

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОЛОГИИ ПОЧВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ И ПРОГНОЗНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Методами математических и лабораторных физических моделей проведено комплексное исследование движение влаги в почвенных конструкциях. Обнаружено влияние строения почвенных конструкций и начальных условий увлажнения на перенос влаги при малонапорной фильтрации. Осуществлен прогноз динамики влажности почвенных конструкций после окончания фильтрации методом математического моделирования с использованием педотрансферных функций в программе Hydrus. Статистический анализ установил достоверность различий результатов, полученных методом физического и математического моделирования, но при сохранении порядка величин и общих закономерностей.

Ключевые слова: геотехнологии, гидрология почв, почвенные конструкции, математические модели, коэффициент фильтрации, педотрансферные функции

В настоящее время стремительно возрастает задача создания почвенных конструкций различного назначения, например: 1) спортивных полей (поля для футбола, гольфа и др.); 2) зеленых автостоянок в городе; 3) зеленых крыш (последние две распространены в европейских государствах); 4) травяного покрова для скверов и парков; 5) ландшафтных конструкций в парково-усадебных зонах и чертах города и многие другие [1], [2], [4], [5]. При этом конструкции должны стать оптимальной средой для роста и развития растений. В свою очередь, слоистые почвенные конструкции являются эффективным средством регуляции гидротермического режима корнеобитаемой толщи, поэтому особое внимание уделяется изучению их физико-химических свойств [4], [7]. Однако вопросы создания и строения почвенных конструкций, влияния начальных условий увлажнения на интенсивность перемещения влаги остаются недостаточно изученными, так как процесс экспериментального исследования антропогенных почвенных тел является весьма трудоемким. На современном этапе развития почвенного конструирования применяются два подхода [6], [9]: стационарные опыты по разработке специализированных конструкций и использование метода математического моделирования, который позволяет имитировать процессы движения тепла, влаги и растворенных веществ при различных климатических условиях и режимах эксплуатации. Таким образом, возникает актуальная необходимость комплексного использования методов физического и математического моделирования, для детального исследования функционирования антропогенно-сформированных почв.

Целью данной работы явилось изучение гидрологии модельных почвенных конструкций в лабораторных физических и прогнозных математических моделях. В задачи исследования входило 1) исследовать водоудерживание и динамику фильтрации влаги в отдельных почвенных слоях и в многослойных почвенных конструкциях в физических модельных колоночных экспериментах; 2) изучить влияние начальных условий увлажнения почвы на перенос влаги при малонапорной фильтрации; 3) оценить влияние строения почвенных конструкций на передвижение влаги; 4) провести прогноз динамики влажности почвенных конструкций разного строения методом математического моделирования с использованием педотрансферных функций в программе Hydrus.

Объектами исследования явились 4 образца различных горизонтов почв: горизонт А и горизонт В, отобранные из суглинистой окультуренной дерново-подзолистой почвы, расположенной на территории почвенного стационара МГУ, с глубин 0–20 см и 80–100 см, соответственно, низинный торф (степень разложения – более 30%; рНКС1 – 5,5–6,5; гумифицированный, разложенный, биологически-активный, измельченный, без добавления минеральных компонентов), песок (отмытый карьерный песок, имеющийся в свободной продаже для целей городского озеленения). В результате смешивания в определенных пропорциях вышеперечисленных горизонтов были получены еще несколько образцов на каждом этапе лабораторно-фильтрационного эксперимента.

Методы исследования

Физические свойства исследуемых образцов почвы определены традиционными методами физики почв [3], [8].

Для исследования водоудерживающей способности и характера передвижения влаги были проведены лабораторные исследования, схема которых является традиционной для получения фильтрационных характеристик [10] с некоторыми модификациями в соответствии с поставленными задачами.

Эксперименты проходили в 2 этапа.

На первом этапе (таблица 1) проведено 4 серии фильтрационных колоночных экспериментов при различной начальной влажности. Для каждой серии были созданы пять насыпных колонок: колонка песка, торфа, горизонта В, смешанного горизонта и слоистой колонки, в трехкратной повторности. Смешанный горизонт готовили в пропорциях 4:1:1 горизонт В, песок, торф соответственно. Слоистая колонка представляла собой поочередное залегания слоев: горизонт В, торф, песок, горизонт В в пропорции, аналогичной смешанному образцу.

Был проведен ряд исследований по определению физических и химических свойств исследуемых горизонтов, результаты которых представлены в таблице 1.

Исследованные почвенные горизонты являются весьма контрастными по физическим свойствам (табл. 1). Торф характеризуется наибольшими значениями порозности и содержанием углерода, низким значением плотности твердой фазы. Высокой плотностью твердой фазы и плотности почвы обладают песчаные колонки и слои. Горизонт В характеризуется наибольшим содержанием ила, пахотный горизонт Апах имеет высокую агрегированность по содержанию агрономически ценных агрегатов.

В фильтрационных экспериментах использовали указанные почвенные образцы. Для решения 2-й задачи данной работы – изучить влияние начальных условий увлажнения почвы на перенос влаги при малонапорной фильтрации,

были проведены несколько серий экспериментов (табл. 2). Первая серия экспериментов проводилась в условиях полного насыщения. Первоначально были взяты 5 пластиковых колонок цилиндрической формы высотой 20 см и диаметром 10 см, в которых по периметру на глубинах 3 см, 7,5 см, 10,5 см и 15 см были сделаны по 4 отверстия для последующего отбора почвенных образцов на влажность.

Образец почвы нарушенного сложения помещали в подготовленную колонку таким образом, чтобы верхняя часть колонки оставалась незаполненной на 1–2 см. Почвенные колонки приблизительно за сутки до начала эксперимента ставили на влажный песок для капиллярного насыщения. Затем течение 0,5–1 часа поднимали уровень воды в стакане до уровня почвы в колонке с шагом 1–2 см до тех пор, пока уровень воды переставал снижаться. Эта процедура была необходима для уменьшения количества заземленного воздуха при насыщении образца до полной влагоемкости. Затем на верхнюю границу колонки подавали воду, напор поддерживали равный 1 см, на нижней границе фиксировали поток влаги. После окончания фильтрации, дождавшись полного стекания гравитационной влаги, колонки последовательно срезались для послойного определения влажности.

Вторая серия экспериментов проводилась при начальной влажности почв, соответствующей капиллярной влагоемкости. Были взяты 15 пластиковых колонок цилиндрической формы высотой 12 см и диаметром 4,5 см, которые плотно обвязывались капроновой сеткой, предварительно капиллярно насыщали и исследовали фильтрацию.

Третья серия экспериментов проводилась при начальной влажности почв, близкой к влажности разрыва капиллярной связи. Для этого сначала почву в колонках (количество колонок равно 15) насыщали до капиллярной влагоемкости. Затем подсушивали почвы до значений 0,7 НВ для суглинистых образцов и 0,6 НВ для песчаных. При достижении нужных

Таблица 1. Некоторые физические свойства исследуемых почвенных объектов

Горизонт	ρ_s^* , г/см ³	Сорг**, %	Содержание агрономически ценных агрегатов, %	Коэффициент структурности	Содержание агрегатов >0,25 мм при мокром просеивании, %	Гранулометрический состав: физ. глина, %
Гор. Апах	2,51	1,89	90,1	9,1	15,7	39,4
Гор. В	2,55	0,31	44,5	0,8	11,9	44,6
Песок	2,74	0,01	74,1	2,9	64,8	11,2
Торф	0,97	42,07	–	–	–	–

* – плотность твердой фазы почв, ** – содержание органического вещества почв

значений влажности колонки герметично закрывались на несколько часов для равномерного перераспределения влаги. Дальнейшая последовательность эксперимента была аналогична предыдущей серии.

Четвертая серия экспериментов проводилась с воздушно-сухими образцами, которые находились в колонках, в которые сразу подавали воду.

Дальнейшая последовательность эксперимента сохранялась.

На втором этапе проведено 3 серии экспериментов, в каждой было сформировано по два варианта слоистых почвенных конструкций, высотой 24 см и диаметром 10 см (табл. 2, 2-й этап). Начальная влажность – полная влагоемкость (ПВ).

Результаты и обсуждение. Динамика коэффициента фильтрации (Кф) при различных начальных условиях увлажнения.

Эксперименты на насыпных образцах показали различия в скоростях фильтрации как для отдельных горизонтов, так для моделей почвенных конструкций. Была произведена статистическая обработка результатов для доказательства достоверности этих различий.

Наибольшая скорость фильтрации характерна для торфяного горизонта – 1500 см/сут,

который по классификации Эгельсмана попадает в класс исключительно высоких значений Кф, что свидетельствует о провальном характере передвижения влаги по крупным влагопроводящим порам. Кф не дифференцирован в зависимости от начальной влажности.

Для песчаной колонки достоверных различий в скорости фильтрации между вариантами не выявлено. Коэффициент фильтрации в среднем составляет 1500 см/сут, что относится к исключительно высокому классу Кф по Эгельсману. Для горизонта В характерна четкая дифференциация скоростей фильтрации в зависимости от начальных условий увлажнения. Наибольшие значения Кф принимает при начальной влажности ПВ и НВ – примерно 132 см/сут, несколько снижается при влажности ВРК – 85 см/сут и минимальные значения Кф имеет в воздушно-сухих образцах – 22 см/сут. Такая зависимость связана с появлением значительных объемов заземленного воздуха при уменьшении начальной влажности, а также с вовлечением во влагоперенос тонких пор. Статистический анализ подтвердил достоверность различий значений Кф при изменении начальной влажности. Для смешанного образца также характерно разделение скоростей фильтрации для разных начальных условий увлажнения, но диапазон различий по сравнению с горизонтом В меньше. Наибольшие значения Кф принимает при начальной влажности ПВ и НВ, около 198–195 см/сут, снижается при влажности ВРК – 140 см/сут и принимает минимальные значения в воздушно-сухих образцах – 80 см/сут. Это указывает на увеличение извилистости влагопроводящих путей при уменьшении начальной влажности. Согласно статистическому анализу достоверно различимы не только значения Кф при различной начальной влажности, но и значения Кф в пределах повторностей, что связано с высокой неоднородностью горизонта.

В слоистых колонках также прослеживается зависимость коэффициента фильтрации от начальных условий увлажнения Кф при ПВ и НВ 135 см/сут, при ВРК – 102,1 см/сут, в воздушно-сухих – 66,8 см/сут. Видимо, основное скопление заземленного воздуха происходит на границе слоев. Поэтому столь сильно начальная влажность сказывается именно в слоистых колонках.

Таким образом, в горизонтах, для которых характерна дифференциация пор по

Таблица 2. Варианты строения почвенных конструкций и начальные условия увлажнения

1 этап – Влияние начальных условий увлажнения					
Варианты строения почвенных конструкций					
Торф (10 см)	Песок (10 см)	Горизонт В (10 см)	Смесь: Гор. В, торфа, песка в проп. 4:1:1 (10 см)	Гор. В	3,2 см
				Торф	1,7 см
				Песок	1,7 см
				Гор. В	3,2 см
Варианты начальных условий увлажнения: <i>первая серия – ПВ, вторая серия – НВ, третья серия – ВРК, четвертая серия – Возд-сух</i>					
2 этап – Влияние строения почвенных конструкций					
Варианты с <u>горизонтом А</u> на поверхности (слои указаны по вертикали)					
<i>Первая серия</i>		<i>Вторая серия</i>		<i>Третья серия</i>	
Гор. А	4 см	Гор. А	4 см	Смесь Гор. А, торфа и песка	20 см
Торф	6 см	Смесь торфа и песка	16 см		
Песок	10 см				
Гор. В	4 см	Гор. В	4 см	Гор. В	4 см
Варианты с <u>горизонтом В</u> на поверхности (слои указаны по вертикали)					
<i>Первая серия</i>		<i>Вторая серия</i>		<i>Третья серия</i>	
Гор. В	4 см	Гор. В	4 см	Смесь Гор. В, торфа и песка	20 см
Торф	6 см	Смесь торфа и песка	16 см		
Песок	10 см				
Гор. В	4 см	Гор. В	4 см	Гор. В	4 см

размерам (горизонт В, слоистая почвенная конструкция, смешанный образец), при уменьшении начальной влажности образцов влагопроводящими становятся наиболее тонкие поры, что и приводит к снижению скорости фильтрации, для песка и торфа – крупнопористых горизонтов – эта закономерность не подтверждается.

Изменение коэффициента фильтрации (Кф) слоистых почвенных конструкций в зависимости от расположения слоев. В описанных экспериментах были исследовали фильтрационные свойства модельных почвенных конструкций (почвенных колонок), с разной последовательностью вертикального размещения образцов почвенных горизонтов, а также проведен статистический анализ результатов эксперимента.

Почвенные конструкции, в которых верхнем слоем является горизонт В, характеризуются достоверно меньшими значениями коэффициента фильтрации, чем их аналоги с горизонтом Апах в верхней части колонок, вследствие более низких влагопроводящих свойств минерального горизонта относительно гумусового.

Минимальные значения коэффициента фильтрации почвенных колонок как для вариантов с пахотным горизонтом, так и с горизонтом В на поверхности наблюдались в наиболее дифференцированных слоистых конструкциях. Кф почвы, состоящей из горизонтов В-торф(Т)-песок(П)-В, равен 44,8 см/сут, а значение коэффициента фильтрации слоистой почвы с пахотным горизонтом на поверхности выше – 120 см/сут. По классификации Эгельсмана значения Кф относятся к высокому и очень высокому классам фильтрации соответственно. Различия в гранулометрическом составе и в содержании органического вещества использованных горизонтов приводят к формированию застойных явлений на границе слоев, что ухудшает фильтрационные характеристики почвенных колонок в целом.

Кф в вариантах со смесью трех горизонтов занижен относительно их аналогов со смесью двух горизонтов. Подобная закономерность объясняется увеличением извилистости путей движения гравитационной влаги, а также возникновением локальных условий сосредоточения и временного накопления воды в тупиковых порах на границах горизонтов.

Статистический анализ установил достоверность различий в скорости движения влаги в пределах одного фильтрационного эксперимента с течением времени. Так, для почвенной конструкции В-(Т+П)-В с высокой вероятностью,

можно утверждать, что Кф за первые четыре часа эксперимента, равный 107,5 см/сут, ниже Кф, равного 101,3 см/сут, за вторые четыре часа часы фильтрации. Аналогичные закономерности характерны для всех вариантов конструкций с горизонтом В на поверхности и для наиболее слоистых вариантов с горизонтом А на поверхности. Продолжительность эксперимента для вышеуказанных почвенных конструкций превышала 6 часов, что привело к заиливанию путей миграции влаги и, как следствие, сокращению общего влагопроводящего порового пространства.

Математическое моделирование передвижения влаги в зависимости от строения почвенных конструкций. В качестве базовых характеристик в модель были введены данные гранулометрического анализа и плотности горизонтов для каждого слоя. Условия на границах колонок соответствовали условиям эксперимента. Нижняя граница была лизиметрической. На верхней границе в течении первых 10 часов – задавалось постоянное давление равное 1 см водного слоя. В следующие 5 часов условия были приняты как нулевой поток через верхнюю границу. Для стандартизации моделирования начальная влажность для всех вариантов почвенных конструкций была равна 30%.

Путем статистического анализа экспериментальных и расчетных данных коэффициента фильтрации (Кф) по педотрансферным функциям программы HYDRUS были выявлены достоверные расхождения в абсолютных значениях Кф, но отметим, что порядок величин одинаков (табл.3). Более того, закономерности распределения скоростей фильтрации влаги по различным вариантам аналогичны экспериментальным – наибольший поток через нижнюю границу также свойственен конструкциям со смесью торфа и песка в средней части колонки

Таблица 3. Экспериментальных значений Кф и Кф, рассчитанный по ПТФ в модели HYDRUS

Варианты колонок	Значения Кф по повторностям, см/сут			Расчет. знач. Кф по ПТФ в модели HYDRUS, см/сут
А-(Т+П)-В	229	215	194	120
(А+Т+П)-В	171	165	153	98,4
А-Т-П-В	123	119	117	76,8
В-(Т+П)-В	115	108	105	64,8
(В+Т+П)-В	88	83	83	62,4
В-Т-П-В	48	44	41	38,4

и пахотным горизонтом на поверхности (А-(Т+П)-В) – 120 см/сут (табл. 3) Наиболее слоистые варианты колонок отличались наименьшей скоростью фильтрации – 76,8 см/сут для А-Т-П-В и 38,4 см/сут для В-Т-П-В.

Статистический анализ выявил совпадения в распределении влажности, рассчитанной в модели HYDRUS, с экспериментальными данными для конструкций (А+Т+П)-В и (В+Т+П)-В (рис. 1). Достоверно различались эксперимен-

тальные и расчетные значения для почвенных конструкций со смесью двух горизонтов.

Наибольшая влажность, полученная расчетным методом, характерна для песчано-торфяной смеси, количество удерживаемой влаги несколько возрастает при переходе от верхней границе слоя к нижней. Смесь горизонта В, торфа и песка обладает более высокими водоудерживающими характеристиками, чем ее аналог с использованием горизонта Апах. Влажность пахотного горизонта, рассчитанная в модели HYDRUS достоверно отличается от реальных данных. Несоответствие величин связано с тем, что модель подбирает параметры аппроксимации по так называемым «свойствам-предикторам», в нашем случае их было всего два (гранулометрический состав и плотность почвы). Возможно, увеличение «свойств-предикторов» приведет к более точному оцениванию параметров аппроксимации ОГХ.

Математическое моделирование – новое прогнозное, расчетное направление в почвоведении, которое позволяет производить быстрое и адекватное оценивание гидрологического режима почв по небольшому набору входных параметров. Так, для некоторых повторностей согласно проведенному статистическому анализу получено достоверное подтверждение совпадений экспериментальных и расчетных данных. Поэтому при создании искусственных почвенных ландшафтов прогнозирование их фильтрационных характеристик весьма удобно на первом этапе производить конструирование с использованием именно малозатратных расчетных методов.

Выводы

1. Исследованные почвенные образцы имеют отчетливые различия в водоудерживающих и водопроводящих характеристиках, что нашло отражение в гидрофизических свойствах смешанных и слоистых почвенных конструкций. Песчаный горизонт отличается наименьшей водоудерживающей способностью, торф характеризуется наибольшей скоростью фильтрации. Коэффициент фильтрации минимален в горизонте В. В слоистых почвенных конструкциях наблюдается четкая дифференциация по значениям влажности после окончания фильтрации, связанная с различной водоудерживающей способностью составляющих их горизонтов.

2. Коэффициент фильтрации горизонта В и в слоистой и смешанной конструкциях зависит от начальных условий увлажнения: умень-

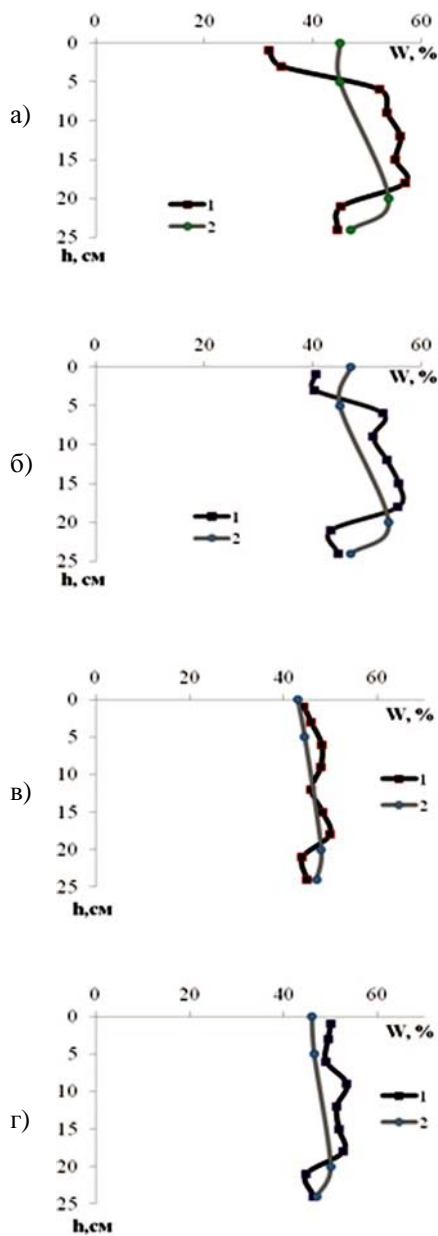


Рисунок 1. Распределения влажности, рассчитанные в модели HYDRUS (2), экспериментальные данные (средние значения) (1) для конструкций: а) А-(Т+П)-В; б) В-(Т+П)-В; в) (А+Т+П)-В г) (В+Т+П)-В

шение начальной влажности почв ведет к его снижению за счет увеличения объемов заземленного воздуха, сокращающих количество влагопроводящих путей. Для песка и торфа различий между вариантами с разной влажностью в скорости массопереноса не выявлено.

3. Увеличение количества слоев ведет к снижению скорости переноса влаги за счет увеличения извилистости порового пространства при переходе от одного слоя к другому. Слоистые почвенные конструкции, в которых верхнем слое является горизонт В, характеризуются достоверно меньшими значениями коэффициента фильтрации, чем их аналоги с горизонтом А, вследствие его более низких влагопроводящих свойств.

4. Скорость потока влаги через нижнюю границу почвенных колонок и послойное распределение в них влажности через 5 часов после окончания фильтрации, рассчитанные по педотрансферным функциям в модели Huidrus, достоверно отличались от экспериментальных данных, но порядок величин сохранялся. Модель в наибольшей степени занизила скорости потока для колонок с большим количеством органических горизонтов, что указывает на необходимость увеличения предикторов в подобных конструкциях. Применение расчетного метода оценки гидрологического режима почвенных конструкций остается перспективным в связи с быстротой получения выходных данных.

12.04.2014

Список литературы:

1. Андроханов В.А., Овсянникова С.В., Курачев В.М. Техноземы: свойства, режимы, функционирование / Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН. – 2000. – 200 с.
2. Бурыкин А.М., Засорина Э.В. Некоторые закономерности гумусоаккумуляции и гумусообразования в молодых почвах техногенных экосистем КМА / Тез. докл. VIII Всесоюз. съезда почвоведов. Новосибирск. – 1989. – Т. 1. – С. 184–185.
3. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.Я. Методы исследования физических свойств почв / М.: Агропромиздат, 1986. – 416 с.
4. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Функции почв в биосфере и экосистемах: Экологическое значение почв / М.: Наука, 1990. – 260 с.
5. Курбатова А.С., Башкин В.Н., Смагин А.В., Баранникова Ю.А., Савельева В.А., Степанов А.Л., Решетина Т.В., и др. Экологические функции городских почв / М.: Маджента, 2004. – 228 с.
6. Смагин А.В. Теория и практика конструирования почв / М.: Изд-во Московского университета, 2012. – 542 с.
7. Умарова А.Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв / Диссер. на соиск. ученой степ, д.б.н. М.: МГУ. – 2008. – 355 с.
8. Шейн Е.В., Архангельская Т.А., Гончаров В.М., Губер А.К., Початкова Т.А., Сидорова М.А., Смагин А.В., Умарова А.Б. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв / М.: МГУ, 2001. – 200 с.
9. Шейн Е.В., Карпачевский Л.О. Толковый словарь по физике почв / М.: ГЕОС, 2003. – 124 с.
10. Шейн Е.В., Карпачевский Л.О. Теории и методы физики почв / М.: Издательство «Гриф и К», 2007. – 616 с.

Сведения об авторах:

Шейн Евгений Викторович, заведующий кафедрой физики и мелиорации почв
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, доктор биологических наук,
профессор, e-mail: evgeny.shein@gmail.com

Торбик Екатерина Алексеевна, аспирант кафедры физики и мелиорации почв
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, e-mail: kateacles21@mail.ru

117449, г. Москва, ул. Шверника 19, к. 2, тел. (495)9393684