

**ГРАВИТАЦИОННЫЙ ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ НАИМЕНЬШЕЙ
И КАПИЛЛЯРНОЙ ВЛАГОЕМКОСТИ В ПОЧВАХ И СЛОИСТЫХ
ПОЧВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ***

© 2008 г. А. В. Смагин, Г. М. Хакимова, Д. А. Хинеева, Н. Б. Садовникова

Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы

E-mail: smagin@list.ru

Поступила в редакцию 20.03.2008 г.

В лабораторных и полевых экспериментах исследуется явление влагоемкости почвы как квазиравновесное состояние между физическими силами, удерживающими и удаляющими почвенную влагу. Показано, что гравитационный фактор имеет большое значение в определении влагоемкости или остаточной после гравитационного оттока влажности почв, наряду с их дисперсностью и структурой. Исследование расширяет традиционные представления о природе таких явлений как наименьшая (предельная полевая) и капиллярная влагоемкости почв и позволяет предложить физически обоснованные методики их оценки по кривым водоудерживания (**ОГХ**). Особенный интерес представляет оценка количеств так называемой подвешенной влаги в слоях с разрывом капиллярной сплошности, возникающей в слоистых почвах, а также при строительстве дренажа и других инженерных сооружений, приводящих к формированию почвенных конструкций со слоями разного механического состава. Исследованы закономерности формирования влагоемкости слоистых почвенных конструкций с щебнистыми экранами и торфяными прослоями для повышения водоудерживающей способности почв и их защиты от вторичного засоления (загрязнения).

ВВЕДЕНИЕ

Способность почвы удерживать воду характеризуется в классической гидрофизике количественным показателем влагоемкости. Основной причиной водоудерживающей способности почв является связывание влаги со стороны твердой фазы и порового пространства в целом (капиллярно-сорбционный механизм), за исключением тех случаев, когда задержка влаги в вышележащих слоях почвы вызвана низкой водопроницаемостью подстилающих отложений (водупоров). Поэтому в широком смысле влагоемкость почвы можно определить как максимальное количество влаги, удерживаемое в почве силами определенной природы [17].

Традиционно при обосновании явления влагоемкости почв рассматриваются силы, действующие на воду со стороны твердофазного матрикса (поверхностные (адсорбционные), молекулярные, капиллярные...) и в соответствии с этим выделяются различные виды влагоемкостей (максимальная адсорбционная (**МАВ**), максимальная молекулярная (**ММВ**), максимальная капилляр-

но-сорбционная (**МКСВ**), капиллярная (**КВ**), полная (**ПВ**)) или так называемые почвенно-энергетические константы, маркирующие границы перехода между различными категориями (формами) влаги в почвах [17]. Вместе с тем для емкости “без дна”, каковой в большинстве случаев является почва, очевидно, что водоудерживание должно зависеть не только от упомянутых выше физических взаимодействий, связывающих воду в поровом пространстве, но и от сил, стремящихся удалить ее из почвы, и в идеале влагоемкость характеризуется неким квазиравновесным (предельно-равновесным по Воронину [3]) состоянием почвенной физической системы, результатом баланса подобных противодействий. Так для прочносвязанной влаги можно предположить, что максимальная адсорбционная влагоемкость будет зависеть, в частности, от температуры, определяющей интенсивность десорбции водяных паров из почвы. Уменьшение величин равновесной влажности на изотермах сорбции паров воды почвой при повышении температуры подтверждено экспериментальными данными [15]. Для категорий влаги, перемещающейся в поле силы тяжести (гравитационной, капиллярной), резонно допустить зависимость соответствующих величин влагоемкостей от силы тяжести, стремящейся удалить воду из почвы, в противовес капиллярным силам водоудерживания [9, 11]. И целью данной работы было исследование таких эффектов на экспериментальном уровне для

* Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований ОБН РАН “Биологические ресурсы России”, Госконтрактов Правительства Москвы № Н-19/06 “Разработка мероприятий по совершенствованию системы управления качеством почв г. Москвы” и № 8/3-4934-07 “Ресурсная оценка и технологии оптимизации экологического состояния почв г. Москвы”.

физически обоснованной оценки предельно-равновесных состояний влаги (максимальных влагоемкостей) в почвах по кривым водоудерживания (**ОГХ**), в развитие структурно-функциональной концепции физического состояния почв [2, 3, 9, 11, 14, 17].

Прикладное значение проводимых исследований определяется широким применением показателей влагоемкости почв в гидрофизике, мелиорации, инженерной геологии, грунтоведении, агрометеорологии и других практических отраслях. Заметим, что для капиллярно-подпертой влаги и соответствующей величины водоотдачи в мелиоративных проектах уже давно принята на вооружение зависимость водоудерживающей способности от гравитационного фактора (удаленности от уровня залегания грунтовых вод) в форме так называемой динамической влагоемкости [17]. Для подвешенной влаги на практике используется оценка наименьшей влагоемкости (**НВ**) или ее фактических аналогов (полевой, предельной полевой, общей влагоемкости по Н.А. Качинскому...), характеризующих максимальное количество влаги, которое почва способна удерживать капиллярными силами после свободного стекания гравитационной влаги [17]. При этом и само понятие **НВ** и методика ее определения в полевых условиях разрабатывались для достаточно однородных, автоморфных почв в условиях хорошего дренажа (оттока) гравитационной влаги [17]. На практике же часто приходится иметь дело с неоднородными, слоистыми почвами, где капиллярное подвешивание влаги осложняется эффектами “жаменовских цепочек”, застоём влаги на границах раздела слоев и тому подобными факторами. Для задач прикладной гидрофизики необходимо уметь прогнозировать влагоемкость и в таких почвенных объектах, в том числе с целью создания искусственных влагоаккумулятивных почвенных конструкций с разрывом гидравлической связности при переходе от одних слоев к другим [10, 19]. Наконец, полевое определение **НВ** является весьма трудоемкой и длительной процедурой, и если возникает возможность достоверной, физически обоснованной оценки этого свойства по кривым водоудерживания, подобная альтернатива будет, безусловно, востребована на практике.

Таким образом, поставленная в работе цель представляет интерес как в теоретическом, так и в прикладном аспектах. Исследование развивает классические представления российских гидрофизиков-почвоведов А.Ф. Лебедева, А.А. Роде, Н.А. Качинского о водоудерживающей способности почв в виде дискретных предельно-равновесных величин (влагоемкостей). Вместе с тем оно способствует не противопоставлению, а объединению этих представлений с доминирующим за рубежом континуальным термодинамическим

подходом к оценке влаги в почвах, что впервые было предпринято в работах А.Д. Воронина по структурно-функциональной организации почвенных физических систем [2, 3].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые и лабораторные эксперименты проводились на территории УОПЭЦ МГУ “Чашниково” в 2004–2007 гг. на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах, подстилаемых либо плотными опесчаненными моренными суглинками, либо флювиогляциальными песками, а также на искусственно созданных экспериментальных почвенных конструкциях с чередующимися слоями почвенных материалов разной дисперсности. В полевых условиях проводились опыты по определению остаточной после гравитационного стекания влаги на исследуемых объектах классическим методом заливных площадей для оценки **НВ** [1]. Синхронно для лабораторных экспериментов отбирались образцы ненарушенного сложения (монолиты) из однородных легкосуглинистых пахотных горизонтов (А пах, 0–30 см и подстилающих песчаных отложений В, 40–60 см) исследуемых дерново-подзолистых почв. Монолиты отбирались путем вбивания в стенку разреза цилиндрических пластмассовых труб различной длины с внутренним диаметром 3 см. При этом использовались трубки разной длины от 3 до 100 см для исследования влияния силы тяжести на остаточную после гравитационного оттока влажность (влагоемкость) почвы.

Монолиты насыщались влагой до полной влагоемкости, изолировались полиэтиленовой пленкой с верхнего торца от испарения и устанавливались вертикально в колбы Бунзена для свободного стекания влаги под действием силы тяжести. Пространство между горлышком колбы и трубкой монолита заполняли полиэтиленом и изолировали скотчем во избежание потерь влаги при испарении с нижней поверхности монолита внутри колб. Вместе с тем изоляция не создавала полной герметичности колб, равно как и верхнего торца колонок, что исключало подвешивание или подпор влаги в монолитах защемлением воздуха. Колонки взвешивались через определенные промежутки времени для изучения динамики влажности и оценки влагоемкости при окончании гравитационного оттока. После эксперимента монолиты высушивались до постоянной массы при 105°C, причем длинные трубки предварительно распиливались на небольшие (10–20 см) отрезки, что позволяло определить конечную влажность послойно. В одном из вариантов эксперимента колонки с монолитами после прекращения гравитационного оттока в лабораторных условиях переносились в поле и устанавливались вертикально на поверхность данного почвенного горизонта

для дополнительного капиллярного оттока с нижней границы монолита.

Помимо нативных почв были исследованы искусственно созданные слоистые почвенные конструкции с набором горизонтов (слоев), резко отличающихся по составу, дисперсности и гидрофизическим свойствам (рис. 1). В качестве почвенных материалов использовался низинный торф поймы р. Клязьма, заготовленный на территории УОПЭЦ “Чашниково” для производства торфо-навозных компостов и грубодисперсный щебнистый материал разного генезиса со средним диаметром каменных отдельностей 1–3 см. Конструктоземы формировались на флювиогляциальных песчаных отложениях после снятия верхнего 30 см пахотного слоя исследуемой легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы. Материалы легкосуглинистого пахотного горизонта и подстилающих песчаных отложений были применены для переслаивания инородных почвенных компонентов (торфа, щебня) в процессе подготовки конструкций. В полевых экспериментах изучалось поведение влаги в следующих вариантах конструкций: 1) пахотный горизонт (А пах)/торф/песок; 2) А пах/торф/песок/торф/песок; 3) и 5) А пах/щебень/песок; 4) А пах/торф/песок/щебень/песок. Принципиальные схемы конструкций с указанием мощности слоев приведены на рис. 1.

На поверхность конструктоземов устанавливались стандартные металлические рамы, после чего были проведены 6-часовые заливочные эксперименты для определения водопроницаемости и остаточной после гравитационного оттока воды влагоемкости почвы (НВ), согласно руководству [1]. Контролем в эксперименте служила легкосуглинистая ненарушенная почва на том же участке, подстилаемая флювиогляциальными отложениями, где проводился аналогичный эксперимент. Для определения влажности в почве и конструктоземах наряду со стандартным термовесовым методом и буровым отбором образцов [1] был применен датчик влажности древесины Sh-0453 (Россия) с предварительной калибровкой показаний на почвенных монолитах [12].

Расчет осредненной величины влагоемкости для горизонта (колонки) определенной мощности при нескольких значениях влажности определялся с учетом веса каждого элемента (слоя). Так при остаточных влажностях 9,6, 11,6, 12,8% в слоях (элементах) песчаного монолита мощностью 0–15, 15–35, 35–60 см, влагоемкость общего слоя 0–60 см находилась как $(9,6 \times 15 + 11,6 \times 20 + 12,8 \times 25)/60 = 11,6\%$.

В лабораторных условиях на образцах ненарушенного сложения были получены основные гидрофизические характеристики почв и материалов конструкций методом равновесного центрифугирования [13] с использованием портативной цен-



Рис. 1. Схемы слоистых почвенных конструкций.

трифуги ЦУМ-1. Расчет удельной поверхности структурных элементов почвы ($S_{ск}$) с эффективным размером частиц ≥ 1 мк проводился по кумулятивному кривым гранулометрического состава, согласно [11]. При этом была использована информация лабораторного практикума по физике почв для исследуемой территории из базы данных кафедры физики и мелиорации почв ф-та почвоведения МГУ. Все эксперименты и определения гидрофизических свойств проводились в 2–3 кратной повторности с последующей статистической обработкой результатов на базе компьютерных приложений EXCEL и программы SIGMA-PLOT 4 версии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обратимся к результатам исследования и их физической интерпретации. В первой серии экспериментов на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах на опесчаненных моренных суглинках величина НВ, определенная традиционным методом заливных площадей, в пахотном горизонте составила $16,7 \pm 1,9\%$. Аналогичная величина остаточной влажности после гравитационного стекания влаги в течение 2 суток в трубках с монолитами гор. А пах варьировала в широких пределах от 18 до 30% в зависимости от высоты трубок (рис. 2, А). При небольшой высоте монолита (5–10 см) остаточная влажность была близка к полной влагоемкости почвы (30–33%), тогда как в метровой колонке данная величина была значительно меньше (18%) и приближалась к полевой НВ. Очевидно, что в небольших колонках сила тяжести единого водного тела (гидравлическое давление) слишком мала, и не в состоянии удалить сколь либо значительное количество влаги, удерживаемой капиллярными силами почвенного матрикса. Тогда как в длинных колонках с той же почвой развивается достаточное гидравлическое давление для дренирования (оттока) существенно больших количеств влаги, в результате чего остаточная влажность (влагоемкость) закономерно уменьшается. Установка монолитов на поверхность ненасыщенной почвы в полевых условиях еще на 2 сут. приводит к дополнительно оттоку влаги за счет сосущей силы подстилающих слоев. Причем в длинных колонках достигается равновесная влажность 16,7–17,0%, соответ-

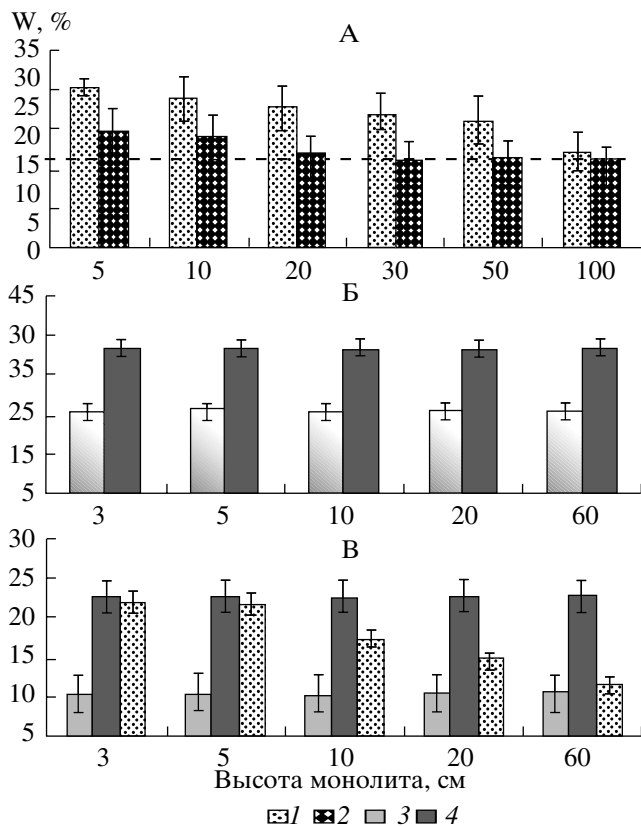


Рис. 2. Влияние высоты монолита на влагоемкость (остаточную влажность) почв. А, Б – монолиты легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы (гор. А пах), В – монолиты подстилающих флювиогляциальных песков (гор. В); 1 – влагоемкость после гравитационного оттока влаги в лабораторных условиях, 2 – влагоемкость после дополнительного капиллярного оттока при установке монолитов на поверхность почвы в поле, 3 – полевая влажность, 4 – полная влагоемкость монолитов, пунктирная линия – НВ методом заливных площадей.

ствующая полевым величинам НВ. Однако в трубках меньшей высоты влагоемкость продолжает оставаться в среднем выше, чем НВ, определенная в полевых условиях. Этот факт показывает, что одной сосущей силы ниже лежащих слоев без должного гравитационного давления недостаточно для удаления влаги до состояния НВ, по крайней мере, для исследуемого класса почв по дисперсности при близких к НВ полевых влажностях.

Эксперименты были повторены на легкосуглинистых старопашотных почвах, подстилаемых песчаными отложениями, причем исследовались монолиты как из верхнего корнеобитаемого слоя, так и из подпочвы (рис. 2, Б, В). Результаты подтвердили выявленную ранее зависимость влагоемкости от высоты колонки (монолита). Как видно и для легкосуглинистого горизонта и для песчаных подстилающих отложений при минимальной высоте монолита (3 см) влагоемкость

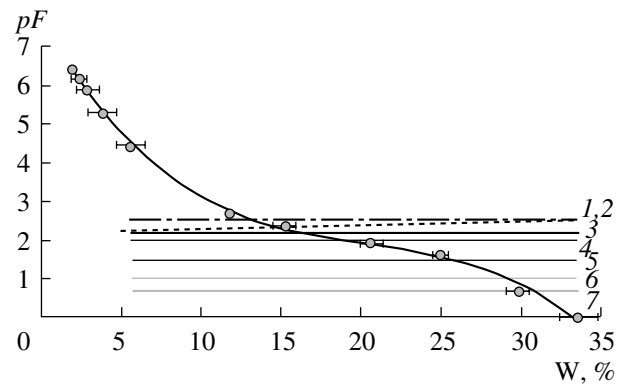


Рис. 3. ОГХ дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы (способы оценки влагоемкости). Обозначения: 1 – универсальный эмпирический способ по $pF = 2.5$, 2 – метод секущих по А.Д. Воронину, 3 – оценка по расчетной величине высоты капиллярного поднятия, 4–7 – оценка по высоте почвенного слоя (монолита) 100, 30, 10, 5 см, соответственно.

была близка к ПВ, а при максимальной (60 см) – к значениям полевой влажности, отражающим в данный период года (начало июня) наименьшую влагоемкость почвы.

Проведенные опыты не являются чем-то новым в гидрофизике и по сути повторяют классические исследования 30–50-х годов А.Ф. Лебедева, А.А. Роде, Л. Ричардса с почвенными колонками и капилляриметрами, впервые обосновавшими зависимость остаточной влажности почвы от мощности подвешенного водного слоя или эквивалентного ему гидравлического давления, а также условий на верхней и нижней границах почвенного профиля [4, 8, 18]. Вместе с тем подобные эксперименты чрезвычайно важны для осознания физического механизма водоудерживающей способности и соответствующей величины влагоемкости почвы в особенности для столь распространенных в природных и антропогенных ландшафтах неоднородных по гранулометрическому составу и гидрофизическим свойствам почвенных объектов. В частности, они открывают перспективу физически обоснованной оценки НВ по кривым водоудерживания [9, 11].

Величина гравитационного потенциала (давления) влаги в почвенной колонке в первом приближении будет численно равна самой высоте колонки в см. водн.ст. Переводя абсолютные значения этого давления в единицы $pF = \lg/P_{\text{см. водн.ст.}}$ и откладывая их по оси ординат на графике ОГХ, легко поучить при пересечении с кривой ОГХ равновесную влажность, соответствующую влагоемкости для слоя почвы данной мощности после гравитационного оттока влаги (рис. 3). Сопоставление реальной остаточной влажности монолитов и оцененной по данному способу дает вполне сходные результаты в пределах естествен-

ного варьирования величин влажности (рис. 2, А, Б, 3). Так для легкосуглинистого гор. А пах влагоемкости монолитов высотой 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100 см составили $32.8 \pm 1.9\%$, $31.3 \pm 1.3\%$, $28.4 \pm 4.0\%$, $26.3 \pm 3.6\%$, $25.3 \pm 3.4\%$, $23.8 \pm 4.6\%$, $17.9 \pm 3.8\%$. Аналогичные величины, оцененные по ОГХ (метод центрифугирования) с секущими в виде высот монолитов, дали значения (%) 31.3, 30.5, 29.3, 26.8, 25.3, 23.0, 18.5, соответственно. По сути и метод колонн (нормальное гравитационное поле) и метод центрифугирования (гравитация, усиленная центробежным полем) дают одинаковые результаты оценки водоудерживающей способности почв в интервале гравитационной и капиллярной влаги. Вместе с тем очевидно, что даже в самой высокой колонке мощностью 100 см гравитационного давления недостаточно, чтобы иссушить почву до величин НВ, полученных классическим способом в поле ($16.7 \pm 1.9\%$). Какое же значение давления надо отложить на оси ординат, чтобы получить искомую НВ по ОГХ?

Можно воспользоваться известными эмпирическими величинами и зависимостями [17]. Наиболее простой, принятый в зарубежном почвоведении подход – оценка по универсальной для всех почв величине давления в 330 см.водн.ст. ($pF = 2.5$). Однако, как видно из рис. 3, для исследуемой почвы он дает величину НВ 13.0–13.5%, что значительно отличается от реальной НВ (16.7 ± 1.9) практически на 3% влажности. Более развитый эмпирический подход Воронина, предполагает увеличение эквивалентного НВ давления с повышением водоудерживающей способности почв, согласно линейной регрессии $pF = 2.17 + W/100$ (W – массовая влажность почвы в %) [2]. Он тоже дает заниженные влагоемкости 14.0–14.5%, которые, однако, уже попадают в доверительный интервал полевых значений НВ (16.7 ± 1.9).

В наших работах предложен еще один способ оценки НВ по ОГХ, который в отличие от двух предыдущих имеет достаточно строго физическое обоснование, исходя из сути НВ как максимально возможной капиллярно-подвешенной влаги в слое почвы [9, 11]. Поскольку НВ является тем наибольшим количеством влаги, которую почва способна удерживать капиллярными силами после гравитационного стекания [17], очевидно необходимо определить максимальное абсолютное значение давления (потенциала) этих сил и использовать его в качестве секущей для оценки НВ по ОГХ. Есть основания полагать, что на макроуровне (для макрокапилляров, по которым происходит перемещение гравитационной влаги) такому значению в см.вд.ст. соответствует предельная высота капиллярного поднятия влаги в почве [9]. Она, как известно, имеет фиксированное (конечное) значение, варьирующее в зависимости от дисперсности и генезиса почв от 20–30 см (пески) до 300–350 (600) см (глины) [8, 16, 5, 17].

Выше указанных отметок вода в почве в полевых условиях подняться не может, несмотря на наличие в структуре тонкодисперсных почв мезо- и микрокапилляров с существенно более высокими абсолютными значениями капиллярного давления. То есть в реальных условиях сила тяжести стекающей массы воды противостоит водоудерживающей способности почвы (макрокапиллярные силы) с максимально возможным значением соответствующего давления почвенной влаги численно равным высоте капиллярного поднятия. Это положение соответствует классическим представлениям Роде, согласно которым величина НВ отмечается на кривых водоудерживающей способности (равновесного вертикального распределения влаги) в зоне постоянной влажности выше капиллярной каймы [7, 17].

Если мощность единого водного тела подвешенной влаги больше или равна этой величине, в почве реализуется квазиравновесное состояние с наименьшим из всех возможных количеством удерживаемой влаги, то есть состояние наименьшей влагоемкости. Такое явление, очевидно, возникает в однородных автоморфных почвах после их промачивания с поверхности на глубину не меньшую чем высота капиллярного поднятия. Аналогичным образом в экспериментах с почвенными монолитами (колонками) величина влагоемкости, соответствующая полевой НВ, может быть достигнута лишь в достаточно высоких колонках, как минимум превышающих высоту капиллярного поднятия. Лишь в этом случае разовьется достаточное для удаления (гравитационного стекания) влаги гидравлическое давление. Как видно из наших экспериментов для легкосуглинистого гор. А пах даже в колонках мощностью 100 см не достигались требующиеся давления и влагоемкость (рис. 2, А).

Акцентируем на этом внимание, поскольку в действующем руководстве [1] прописаны методики лабораторного определения НВ (общей влагоемкости по Качинскому) и капиллярной влагоемкости в трубках универсальной высоты 10 см, что, как видно из предшествующего изложения, лишено физического обоснования. В таких экспериментах величины влагоемкости будут всегда выше, чем полевые НВ и КВ, если только уровень грунтовых вод не располагается отметке 10 см или в почве не подвешивается слой влаги мощностью 10 см без возможности капиллярного рассасывания вглубь почвы, например из-за гидрофобности пересушенного песка или слоистости. Ошибки подобного рода возникают даже в крупных гидрологических работах, как, например, в монографии [6], автор которой определял НВ “на образцах с ненарушенной структурой”, и получал для песчаных и гравелистых почв значения влагоемкости в 25–30% от массы почвы, то есть фактически полную водовместимость.

По той же причине в неоднородных слоистых почвах с разрывом капиллярной сплошности при переходе от одного слоя (горизонта) к другому, также будет наблюдаться увеличение влагоемкости, если мощность слоя меньше, чем высота капиллярного поднятия для вмещающего материала данной дисперсности и структуры. И в заключительной части работы мы проиллюстрируем данное положение экспериментами с почвенными конструкциями.

Возвращаясь к способу оценки НВ по ОГХ с помощью секущих по высоте капиллярного поднятия (максимальному потенциалу макрокапиллярных сил), отметим, что для исследуемого легкосуглинистого материала, согласно литературным данным можно ожидать высоту капиллярного поднятия от 120 до 170 см или pF 2.1–2.2 [5, 16, 17]. Равновесная влажность по ОГХ при таких значениях pF укладывается в диапазон 15–17%, что вполне соответствует полевым определениям НВ 16.7 ± 1.9 .

Преимущество оценки по высоте капиллярного поднятия, как физически обоснованного метода, очевидно и из других соображений. В эмпирических подходах не учитывается зависимость капиллярных сил от плотности сложения почвы, которая наряду с дисперсностью будет оказывать существенное влияние на капиллярный потенциал (давление), и, соответственно, водоудерживающую способность почвы, высоту капиллярного поднятия и величину НВ. В наших исследованиях предпринята попытка получения универсального теоретического уравнения для оценки действия капиллярных сил по высоте капиллярного поднятия в почвах, которое дополняет известную в физике почв формулу Жюрена, учитывая показатели плотности почвы, максимальной адсорбционной влагоемкости и дисперсности (гранулометрического состава) [9, 11].

Уравнение имеет вид:

$$H = \frac{100\sigma_{ж/2}S_{ск}\rho_b}{\rho_l g(1 - \rho_b/\rho_s - \rho_b W_a/\rho_l)}, \quad (1)$$

где H – искомая высота капиллярного поднятия (см), $\sigma_{ж/2}$ – поверхностное натяжение воды (н/м), $S_{ск}$ – удельная поверхность структурных элементов почвы (m^2/kg), ρ_l , ρ_b , ρ_s – плотности воды, почвы и ее твердой фазы ($г/см^3$), W_a – максимальная адсорбционная влагоемкость ($г/г$).

Величина $S_{ск}$ оценивается по кумулятивным кривым гранулометрического состава и относится к базовым показателям в концепции физического состояния почв [11]. Для ее получения ку-

мулятивная кривая гранулометрического состава аппроксимируется функцией

$$Y = \frac{a}{1 + \exp\left(\frac{-(r - r_0)}{b}\right)}, \quad (2)$$

где r – размер частиц (мм), Y – их кумулятивное содержание в почве (%), r_0 , a , b – параметры аппроксимации. Аппроксимацию удобно проводить с помощью компьютерной программы SIGMA-PLOT. В частности, для рассматриваемой легкосуглинистой почвы были получены следующие статистически значимые параметры: $a = 99.89$, $b = 0.0244$, $r_0 = 0.0564$ при стандартной ошибке аппроксимации 5.4, уровне значимости 0.05 и коэффициенте нелинейной регрессии $R^2 = 0.99$. Непрерывная кривая необходима для расчета дифференциальной функции $F = (0.06dY/dr)/(\rho_s)$, результатом численного интегрирования которой в пределах от 1мк до 1мм является искомая величина $S_{ск}$ [9, 11]. Для исследуемой почвы $S_{ск}$ составила $63.7 m^2/kg$, откуда по формуле 1 получаем при $\rho_b = 1.4 g/cm^3$, $\rho_s = 2.65 g/cm^3$, $W_a = 0.03 g/g$ высоту капиллярного поднятия $H = 152$ см. Откладывая соответствующую ей величину $pF = 2.18$ в качестве секущей ОГХ, находим равновесную влажность 16.3%, практически равную среднестатистическому значению НВ (16.7%), определенному в полевых условиях (рис. 3).

Оценка величин влагоемкости (НВ и КВ) по данным о высоте капиллярного поднятия или расстояния от уровня грунтовых вод (УГВ) может, очевидно, проводиться и без получения всей ОГХ при помощи центрифуги или капилляриметра. В этом случае нужно отгонять воду из образца почвы при скорости вращения, соответствующей гравитационному давлению столба жидкости в см.вд.ст численно равному высоте капиллярного поднятия (НВ) или удалению от УГВ (КВ). Для капилляриметра следует задать требуемое разряжение в см.вд.ст; для колонок – взять требуемую высоту. Влажность почвы после таких измерений, очевидно будет отражать искомую влагоемкость.

Обратимся к экспериментам со слоистыми почвенными конструкциями для проверки возможности определения их влагоемкости предложенным выше способом. На рис. 4 приведены кривые квазиравновесного распределения влажности на вторые сутки после гравитационного оттока в контрольной легкосуглинистой почве, подстилаемой флювиогляциальными песками и в пяти вариантах слоистых почвенных конструкций на ее основе. Заметим, что НВ легкосуглинистой контрольной почвы, подстилаемой песком выше, чем в рассмотренном ранее случае границы с моренным суглинком, поскольку нарушена капил-

лярная сплошность и возможность интенсивного рассасывания влаги вглубь. В результате вместо ожидаемого по логике “сплошного дренажа” в такой почве осуществляется дополнительная аккумуляция влаги и НВ в среднем по слою достигает $19.8 \pm 2.3\%$, что на 3% выше аналогичной величины в почве на суглинке, удаляющем дополнительно часть влаги благодаря капиллярному рассасыванию.

Оценка содержания подвешенной влаги в такой природной слоистой конструкции по ОГХ по секущей $pF = 1.47$, соответствующей мощности 30 см легкосуглинистого горизонта, дает величину влагоемкости порядка 25%, то есть более высокую, чем наблюдается реально в поле ($19.8 \pm 2.3\%$). Повидимому, полного разрыва капиллярной сплошности водного тела на границе смены отложений не происходит, в связи с чем помимо гравитационных сил в действие вступает перемещение подвешенной влаги под действием градиента капиллярного потенциала, хотя и меньшее, чем при подстилании моренным суглинком. Подмешивание песчаных частиц в легкий суглинок пахотного горизонта при обработке, наряду с природными факторами – зоогенной педотурбацией, проникновением корневых систем, движением коллоидных растворов, очевидно, сгладили текстурный контраст при переходе от верхнего гор. А пах к грубодисперсной подпочве.

Для искусственно созданных почвенных конструкций с явным разрывом гидравлической связи при внедрении в исходный почвенный материал грубодисперсных щебнистых слоев, не способных к капиллярным эффектам, подвешивание влаги более полно соответствовало изложенным теоретическим представлениям и расчетам. Так для вариантов 3 и 5 с подстиланием щебня на 10 и 30 см отметке полевые влагоемкости выше лежащего легкосуглинистого гор. А пах после двухдневного оттока влаги составили $30.3 \pm 1.2\%$ и $24.6 \pm 2.0\%$, соответственно. Оценка по ОГХ с секущими $pF = 1.0$ (10 см) и $pF = 1.47$ (30 см) привела к величинам 29.3% и 25.3%, вполне удовлетворяющим доверительным интервалам полевых измерений влагоемкостей (рис. 3, 4).

Такие же результаты были получены при использовании вместо ОГХ (метод центрифугирования), кривых водоудерживающей способности в виде зависимости остаточной после гравитационного стекания влажности монолитов и их высотами (длинами колонок) (рис. 5). После аппроксимации зависимости степенной функцией $W\% = 37.931 \times H^{-0.1172}$ и подстановки в нее значений $H = 10$ и 30 см, получались опять таки близкие к полевым данным величины влагоемкостей 29.0% и 25.5% (рис. 6). Таким образом, рассматриваемые в работе физически обоснованные методы оценки влагоемкости с использованием секущих в виде мощностей единого водного тела под-

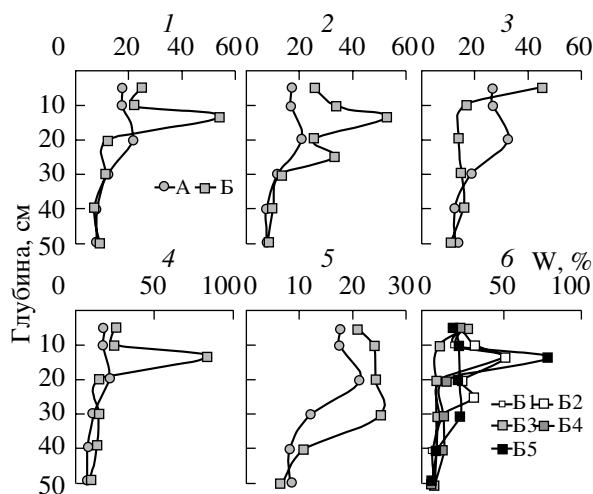


Рис. 4. Влагоемкость дерново-подзолистой неоднородной по механическому составу почвы (А) и слоистых почвенных конструкций (Б). 1–5 – варианты слоистых конструкций (см. рис. 1); 6 – сопоставление влагоемкостей различных вариантов (Б1–Б5).

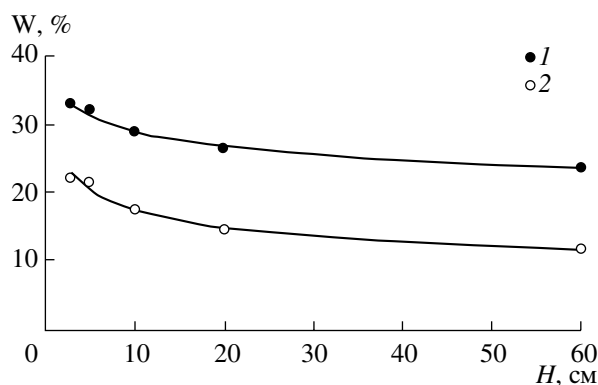


Рис. 5. Зависимость влажности дерново-подзолистой почвы от высоты монолитов и уравнения ее нелинейной аппроксимации. Обозначения: 1 – легкосуглинистый гор. А пах, $y = 29.545x^{-0.2287}$, $R^2 = 0.98$; 2 – песчаный гор. В, $y = 37.931x^{-0.1172}$, $R^2 = 0.98$.

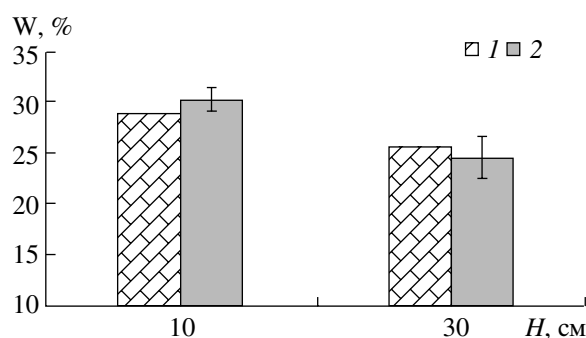


Рис. 6. Сравнение реальных и расчетных величин НВ (остаточной после стекания влажности) в слоистых почвенных конструкциях. Обозначения: 1 – расчетные, 2 – реальные величины (полевой эксперимент).

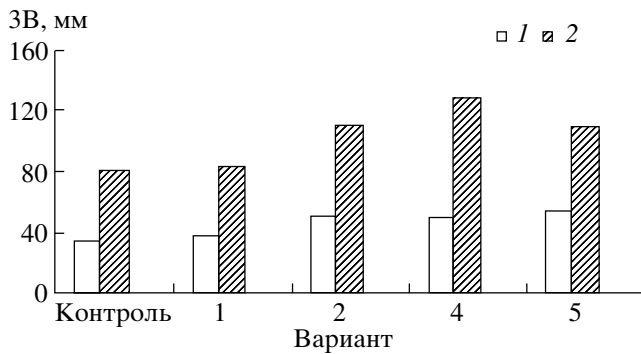


Рис. 7. Запасы влаги при НВ в дерново-подзолистой почве (контроль) и в слоистых почвенных конструкциях. Слой, см: 1 – 0–20, 2 – 0–50.

вешенной влаги дают хорошие результаты как для относительно гомогенных (классических), так и для неоднородных по гранулометрическому составу (слоистых) почвенных объектов. Последнее, повторяем, могут целенаправленно создаваться человеком для оптимизации водоудерживающей способности и аккумуляции влаги в условиях ее дефицита и потенциального вторичного засоления (загрязнения) [10, 19].

Как видно из анализа водоудерживающей способности почвенных конструкций, внедрение слоев грубодисперсного материала (щебня) позволяет “подвесить” влагу в гор. А пах в количествах существенно превышающих таковые для исходной почвы. Так для слоя 0–10 см влагоемкость гор. А пах увеличивается на 12.4 весовых процента (30.3 вместо 17.9%). При заглублении экрана на 30 см, влагоемкость закономерно уменьшается, но все равно остается выше контроля практически на 5% (24.6 вместо 19.8%). Физический смысл происходящего – недостаточная мощность единого (гидравлически связанного) водного тела и, соответственно, его низкое гравитационное давление, недостаточное для преодоления капиллярных сил, действующих на воду со стороны твердой фазы. Таким образом, внедрение грубодисперсного экрана на определенную глубину в слой почвы вместо дренажа может приводить к обратному эффекту – аккумуляции влаги, что следует учитывать в технологиях почвенного конструирования.

В частности, известные рецепты для дренирования спортивных площадок (газонов), поверхностных и подземных коммуникаций с использованием щебнистых экранов должны обеспечиваться точным инженерным расчетом глубины залегания грубодисперсного материала с учетом водоудерживающей способности (ОГХ) вышележащих почвенных материалов. Откладывая в качестве секущей на ОГХ величину pF , соответствующую этой глубине, можно прогнозировать влагоемкость верхнего слоя, то есть его наиболее

вероятное состояние после сильного увлажнения с поверхности и оттока гравитационной влаги. Нетрудно убедиться, что лишь для легких почв с низкой водоудерживающей способностью глубина сплошного дренажа (грубодисперсного экрана) порядка 20–30 см ($pF = 1.3–1.5$) будет достаточна для гравитационного оттока влаги и осушения вышележащей толщи до технологически приемлемых величин 10–15% влажности. Для почв и композитов тяжелого гранулометрического состава, органических материалов с повышенной водоудерживающей способностью, такой глубины будет явно недостаточно. Вместо ожидаемого дренажа в них будет аккумулироваться подвешенная влага в количестве, приближающемся к полной влагоемкости (состоянию насыщения).

Способ аккумуляции влаги в почвах внедрением грубодисперсных экранов был предложен нами при разработке технологий устойчивого поливного земледелия проекта “Arid Grow” для стран Персидского залива [10, 19]. Одновременно этот технологический прием позволяет избавиться от проблемы вторичного засоления и техногенного загрязнения корнеобитаемой толщи, поскольку, разрывая капиллярную связь, грубодисперсный экран устраняет возможность подъема влаги с растворенными вредными веществами из нижележащих горизонтов в поверхностные “рабочие” слои, где сосредотачиваются корни растений. Для повышения плодородия и водоудерживающей способности таких слоев можно дополнительно вводить в них органогенные почвоулучшители на основе природных (торф, сапропель, компосты, гуматы) или синтетических (сильнонабухающие полимерные гидрогели) биополимеров.

Как видно из результатов полевого эксперимента с аналогичными конструкциями в условиях УОПЭЦ “Чашниково”, внедрение в почву 1–2 слоев торфа резко (на 20–30 весовых процента) повышает влагоемкость исходной толщи (рис. 4). Максимальная влагоемкость (порядка 80%) отмечается для варианта конструкции с комбинацией торфяного слоя и грубодисперсного экрана, рекомендованного нами ранее в качестве базового для озеленения муниципальных и частных объектов особой значимости в странах Персидского залива [10].

Поскольку весовая влажность (влагоемкость) не дает полной информации о реальном количестве доступной для растений влаги в почвах, особенно с контрастными по текстуре и плотности слоями (материалами), дополнительно для исследуемых вариантов почвенных конструкций были рассчитаны запасы влаги (рис. 7). Как видно из диаграмм, наибольший влагоаккумулятивный эффект достигается в вариантах конструкций 2, 4 и 5, где запасы влаги, по сравнению с контролем возрастают в 1.4–1.6 раза. Причем внедрение гру-

бодисперсного экрана (щебня) на глубину 30 см (вариант 5) даже несколько превышает по результатам, казалось бы значительно более “емкий” вариант с двумя слоями торфа – органогенного влагопоглотителя. Здесь следует, конечно, учесть, что торф переслаивался песчаным материалом, уступающим по водоудерживающей способности легкому суглинку пахотного горизонта. Поэтому даже два слоя торфяного влагопоглотителя не смогли в сумме превзойти водоудерживание легкого суглинки мощностью 30 см. Последний, будучи отрезан щебнистым экраном от капиллярного рассасывания влаги вглубь почвы, продемонстрировал наибольшую водоудерживающую способность по сравнению с исходной (контрольной) почвой, где такой же слой (А пах) мощностью 30 см залегал на флювиогляциальном песке, по-видимому, обеспечивающем небольшой капиллярный отток. Таким образом, при наличии исходно удовлетворительной способности почвы к водоудерживанию (легкий суглинок), ее можно повысить внедрением грубодисперсного материала на расчетную глубину без использования дополнительных почвомодификаторов – поглотителей влаги. Грубодисперсный экран создаст надежную защиту от вторичного засоления, а при периодических промывках вышележащей толщи, позволит в кратчайшие сроки избавиться от вредных растворимых веществ в корнеобитаемом слое [10, 19]. Для легких почв с исходно низким водоудерживанием, помимо экрана требуется внесение влагопоглощающих органогенных материалов. Здесь можно порекомендовать варианты 2–3-слойных конструкций с расположением в нижней части щебня, а в верхней – торфяных, торфо-сапропелевых почвомодификаторов или полимерных гидрогелей [10, 19]. При этом слоистый способ закладки материалов предпочтительнее их перемешивания, так как позволяет наряду с увеличением водоудерживающей способности снизить фильтрацию влаги. В частности, заливочные эксперименты, проведенные на исследуемых в работе вариантах слоистых конструкций, показали, что скорости впитывания влаги и результирующие коэффициенты фильтрации снижаются в 2–3 раза по сравнению с таковыми в исходной почве.

В заключение стоит отметить, что рассмотренные выше закономерности и технологические способы подвешивания влаги будут действовать лишь в определенных условиях. Без организации достаточно регулярных поливов, отсеженная щебнистым экраном толща может быстро иссушаться как с поверхности, так и изнутри. Этому будет способствовать отсутствие капиллярного подтока из глубинных горизонтов. И если корневые системы растений не успеют при развитии преодолеть щебнистый экран, первая же засуха погубит зеленые насаждения на таких конструк-

циях, причем с большей вероятностью, чем на обычных однородных почвах. Еще одно очевидное условие – достаточно тщательное выравнивание слоев и территории в целом при подготовке конструкции. В противном случае влага может перемещаться в латеральном направлении и, собираясь в пониженных элементах участка, стекать в щебнистый экран. В целом, повторяем, эффективность слоистых конструкций с подвешиванием капиллярно-гравитационной влаги во многом зависит от организации системы поливного земледелия. Как показывает наш экспериментальный опыт в странах Персидского залива (О.А.Э., Катар, Бахрейн), правильно спроектированные слоистые конструкции позволяют экономить не менее 50% поливной влаги, минимизируя ее непродуктивные потери, при надежной защите земель от вторичного засоления и техногенного загрязнения [10, 19].

ВЫВОДЫ

1. Гравитационный фактор оказывает существенное влияние на формирование явления влагоемкости почв наряду с капиллярными силами водоудерживания.

2. Если мощность единого водного тела подвешенной влаги больше высоты капиллярного поднятия, после свободного гравитационного оттока влаги реализуется состояние наименьшей влагоемкости. Для его физически обоснованной оценки по ОГХ необходимо в качестве секущей использовать значение давления почвенной влаги численно равное высоте капиллярного поднятия в см водного столба.

3. Если мощность единого водного тела подвешенной или капиллярно-подпертой влаги в почве меньше высоты капиллярного поднятия по причине текстурной неоднородности, слоистости или близкого залегания грунтовых вод, влагоемкость такого слоя (толщи почвы) будет закономерно выше чем НВ (КВ) в аналогичной гомогенной и автоморфной почве. Для ее оценки по ОГХ следует отложить в качестве секущей мощность соответствующего слоя с подвешенной влагой или расстояние от уровня грунтовых вод, определяющие максимальное гравитационное давление (потенциал) влаги.

4. Зависимость влагоемкости от гравитационного фактора (мощности единого водного тела) должна учитываться в методиках оценки НВ и КВ методом почвенных колонок. В коротких колонках будут закономерно получаться завышенные величины влагоемкости, приближающиеся к ПВ.

5. Исследованная зависимость должна учитываться также в технологиях дренажа почв. Введение грубодисперсных слоев с разрывом капиллярной сплошности на небольшие глубины под

корнеобитаемый слой вместо “сплошного дренажа” может приводить к обратному эффекту аккумуляции влаги.

6. Вместе с тем этот эффект позволяет целенаправленно создавать влагоаккумулятивные слоистые почвенные конструкции с надежной защитой корнеобитаемого слоя от вторичного засоления и загрязнения водорастворимыми поллютантами.

7. Метод почвенных колонок со свободным гравитационным оттоком влаги и метод равновесного центрифугирования (гравитация, усиленная центробежным полем) дают одинаковые результаты в оценке водоудерживающей способности в диапазоне влагоемкостей от НВ до ПВ.

Авторы сердечно благодарят инженера кафедры физики и мелиорации почв А.В. Бобкова, а также студентов III курса Факультета почвоведения МГУ, оказавших помощь при закладке почвенных конструкций и проведении заливочных экспериментов в процессе летних полевых практик по физике почв в УОПЭЦ МГУ “Чашниково” в 2004–2007 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.Ф. Методы исследования физических свойств почвы. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
2. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во МГУ, 1984. 204 с.
3. Воронин А.Д. Энергетическая концепция физического состояния почв // Почвоведение. 1990. № 5. С. 7–19.
4. Лебедев А.Ф. Почвенные и грунтовые воды. М.: Изд-во АН СССР, 1936. 316 с.
5. Паракишин Ю.П., Паракишина Э.М., Терентьева М.Ю. К оценке почв по гидрологическому режиму // Фундаментальные физические исследования в почвоведении и мелиорации. М.: Изд-во МГУ, 2003. С. 302–304.
6. Паулюкявичюс Г.Б. Гидрологические и гидрохимические свойства холмистых лесных ландшафтов. Вильнюс: ГМИЗ, 1972. 460 с.
7. Роде А.А. Водные свойства почв и грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 132 с.
8. Роде А.А. Почвенная влага. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 456 с.
9. Смагин А.В. Почвенно-гидрологические константы: физический смысл и количественная оценка на базе равновесного центрифугирования // Роль почв в биосфере. Тр. Ин-та экологического почвоведения МГУ. 2005. Вып. 6. С. 37–63.
10. Смагин А.В. Рукотворные почвы аридных регионов // Наука в России. 2006. № 6. С. 53–58.
11. Смагин А.В. Теория и методы оценки физического состояния почв // Почвоведение. 2003. № 3. С. 328–341.
12. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Глаголев М.В., Кириченко А.В. Новые инструментальные методы и портативные электронные средства контроля экологического состояния почв и сопредельных сред // Экол. вестн. сев. Кавказа. 2006. Т. 2. № 1. С. 5–17.
13. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Мизури Маауиа Бен-Али. Определение основной гидрофизической характеристики почв методом центрифугирования // Почвоведение. 1998. № 11. С. 1362–1370.
14. Судницын И.И. Экологическая гидрофизика почв. М.: Изд-во МГУ, 1995. 80 с.
15. Хайдапова Д.Д. Влияние температуры на десорбцию влаги в светло-каштановой тяжелосуглинистой почве // Тез. докл. конф. стран содружества “Физика почв и проблемы экологии”. Пушкино, 1992. С. 112.
16. Харченко С.И. Управление водным режимом на мелиорируемых землях в нечерноземной зоне (гидрологические аспекты). Л.: Гидрометеиздат, 1987. 238 с.
17. Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
18. Philipp J.R. Fifty years progress in soil physics // Geoderma. 1974. V. 12. P. 265–280.
19. Smagin A.V., Shoba S.A., Kinjaev R.R. et al. Arid Grow- Ideal Soil System. M.-Manama: MSU-press, 2005. 144 p.

ГРАВИТАЦИОННЫЙ ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ НАИМЕНЬШЕЙ И КАПИЛЛЯРНОЙ ВЛАГОЕМКОСТИ В ПОЧВАХ И СЛОИСТЫХ ПОЧВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ