре 800 ± 25 °С, а для сельскохозяйственного и природоохранного назначения – при 525 ± 25 °С. По ГОСТ 23740–2016 для голоценовых аквальных грунтов (органоминеральных и дисперсных связных минеральных) нужно установить температуру прокаливания до постоянной массы (350 ± 10) °С, для дисперсных связных и несвязных минеральных грунтов, по возрасту не относящихся к голоценовым, – 450 ± 10 °С, в случае, если относительное содержание органического вещества превышает 10 %, следует установить температуру прокаливания до постоянной массы (525 ± 25) °С. Возникает резонный вопрос – определение возраста при изысканиях не предусмотрено нормативами – процедура дорога, не всегда достоверна и оправдана, так как не идет в расчеты. В соответствии с ASTM D 2974 [12], зольность опреде-

ляется сжиганием в муфельной печи: методом С – при температуре 440 ± 40 °С и методом Д (для торфов, используемых в качестве топлива) при 750 ± 38 °С. Разложение органического вещества приходится на диапазон между 229 и 579 °С, с максимумом 300–400 °С [19].

В итоге для прокаливания образцов были выбраны температуры: 800, 525 и 350 °С. Для испытаний были взяты также по 4 параллельных образца (табл. 2, средние значения для наглядности значения округлены до целых). Проведенные испытания показали хорошую сходимость результатов определения содержания органики после сушки, полученные двумя методами подготовки. Таким образом, можно утверждать, что потери органики при применении метода СВЧ такие же, как и при применении конвекционных печей (в 2–3 %).

Также следует отметить, что чем ниже температура, тем выше зольность и ниже содержание органики (табл. 2). В связи с этим возникает вопрос – почему ГОСТ 27740 рекомендует температуру прокаливания (350 ± 10) °С. В результате занижения содержания органики грунт неверно классифицируется, в дальнейшем неверно выбираются методики определения механических характеристик, неверно проводятся дальнейшие расчеты оснований, что может привести к катастрофическим последствиям для сооружения.

Таблица 2. Содержание органики в органических и органоминеральных грунтах

Table 2. Content of organic matter in organic and organomineral soils

Наименование грунта Soil name	Содержание органики I_r , % после сушки Content of organic matter I_r , % after drying in					
	в конвекцион- ной печи convection oven			в СВЧ-печи microwave oven		
	°C					
	800	525	350	800	525	350
Торф слаборазложившийся моховой группы Least decomposed moss peat	96	94	91	95	91	90
Торф сильноразложившийся древесной группы Strongly decomposed woody peat	90	92	85	90	92	87
Суглинок текучепластичный слабозаторфованный Very soft slightly peaty loam	14	13	12	16	14	13

Чтобы наглядно продемонстрировать влияние на скорость сушки образца таких параметров эксперимента, как влажность грунта и масса навески, были рассмотрены образцы связных минеральных грунтов (табл. 1), для которых построены графики зависимости средних значений массы, содержания воды и влажности от времени сушки образцов (рис. 2). На графиках представлены результаты по средним значениям для 16 образцов грунта, общая

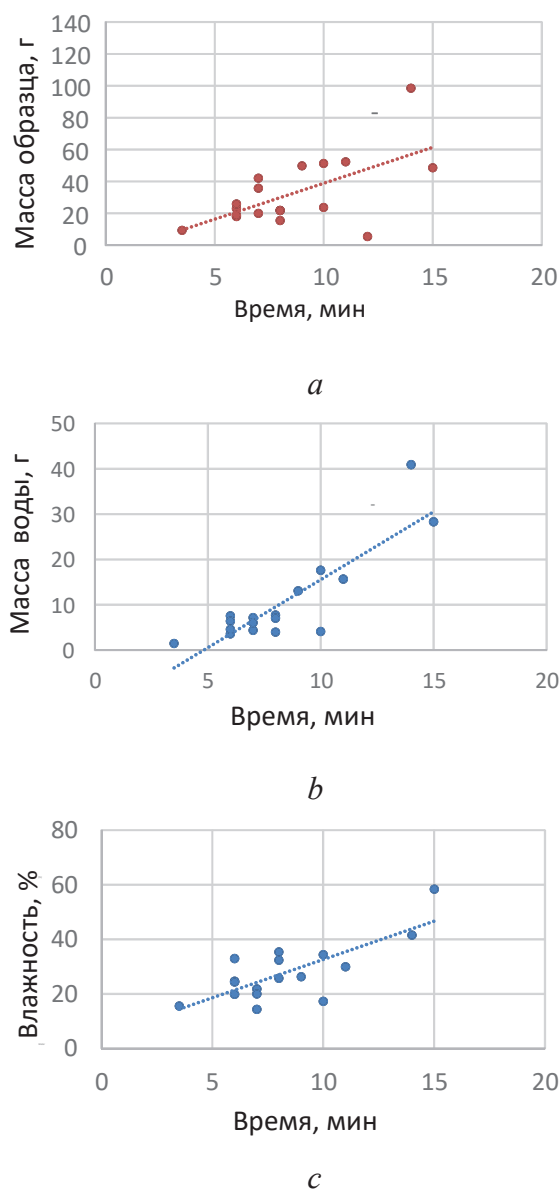


Рис. 2. Зависимости массы образца (а), массы воды (б) и влажности (с) от времени сушки

Fig. 2. Dependences of mass of the sample (a), water mass (b) and moisture (c) on drying time

выборка – 64 пробы. Для того чтобы математически охарактеризовать полученные эмпирические зависимости, был привлечен корреляционный анализ. Он показал, что наибольший коэффициент корреляции 0,86 характеризует зависимость массы воды в образце от времени сушки (при $\alpha=0,05$ доверительный интервал для него составляет 0,79–0,91). Заметно меньшие коэффициенты (0,76 и 0,77, соответственно, при доверительных интервалах 0,65–0,85 и 0,64–0,85) характеризуют зависимость скорости сушки от влажности и массы навески грунта. Таким образом, для конкретного вида грунта скорость сушки определяется количеством жидкости в пробе. Физически это объясняется тем, что процесс сушки определяется, прежде

всего, поглощенной микроволновой энергией, расходуемой на разогрев жидкости, и в несколько меньшей степени зависит от состава и структурных особенностей самого образца, которые косвенно характеризуются исходной массой и влажностью. Так как количество жидкости в связных и несвязных грунтах значительно отличается, это выражается во времени, затраченном на разные этапы сушки.

Указание на необходимость учёта этих особенностей должно быть приведено в рекомендациях по проведению испытаний грунтов в СВЧ-печах.

Заключение

Результаты исследований показали, что разброс значений влажности грунтов при сушке в микроволновой печи в большинстве случаев не выше, чем при сушке в конвекционной (табл. 1, рис. 1). Если у минеральных грунтов – как песчаных, так и глинистых, отмечается небольшой разброс влажности, то многолетняя практика работы с торфами неосушенных залежей показала, что добиться таких же результатов для них не просто. В обоих случаях разброс значений не соответствует требованиям нормативов к результатам параллельных определений показателя (допустимая разница при влажности более 100 % составляет 5 % [35], влаги – 1 % [24]). Вариации значений объясняются неоднородностью состава грунта, неравномерностью распределения органических остатков и минеральных включений, содержанием гумуса, разной степенью волокнистости, а главное – различной впитывающей и водоудерживающей способностью остатков растений-торфообразователей. Необходимо отметить, что довольно сложно проводить опробование на неосушенных торфяных массивах, также проблематична транспортировка проб с сохранением их исходного состояния, а потери влаги при этих процедурах существенно превышают допустимую разницу параллельных определений. Поэтому целесообразнее определять показатели физических свойств по одной навеске [27], увеличив количество отбираемых образцов с каждого инженерно-геологического элемента, представленного специфическим грунтом, до 15–20 штук.

Также, на основе результатов исследований и полученного в ходе проведения испытаний опыта, следует предложить ряд рекомендаций по определению влажности данным методом:

1. Техническое ограничение применения СВЧ. Образцы испытываемых грунтов должны иметь низкое содержание электропроводящих рудных минералов и не содержать значительные количества ионов солей, растворенных в поровой воде. Необходимо отметить, что для грунтов с континентальным или морским типом засоления этот метод может дать недостоверные значения влажности и требуются дополнительные исследования. В условиях сушки образцов со сравнительно небольшим содержанием влаги (к которым относятся и пески) микроволно-

вую печь нужно эксплуатировать на пониженной мощности, чтобы не допускать её перегрева.

2. Посуда. Применение микроволновой печи исключает использование металлической посуды, непроницаемой для микроволн и способной привести к короткому замыканию и поломке СВЧ-генератора. Посуда из дерева может самовозгораться, из стекла – трескается от больших и быстрых перепадов температур и бьется. Для сушки сильноразложившихся торфов, органических высокозолевых, органоминеральных, глинистых грунтов и пылеватых песков рекомендуется использовать фарфоровые или керамические контейнеры, выдерживающие сильные перепады температур. Пластиковая посуда для них не пригодна, поскольку за счет сильного разогрева на завершающих этапах сушки она начинает плавиться. Для слаборазложившихся водонасыщенных торфов и не пылеватых песков подходят бытовые пластиковые контейнеры. При установке мощности печи более 200 Вт рекомендуется использовать исключительно фарфоровую посуду.

Из методических рекомендаций хотелось бы акцентировать внимание на следующем:

1. Оптимальная мощность нагрева печи. Мощность определяется в ходе предварительных испытаний для каждого прибора и для каждой разновидности грунта индивидуально. В ходе предварительной серии испытаний было установлено, что оптимальная мощность нагрева при испытаниях песков составляет порядка 640 Вт, что позволяет поддерживать необходимую скорость сушки и не допускать перегрева образцов и используемой в ходе опытов посуды.

Для сушки глинистых и органических грунтов оптимальная мощность составляет 200–500 Вт, а для небольших навесок рекомендуется меньшая мощность, чтобы соблюдать баланс между оптимальной скоростью сушки и нагревом образцов.

2. Оптимальная масса навесок для определения влажности. Для песков рекомендуется масса навески в интервале 50–200 г, что позволит получить более точные результаты для маловлажных грунтов. Для глинистых грунтов в естественном состоянии рекомендуется навески массой от 15 до 50 г, что соответствует действующим нормативам. Для определения влажности глин твердой и полутвердой консистенции, а также влажности на границе раскатывания (полученной, в том числе и методом прессования) рекомендуются навески в 5–15 г, что дает достаточно высокую точность результатов, так как грунт содержит мало влаги, сохнет быстро, разброс значений минимален. Для органических грунтов оптимальная масса навески определяется исходной водонасыщенностью грунта и находится в интервале от 15–50 г для средне-, сильноразложившихся торфов и заторфованных грунтов; навески массой до 100–200 г рекомендуются для верховых слаборазложившихся торфов моховой группы (фускум-, ангустифолиум-, магелланикум-торфа), торфов с крупными во-

локами остатков растений-торфообразователей или торфов разной степени волокнистости. Для уменьшения разброса значений влажности желательно соблюдать баланс между массой грунта и числом проб в печи. В случае анализа средне- и сильноразложившихся торфов и заторфованных грунтов рекомендуются образцы массой 15–50 г с числом проб от 3 до 6 штук в одну загрузку печи. Для слаборазложившихся водонасыщенных торфов рекомендуется использовать навески массой более 100 г при числе проб не более 2–3 штук. Большие объемы водонасыщенного грунта будут требовать больше времени для сушки, что приведет к ненужному расходу энергии, поэтому при массовых определениях влажности целесообразнее применять ускоренный метод согласно [24].

3. Рекомендуемое время сушки и повторных интервалов взвешивания.

В результате исследований установлено, что время испытаний в микроволновой печи в первую очередь определяется массой содержащейся в образце воды, а также массой самого образца и составляет до 10 мин для навески порядка 15 г; 15–20 мин для навески в 30–50 г и порядка 30 мин для навески ~150 г при мощности порядка 700–800 Вт. Рекомендации применительно к отдельным подвидам грунтов в обобщенном виде представлены в табл. 3.

Таблица 3. Оптимальные параметры сушки дисперсных грунтов

Table 3. Optimum parameters of drying fine-grained soils

Подвиды грунтов Subtypes of soils	Масса навески, г Sample weight, g	Время сушки, мин Drying time, min	Интервалы повторных взвешиваний, мин Intervals of repeated weighing, min
Пески/Sands	50–200	5–25	1–2
Глины и заторфованные грунты Clay and peaty soils	50–100	10–15 и более, при $w > 40–50\%$ 10–15 and more, if $w > 40–50\%$	
Торфы/Peat	100–200	30–40	
	30–50	10–15	
	5–10	3–5	

4. Ускорение процесса сушки грунтов. Интенсифицировать процесс сушки позволит увеличение площади испарения испытываемых образцов, для чего их нужно укладывать тонким слоем и наносить на поверхность бороздки ножом или шпателем, а также перемешивать при повторных взвешиваниях.

Таким образом, результаты исследования подтвердили, что бытовые микроволновые печи являются эффективным средством для быстрого определения влажности разных грунтов, поскольку тестирование проводится быстрее и полученные данные не менее точны, чем при использовании сушильных шкафов. Прокаливание органических грунтов при разных температурах после тестирования на влажность показало, что потери органи-

ки также сопоставимы, что делает сушку в СВЧ более подходящей при небольших объёмах. Положительным и важнейшим результатом работы является доказательство того, что при сушке в СВЧ-печи вес образца не увеличивался при повторных взвешиваниях (рис. 1), что повышает точность определения влажности, не занижая её значений. Авторы надеются, что предложенные рекомендации позволят шире использовать недорогую техни-

ку как в полевых, так и в лабораторных условиях и, возможно, включить методику [13] в актуализированную версию ГОСТ 5180, а также ввести в стандарты дополнительные методы определения влажности.

Исследование выполнено в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета (средства ВИУ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berney E., Kyzar J., Oyelami L. Device comparison for determining field soil moisture content // U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory. – 2011. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a552792.pdf> (дата обращения 08.08.2017). Gilbert P. Evaluation of soil mechanics laboratory equipment. – Vicksburg: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1974. – Report 13. 2.
3. Hagerty D., Ullrich C., Denton M. Microwave Drying of Soils // Geotechnical Testing Journal. – 1990. – V. 13. – № 2. – P. 138–141.
4. He X.Y. Theory and application of microwaves. – Taipei: Science Monthly and King-Taiwan Information Technology Inc., 1994. – V. 292. – 4 p.
5. Determination of water content in clay and organic soil using microwave oven / V.V. Kramarenko, A.N., Nikitenkov I.A. Matveenkov, V.Yu. Molokov, Ye.S. Vasilenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43 (1). – Art. no. 012029.
6. Application of microwave method for moisture determination of organic and organic-mineral soils / V.V. Kramarenko, A.N. Nikitenkov, V.Yu. Molokov, A.V. Shramok, G.P. Pozdeeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 33 (1). – Art. no. 012040.
7. Lade P., Nejadi-Babadai H. Soil Drying by Microwave Oven // Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing. – Philadelphia: ASTM, 1975. – P. 320–340.
8. Miller R.J. et al. Soil water content microwave oven method // Soil Science Society of America Proceedings. – 1974. – V. 38. – № 3. – P. 535–537.
9. ASTM D 1558–10. Standard Test Method for Moisture Content Penetration Resistance Relationships of Fine-Grained Soils. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2010. URL: <https://www.astm.org/Standards/D1558.htm> (дата обращения 08.08.2017).
10. ASTM D 2216–10. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2010. URL: <https://www.astm.org/Standards/D2216.htm> (дата обращения 08.08.2017).
11. ASTM D 2922–6. Standard Tests Methods for Density of Soil and Soil-Aggregate in Place by Nuclear Methods (Shallow Depth). ASTM International: West Conshohocken, PA. – 1996. URL: <https://www.astm.org/Standards/D2922.htm> (дата обращения 08.08.2017).
12. ASTM D 2974–14 Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2014. URL: <https://www.astm.org/Standards/D2974.htm> (дата обращения 08.08.2017).
13. ASTM D 4643–08. Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Microwave Oven Heating. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2008. URL: <https://www.astm.org/Standards/D4643.htm> (дата обращения 08.08.2017).
14. ASTM D 4718–87(2007). Standard Practice for Correction of Unit Weight and Water Content for Soils Containing Oversize Particles. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2007. URL: <https://www.astm.org/Standards/D4718.htm> (дата обращения 08.08.2017).
15. ASTM D 4944–11. Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2011. URL: <https://www.astm.org/Standards/D4944.htm> (дата обращения 08.08.2017).
16. ASTM D 4959–07. Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Direct Heating hotplate, stove, blowtorch. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2007. URL: <https://www.astm.org/Standards/D4959.htm> (дата обращения 08.08.2017).
17. ASTM D 425–88(2008) Standard Test Method for Centrifuge Moisture Equivalent of Soils. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2008. URL: <https://www.astm.org/Standards/D425.htm> (дата обращения 08.08.2017).
18. ASTM D 6938–10 Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth). ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2010. URL: <https://www.astm.org/Standards/D6938.htm> (дата обращения 08.08.2017).
19. Marcos E., Tarrega R., Luis E. Changes in a humic cambisol heated (100–500 °C) under laboratory conditions: the significance of heating time // Geoderma. – 2007. – V. 138. – P. 237–243.
20. Berney I. et al. Non-Nuclear Alternatives to Monitoring Moisture-Density Response in Soils // US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory – 2013. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a583071.pdf> (дата обращения: 08.08.2017).
21. Chung Ph.W.K., Ho T.Y.K. Study on the determination of moisture content of soils by microwave oven method // Geo Report no. 221. – 2008. URL: http://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo_reports/doc/er221/er221links.pdf (дата обращения 08.08.2017).
22. Ryley M.D. The use of microwave oven for the rapid determination of moisture content of soils // An annotated bibliography on microwaves. – Cambridge: MITPress, 1969. – 356 p.
23. ВСН 164–69 Технические указания по устройству дорожных оснований из обломочных материалов, укрепленных цементом глины. – М.: Минтрансстрой, 1970. – 48 с.
24. ГОСТ 11305–2013. Торф и продукты его переработки. Методы определения влаги. – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.
25. ГОСТ 11306–2013. Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. – М.: Стандартинформ, 2014. – 7 с.
26. ГОСТ 12536–2014. Методы лабораторного определения гранулометрического и микроагрегатного состава. – М.: Стандартинформ, 2015. – 19 с.
27. ГОСТ 19723–74. Торф. Метод определения содержания влаги в залежи. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 15 с.
28. ГОСТ 23061–2012. Грунты. Методы радиоизотопных измерений плотности и влажности. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
29. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2013. – 39 с.

30. ГОСТ 26213–91. Почвы. Методы определения органического вещества. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 7 с.
31. ГОСТ 27740–2016. Грунты. Методы лабораторного определения содержания органических веществ. – М.: Стандартинформ, 2017. – 10 с.
32. ГОСТ 27784–88. Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 5 с.
33. ГОСТ 30416–2012. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2013. – 12 с.
34. ГОСТ 30672–2012. Грунты. Полевые испытания. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2013. – 7 с.
35. ГОСТ 5180–2015. Грунты методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Стандартинформ, 2016. – 20 с.
36. JIS A 1203:2009 Test Method For Water Content Of Soils Japanese Standards Association). – Japan: Japanese Industrial Standard Association, 2009. – 6 p.
37. AS 1289.2.1.1 Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Oven drying method (standard method). – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 p.
38. IS 27202–(1973) Methods of test for soils. Part 2: Determination of water content. URL: <https://archive.org/details/gov.in.is.2720.2.1973> (дата обращения: 08.08.2017).
39. BS EN ISO 178921–:2014. Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Determination of water content. – London, British Standards Institution, 2014. – 22 p.
40. AS 1289.2.1.4 Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Microwave-oven drying method (subsidiary method). – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 p.
41. AS 1289.2.1.5 Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Infrared lights method (subsidiary method). – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 p.
42. AS 1289.2.1.6 Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Hotplate drying method. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 p.
43. AS 1289.2.3.1 Soil moisture content tests – Establishment of correlation – Subsidiary method and the standard method. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 p.
44. AS 1289.3.1.1 Soil classification tests – Determination of the liquid limit of a soil – Four point Casagrande method. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 p.
45. AS 1289.B3.1 Soil moisture content tests – Establishment of correlation, between a subsidiary method of moisture content determination and the standard method AS 1289.2.1.1. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 p.
46. ISO 17319:2015 Fertilizers and soil conditioners – Determination of water-soluble potassium content – Potassium tetraphenylborate gravimetric method. International Organization for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/59569.html> (дата обращения: 08.08.2017).
47. ISO 178921–2014 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 1: Determination of water content. International Organization for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/55243.html> (дата обращения: 08.08.2017).
48. JGS 0122. Test method for water content of soils by the microwave oven. – Akomoto: Japanese Standards Association, 2017. – 300 p.
49. KS F 2306:2000 Test method for water content of soils. – Seoul: Korean Standards Association, 2000. – 4 p.
50. KS I ISO 10573:2005 Soil quality – Determination of water content in the unsaturated zone (Neutron depth probe method). – Seoul: Korean Standards Association, 2003. – 13 p.
51. KS I ISO 11461:2005 Soil quality – Determination of soil water content calculated on a volume basis (Gravimetric method). – Seoul: Korean Standards Association, 2003. – 5 p.
52. KS I ISO 11465:2005 Soil quality – Determination of dry matter and water content on a mass basis – Gravimetric method. – Seoul: Korean Standards Association, 2005. – 4 p.
53. BIS IS 12175:1987 (R2002). Specification for Rapid Moisture Meter for Rapid Determination of Water Content for Soil. Bureau of Indian Standard. URL: <https://archive.org/details/gov.in.is.12175.1987> (дата обращения: 08.08.2017).
54. AS 1289.5.8.71–998 (R2013). Methods of testing soils for engineering purposes – Soil compaction and density tests – Nuclear surface moisture-density gauges – Water content of a standard moisture block using hydrogen content of components. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 1998. – 8 p.
55. BIS IS 27202–:2013. Methods of Test for Soils – Part 2: Determination of Water Content. Bureau of Indian Standard. URL: <https://archive.org/details/gov.in.is.2720.2.1973> (дата обращения: 08.08.2017).
56. PN ISO 10573:2001. Soil Quality – Determination of Water Content in the Unsaturated Zone – Neutron Depth Probe Method. Polish Committee for Standardization. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10573:ed-1:v1:en:ec:E> (дата обращения: 08.08.2017).
57. PN ISO 11465:1999. Soil Quality – Determination of Dry Matter and Water Content on a Mass Basis – Gravimetric Method. Polish Committee for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/20886.html> (дата обращения: 08.08.2017).
58. PKN CEN ISO/TS 178921–:2009. Geotechnical Investigation and Testing – Laboratory Testing of Soil – Part 1: Determination of Water Content. Polish Committee for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/55243.html> (дата обращения: 08.08.2017).
59. GB/T 14506.12–010. Methods for chemical analysis of silicate rocks – Part 1: Determination of hygroscopic water content. – Beijing: Standardization Administration of China, 2010. – 8 p.
60. GB/T 14506.22–010 Methods for chemical analysis of silicate rocks – Part 2: Determination of combined water content. – Beijing: Standardization Administration of China, 2010. – 8 p.
61. BIS IS 13030:1991 (R2006) Method of Test for Laboratory Determination of Water Content, Porosity, Density and Related Properties of Rock Material. Bureau of Indian Standard. URL: <http://www.questin.org/is-code/is-130301-991-method-test-laboratory-determination-water-content-porosity-density-and-related-properties-rock-material> (дата обращения: 08.08.2017).
62. NFP 94 4101–2001 Rock – Test for Physical Properties of Rock. Part 1: Determination of Water Content of Rock – Oven-drying Method. – Paris: Association Francaise de Normalisation, 2001. – 6 p.
63. O'Kelly B., Sivakumar V. Water Content Determinations for Peat and Other Organic Soils Using the Oven-Drying Method // Drying Technology. – 2014. – V. 32. – № 6. – P. 631–643.
64. BS EN 13041:2011 Soil improvers and growing media. Determination of physical properties. Dry bulk density, air volume, water volume, shrinkage value and total pore space. – London, British Standards Institution, 2011. – 30 p.
65. Давлетбаков Р.Р. Влияние дисперсности частиц и СВЧ-излучения на прочность кремнеземистой керамики // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всерос. науч.-метод. конф. – Оренбург, 29–31 января 2014. – Оренбург: Оренбург. гос. ун-т, 2014. – С. 1331–1335.
66. Крамаренко В.В., Никитенков А.Н., Молоков В.Ю. О применимости СВЧ-метода для определения влажности песчаных грунтов // Современные проблемы науки и образования. – 2015 – № 1. – С. 1–12. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=18451> (дата обращения: 06.08.2017).
67. Крамаренко В.В., Никитенков А.Н., Молоков В.Ю. О применении микроволновых печей для определения влажности органических и органоминеральных грунтов // Современные про-

- блемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии: материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Томск, 23–27 ноября 2015. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 338–343.
68. Прохина А.В., Шаповалов Н.А., Латыпова М.М. Модификация поверхности глинистых минералов с высоким содержанием монтмориллонита в электромагнитном поле высокой частоты // Современные наукоемкие технологии. – 2011. – № 1. – С. 135–136.
69. Строительная керамика / под ред. В.Т. Станевич. – Павлодар: Кереку, 2008. – 96 с.
70. Макеева Т.Г., Егоров Ю.М. Экспериментальное наблюдение фазового перехода связанной воды I рода подобного II в моно- и полиминеральных глинистых грунтах // Глины, глинистые минералы и слоистые материалы: Материалы I Российского рабочего совещания, посвященного 90-летию со дня рождения Б.Б. Звягина. 2-е издание. – М., ИГЕМ РАН, 2011. – 161 с.

Поступила 28.08.2017 г.

Информация об авторах

Крамаренко В.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Никитенков А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Молоков В.Ю., старший лаборант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

APPLICATION OF MICROWAVE METHOD FOR DETERMINING SOIL MOISTURE

Violetta V. Kramarenko¹,

kramarenko-v-v@mail.ru

Alexey N. Nikitenkov¹,

nik@tpu.ru

Victor Yu. Molokov¹,

vik3011347@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Laboratory and field methods for determining soil moisture, commonly used in manufacturing organizations in Russia, have not changed essentially for many decades, resulting in their relatively high complexity and energy consumption. However, in current market conditions there is a need to improve the speed, quality and efficiency in determining soil physical characteristics.

The main aim was to study the drying process of dispersed soils in microwave ovens while determining their moisture content and to develop a methodology for determining soil moisture using microwave radiation. The application of the method in practice will solve the problems of increasing the resource efficiency of engineering and geological surveys by decreasing the energy and labor intensity of laboratory research, and, as a result, cost reduction.

Object of research: soils typical for Western Siberia, picked on the territory of the Tomsk region and the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug.

Research methods include a method for determining soil moisture using microwave ovens, as well as by analyzing the results using MS Excel and Statistica.

Results. The paper considers the possibility of using the method of accelerated determination of moisture of various soils with the help of microwave ovens at engineering and geological surveys for design, construction, repair and reconstruction of structures. It was found that spread of moisture values of the dispersed soils during drying in a microwave oven is in most cases not higher than when drying in a convection oven. It was confirmed that during drying no loss of organic matter in the ground occurs, as well as there is no growth in sample mass that increases the accuracy of determinations. The reliability of the confirmed test results was confirmed by the method of drying the soil to constant weight, in accordance with the requirements of the current regulatory documents. The authors have developed and tested the methodological recommendations for determining soil moisture when they are dried in a microwave oven.

Key words:

Soil, moisture, microwave method, engineering geology, energy efficiency.

The research was carried out at Tomsk Polytechnic University within the Competitiveness Enhancement Program of Tomsk Polytechnic University (VIU funds).

REFERENCES

- Berney E., Kyzar J., Oyelami L. *Device comparison for determining field soil moisture content*. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory, 2011. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a552792.pdf> (accessed: 08 August 2017).
- Gilbert P. *Evaluation of soil mechanics laboratory equipment*. Vicksburg, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1974. Report 13.
- Hagerty D., Ullrich C., Denton M. Microwave Drying of Soils // *Geotechnical Testing Journal*, 1990, vol. 13, no. 2, pp. 138–141.
- He X.Y. *Theory and application of microwaves*. Taipei, Science Monthly and King-Taiwan Information Technology Inc., 1994. Vol. 292.
- Kramarenko V.V., Nikitenkov A.N., Matveenko I.A., Molokov V.Yu., Vasilenko Ye.S. Determination of water content in clay and organic soil using microwave oven. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43 (1), art. no. 012029.
- Kramarenko V.V., Nikitenkov A.N., Molokov V.Yu., Shramok A.V., Pozdeeva G.P. Application of microwave method for moisture determination of organic and organic-mineral soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33 (1), art. no. 012040.
- Lade P., Nejadi-Babadai H. Soil Drying by Microwave Oven. *Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing*. Philadelphia, ASTM, 1975. Vol. 599, pp. 320–335.
- Miller R.J. Soil water content microwave oven method. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1974, vol. 38, no. 3, pp. 535–537.
- ASTM D 1558–10. *Standard Test Method for Moisture Content Penetration Resistance Relationships of Fine-Grained Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2010. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D1558.htm> (accessed: 08 August 2017).
- ASTM D 2216–10. *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2010. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D2216.htm> (accessed: 08 August 2017).
- ASTM D 2922–96. *Standard Test Methods for Density of Soil and Soil-Aggregate in Place by Nuclear Methods (Shallow Depth)*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 1996. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D2922.htm> (accessed: 08 August 2017).
- ASTM D 2974–14 *Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2014. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D2974.htm> (accessed: 08 August 2017).

13. ASTM D 4643–08. *Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Microwave Oven Heating*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2008. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D4643.htm> (accessed: 08 August 2017).
14. ASTM D 4718–87(2007). *Standard Practice for Correction of Unit Weight and Water Content for Soils Containing Oversize Particles*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2007. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D4718.htm> (accessed: 08 August 2017).
15. ASTM D 4944–11. *Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil By The Calcium Carbide Gas Pressure Tester*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2011. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D4944.htm> (accessed: 08 August 2017).
16. ASTM D 4959–07. *Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Direct Heating hotplate, stove, blowtorch*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2007. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D4959.htm> (accessed: 08 August 2017).
17. ASTM D 425–88(2008) *Standard Test Method for Centrifuge Moisture Equivalent of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2008. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D425.htm> (accessed: 08 August 2017).
18. ASTM D 6938–10 *Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth)*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2010. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D6938.htm> (accessed: 08 August 2017).
19. Marcos E., Tarrega R., Luis E. Changes in a humic cambisol heated (100–500 °C) under laboratory conditions: the significance of heating time. *Geoderma*, 2007, vol. 138, pp. 237–243.
20. Berney I. *Non-Nuclear Alternatives to Monitoring Moisture-Density Response in Soils*. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory. 2013. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a583071.pdf> (accessed: 08 August 2017).
21. Chung Ph.W.K., Ho T.Y.K. *Study on the determination of moisture content of soils by microwave oven method*. 2008. Available at: http://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo_reports/geo_rpt221.html (accessed: 08 August 2017).
22. Ryley M.D. The use of microwave oven for the rapid determination of moisture content of soils. *An annotated bibliography on microwaves*. Cambridge, MIT Press, 1969. 356 p.
23. VSN 164–69 *Tekhnicheskie ukazaniya po ustroystvu dorozhnykh osnovanii osnovaniy iz oblomochnykh materialov, ukreplennykh tsementom glin* [Departmental building standards 1646–9. Technical guidance on the installation of road foundations of elastic materials, reinforced cement clays]. Moscow, Mintransstroy Publ., 1970. 48 p.
24. GOST 11305–2013. *Torf. Metody opredeleniya vlagi* [Peat and products of its processing. Methods for determination of moisture]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 12 p.
25. GOST 11306–2013. *Torf i produkty ego pererabotki. Metody opredeleniya zolnosti* [Peat and products of its processing. Methods for the determination of ash content]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 7 p.
26. GOST 12536–2014. *Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo i mikroagregatnogo sostava* [Methods of laboratory determination of granulometric composition and microaggregates]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 19 p.
27. GOST 19723–74. *Torf. Metod opredeleniya sodержaniya vlagi v zalezhi* [Peat. The method of determining the moisture content of the deposits]. Moscow, Publishing house of standards, 1974. 15 p.
28. GOST 23061–2012. *Grunty. Metody radioizotopnykh izmereniy izmereniy plotnosti i vlazhnosti* [Soils. Methods of radioisotope measurements of density and humidity]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p.
29. GOST 25100–2011. *Grunty. Klassifikatsiya* [Soils. Classification]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 39 p.
30. GOST 26213–91. *Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva* [Soil. Methods of determining organic matter]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 12 p.
31. GOST 27740–79. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya sodержaniya organicheskikh veshchestv* [Soils. Laboratory determination of organic substances]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 10 p.
32. GOST 27784–88. *Pochvy. Metod opredeleniya zolnosti torfyanykh i otorfovannykh gorizontov pochvy* [Soil. A method of determining the ash content of the peat and peaty soil horizons]. Moscow, Publishing house of standards, 1988. 5 p.
33. GOST 30416–2012. *Grunty. Laboratornye ispytaniya. Obshchie polozeniya* [Soils. Laboratory tests. General provisions]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 12 p.
34. GOST 30672–2012. *Grunty. Polevye ispytaniya. Obshchie polozeniya* [Soils. Field tests. General provisions]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 7 p.
35. GOST 5180–2015. *Grunty metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik* [Soils methods for laboratory determination of physical characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 20 p.
36. JIS A 1203:2009 *Test Method for Water Content of Soils*. Japan, Japanese Industrial Standard Association, 2009. 6 p.
37. AS 1289.2.1.1 *Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Oven drying method (standard method)*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
38. IS 2720-2 (1973) *Methods of test for soils. Part 2: Determination of water content*. Available at: <https://archive.org/details/gov.in.is.2720.2.1973> (accessed: 08 August 2017).
39. BS EN ISO 17892-1:2014 *Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Determination of water content*. London, British Standards Institution, 2014. 22 p.
40. AS 1289.2.1.4 *Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Microwave-oven drying method (subsidiary method)*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
41. AS 1289.2.1.5 *Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Infrared lights method (subsidiary method)*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
42. AS 1289.2.1.6 *Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Hotplate drying method*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
43. AS 1289.2.3.1 *Soil moisture content tests – Establishment of correlation – Subsidiary method and the standard method*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
44. AS 1289.3.1.1 *Soil classification tests – Determination of the liquid limit of a soil – Four point Casagrande method*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
45. AS 1289.B3.1 *Soil moisture content tests – Establishment of correlation, between a subsidiary method of moisture content determination and the standard method AS 1289.2.1.1*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
46. ISO 17319:2015 *Fertilizers and soil conditioners – Determination of water-soluble potassium content – Potassium tetraphenylborate gravimetric method*. International Organization for Standardization. Available at: <https://www.iso.org/standard/59569.html> (accessed: 08 August 2017).
47. ISO 17892-1:2014 *Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 1: Determination of water content*. International Organization for Standardization. Available at: <https://www.iso.org/standard/55243.html> (accessed: 08 August 2017).
48. JGS 0122 *Test method for water content of soils by the microwave oven*. Japanese Standards Association. Akomoto, Japanese Standards Association, 2017. 300 p.

49. KS F 2306:2000 *Test method for water content of soils*. Seoul, Korean Standards Association, 2000. 4 p.
50. KS I ISO 10573:2005 *Soil quality – Determination of water content in the unsaturated zone (Neutron depth probe method)*. Seoul, Korean Standards Association, 2003. 13 p.
51. KS I ISO 11461:2005 *Soil quality – Determination of soil water content calculated on a volume basis (Gravimetric method)*. Seoul, Korean Standards Association, 2003. 5 p.
52. KS I ISO 11465:2005 *Soil quality – Determination of dry matter and water content on a mass basis – Gravimetric method*. Seoul, Korean Standards Association, 2005. 4 p.
53. BIS IS 12175:1987 (R2002). *Specification for Rapid Moisture Meter for Rapid Determination of Water Content for Soil*. Bureau of Indian Standard. Available at: <https://archive.org/details/gov.in.is.12175.1987> (accessed: 08 August 2017).
54. AS 1289.5.8.71–998 (R2013). *Methods of testing soils for engineering purposes – Soil compaction and density tests – Nuclear surface moisture-density gauges – Water content of a standard moisture block using hydrogen content of components*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 1998. 8 p.
55. BIS IS 2720-2:2013. *Methods of Test for Soils. – Part 2: Determination of Water Content*. Bureau of Indian Standard. Available at: <https://archive.org/details/gov.in.is.2720.2.1973> (accessed: 08 August 2017).
56. PN ISO 10573:2001. *Soil Quality – Determination of Water Content in the Unsaturated Zone – Neutron Depth Probe Method*. Polish Committee for Standardization. Available at: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:td:so:10573:e d-1:v 1:e n:s ec:E> (accessed: 08 August 2017).
57. PN ISO 11465:1999. *Soil Quality – Determination of Dry Matter and Water Content on a Mass Basis – Gravimetric Method*. Polish Committee for Standardization. Available at: <https://www.iso.org/standard/20886.html> (accessed: 08 August 2017).
58. PKN CEN ISO/TS 17892-1:2009. *Geotechnical Investigation and Testing – Laboratory Testing of Soil – Part 1: Determination of Water Content*. Polish Committee for Standardization. Available at: <https://www.iso.org/standard/55243.html> (accessed: 08 August 2017).
59. GB/T 14506.12–010. *Methods for chemical analysis of silicate rocks – Part 1: Determination of hygroscopic water content*. Beijing, Standardization Administration of China, 2010. 8 p.
60. GB/T 14506.22–010 *Methods for chemical analysis of silicate rocks – Part 2: Determination of combined water content*. Beijing, Standardization Administration of China, 2010. 8 p.
61. BIS IS 13030:1991 (R2006) *Method of Test for Laboratory Determination of Water Content, Porosity, Density and Related Properties of Rock Material*. Bureau of Indian Standard. Available at: <http://www.questin.org/is-code/is-130301-991-method-test-laboratory-determination-water-content-porosity-density-and-related-properties-rock-material> (accessed: 08 August 2017).
62. NFP 94 410-1:2001 *Rock – Test for Physical Properties of Rock – Part 1: Determination of Water Content of Rock – Oven-drying Method*. Paris, Association Francaise de Normalisation, 2001. 6 p.
63. O'Kelly B., Sivakumar V. Water Content Determinations for Peat and Other Organic Soils Using the Oven-Drying Method. *Drying Technology*, 2014, vol. 32, no. 6, pp. 6316–43.
64. BS EN 13041:2011 *Soil improvers and growing media. Determination of physical properties. Dry bulk density, air volume, water volume, shrinkage value and total pore space*. London, British Standards Institution, 2011. 30 p.
65. Davletbakov R.R. Vliyaniye dispersnosti chastits i SVCh-izlucheniya na prochnost kremnezemistoy keramiki [Influence of dispersion of the particles and microwave radiation on the strength of siliceous ceramics]. *Universitetskiy kompleks kak regionalny tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii* [University complex as a regional center of education, science and culture: materials of vseros. scientific-method. Conf.]. Orenburg, 29–31 January 2014. Orenburg, Orenburg State University Press, 2014. pp. 1331–1335.
66. Kramarenko V.V., Nikitenkov A.N., Molokov V.Yu. O primenimosti SVCh-metoda dlya opredeleniya vlazhnosti peschanykh gruntov [On applicability of the microwave method for determining moisture content of sandy soils]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 1, pp. 1–12. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=18451> (accessed: 08 August 2017).
67. Kramarenko V.V., Nikitenkov A.N., Molokov V.Yu. O primenении mikrovolnovykh pechey dlya opredeleniya vlazhnosti organicheskikh i organomineralnykh gruntov [On application of microwave ovens to determine the moisture content of organic and organomineral soils]. *Sovremennyye problemy gidrogeologii, inzhenernoy geologii i gidrogeokologii Evrazii: materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Modern problems of hydrogeology, engineering Geology and Hydrogeocology of Eurasia: materials of all-Russian conference with international participation]. Tomsk, 23–27 August 2015. Tomsk, TPU Publ. house, 2015. pp. 338–343.
68. Prokhina A.V., Shapovalov N.A., Latypova M.M. Modifikatsiya poverkhnosti glinistykh mineralov s vysokim soderzhanie montmorillonita v elektromagnitnom pole vysokoy chastoty [Modification of clay minerals surface with high content of montmorillonite in high-frequency electromagnetic field]. *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii*, 2011, no. 1, pp. 135–136.
69. *Stroitel'naya keramika* [Building ceramics]. Ed. by V.T. Stanevich. Pavlodar, Kereku Publ., 2008. 96 p.
70. Makeeva T.G., Egorov Yu.M. Eksperimentalnoe nablyudeniye fazovogo perekhoda svyazannoy vody I roda podobnogo II v mono- i polimineralnykh glinistykh gruntakh [Experimental observation of phase transition of the bound water of the I kinds like II in mono- and polimineral clay soils]. *Gliny, glinistyye mineraly i sloistyye materialy: Materialy I Rossiyskogo rabocheho soveshchaniya, posvyashchennogo 90-letiyu so dnya rozhdeniya B.B. Zvyagina* [Clay, clay minerals and layered materials. Materials of the I Russian workshop devoted to the 90 anniversary from the birthday of B.B. Zvyagin]. Moscow, IREM RAN Publ., 2011. 161 p.

Received: 28 August 2017.

Information about the authors

Violetta V. Kramarenko, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexey N. Nikitenkov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Victor Yu. Molokov, senior laboratory assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.