$p^{(-1)} = k_{-1} m v^{-1}$	$-i\hbar \frac{\partial^3 \Theta}{\partial x^3} = m v^{-1} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2}$
$p^{(-2)} = k_{-2} m v^{-2}$	$i\hbar \frac{\partial^4 \Theta}{\partial x^4} = m v^{-2} \frac{\partial^3 \Theta}{\partial t^3}$
$p^{(-3)} = k_{-3} m v^{-3}$	$-i\hbar \frac{\partial^5 \Theta}{\partial x^5} = m v^{-3} \frac{\partial^4 \Theta}{\partial t^4}$
$p^{(-n)} = k_{-n} m v^{-n}$	$(-1)^n i\hbar \frac{\partial^{n+2} \Theta}{\partial x^{n+2}} = m v^{-n} \frac{\partial^{n+1} \Theta}{\partial t^{n+1}}$ при $n \geq -1$

Вывод

Таким образом, ДУФАВФ являются обоснованием не только количества движения и кинетической энергии, но и мер движения других рангов.

Список литературы

1 Попов И. П. Построение модели квазиэлектромагнитного поля. Часть 1 // Вестник Курганского государственного университета. Естественные науки. 2015. Вып. 8. № 4(38). С. 112-115.

2 Попов И. П. Поверхностные градиент, дивергенция и ротор // Вестник Псковского государственного университета. Естественные и физико-математические науки. 2014. Вып. 5. С. 159-172.

Список литературы

1 Попов И. П. Механические аналоги реактивной мощности // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2015. № 3(30). С. 37-39.

2 Попов И. П. Комплексная мощность механических колебательных процессов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2016. № 1. С. 32-36.

3 Попов И. П. Механическая мощность при колебательных технологических операциях // Вестник Псковского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 2. С. 15-18.

4 I.P. Popov. Mathematical modeling of the formal analogy wave functions // Applied mathematics and control sciences. 2016. № 1. P. 9-14.

5 Попов И. П. Противоречия копускулярно-волнового обобщения // Известия Уфимского научного центра РАН. 2016. № 1. С. 32-34.

6 Попов И. П. Формальное волновое преобразование уравнения прямолинейного равномерного движения инертного тела // Вестник Удмуртского университета. Физика. Химия. 2014. Вып. 1. С. 58-61.

7 Попов И. П. Формальный аналог волновой функции // Вестник Курганского государственного университета. Естественные науки. 2015. Вып. 8. № 4(38). С. 116–118.

8 Попов И. П. Формальный подход к проблеме квантово-волнового дуализма // Зауральский научный вестник. 2014. № 2(6). С. 48, 49.

9 Попов И. П. Свободные механические гармонические колебания, обусловленные преобразованием кинетической энергии в кинетическую // Вестник Курганского государственного университета. Естественные науки. 2013. Вып. 6. № 3(30). С. 76, 77.

10 Попов И. П. Свободные механические гармонические колебания в системах с кривошипно-кулисными механизмами // Вестник Курганского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 7. №2(24). С. 14-16.

11 Попов И. П., Попов Д. П., Кубарева С. Ю. Самонейтрализация реакции системы из трех массивных частей на внешние периодические воздействия // Высокие технологии в машиностроении: Материалы Международной научно-технической конференции. Курган. КГУ. 2012. С. 209-211.

12 Попов И. П., Попов Д. П., Кубарева С. Ю. Об одном способе нейтрализации реакции массивных деталей и узлов на внешние периодические воздействия // Вестник Курганской ГСХА. 2012. № 2 (2). С. 60-62.

13 I. P. Popov. Oscillatory systems with similar elements // Engineering physics. 2013. № 3. P. 52-56.

14 Попов И. П., Чумаков В. Г., Чикун А. В. Самонейтрализация механических инертных реактансов основной гармоники в решетных станах // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 4(28). С. 170-174.

УДК 631.43

А.В. Человечкова, Е.Н. Полякова
Курганский государственный университет

СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО НАХОЖДЕНИЮ И РАСЧЕТУ ЗНАЧЕНИЙ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ФРАКЦИЙ ПОЧВЫ ПО ЗАДАННЫМ ВЛАЖНОСТЯМ

Аннотация. Основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) почв является одной из наиболее информативных, широко используемых функций как в научных почвенно-физических исследованиях, так и в практических задачах. С целью уменьшения объема работ при описании состояния воды в почве, а также сокращения времени их экспериментального проведения все чаще осуществляются попытки найти связи ОГХ с почвенными гидрологическими, физико-механическими константами, а также с традиционными, широко используемыми свойствами (гранулометрический, агрегатный составы, содержание органического вещества, плотность и др.).

Ключевые слова: почвенная влага, термодинамический потенциал, основная гидрофизическая характеристика, влажность, поровое пространство почвы, давление влаги, плотность, пористость.

A. V. Chelovechkova
E. N. Polyakova
Kurgan state university

CREATION OF SOFTWARE FOR SOLVING PROBLEMS OF FINDING AND CALCULATING VALUES OF THE GRANULOMETRIC FRACTIONS OF THE COMPONENTS OF THE SOIL AT THE SPECIFIED MOISTURE

Annotation. Basic hydrophysical characteristics (BHC) of soils are the most informative, widely used function both in scientific soil-physical researches, and in practical tasks. The efforts to find connections of BHC with soil hydrological, physical and mechanical constants and also with traditional, widely used features (granulometric, aggregate structure, organic matter content, density and others) are often used in the purpose to decrease quantity of work during description of water condition in soil and also cutting time of their experimental handling.

Keywords: soil moisture, thermodynamic potential, main hydrophysical characteristic, moisture content, pore space of soil, pressure, moisture, density, porosity.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется научно обоснованному развитию экологически благоприятной окружающей среды. В отношении почвенного покрова – это создание специальных парков, озеленение территорий, проектирование и создание почвенных конструкций для газонов, спортивных площадок. Для научно обоснованного создания почвенных конструкций необходимо знать водно-физические свойства материала, законы передвижения влаги, закономерности формирования почвенных слоев.

Основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) почв является одной из наиболее информативных, широко используемых функций как в научных почвенно-физических исследованиях, так и в практических задачах. В последние десятилетия гидрофизика почв характеризуется развитием количественных методов исследования свойств почвенной влаги. Основой этих методов является термодинамический подход описания состояния воды в почве. Этому посвящены работы А.Д. Воронина, А.М. Глобуса, Н.А. Муромцева, А.А. Роде, И.И. Судницина, L.A. Richardsa, W.R. Gardnera и многих других. С целью уменьшения объема экспериментальных работ все чаще используется связь ОГХ с почвенными гидрологическими, физико-механическими константами, а также с традиционными, широко используемыми свойствами (гранулометрический, агрегатный составы, содержание органического вещества, плотность и др.). Такая задача актуальна при исследовании больших территорий с разными почвами [1].

Цель и методика исследований

Целью исследования стало построение и изучение ОГХ инструментальным и расчетным методами, использование полученных кривых водоудерживающей способности для характеристики физико-механических свойств почв и возможности создания базы данных ОГХ различных почв, а так же разработка программного обеспечения для упрощения проведения расчетов и построения основной гидрофизической характеристики почв, которая наглядно позволяет наблюдать и моделировать протекание изучаемых процессов.

На первоначальном этапе работы для разработки программного комплекса в качестве объекта исследования был выбран чернозем выщелоченный слабогумусированный среднемощный легкосуглинистый. При отборе почвенных образцов в полевых условиях были определены генетические горизонты, их мощность в результате заложения почвенного разреза. Из каждого горизонта в четырехкратной повторности буром Качинского были отобраны образцы на плотность до глубины 100 см с интервалом 10 см. А также дополнительно были отобраны образцы для определения основных агрономических свойств.

В результате лабораторных исследований были определены гранулометрический состав по принципу метода пипетки в варианте Качинского, основанного на зависимости, существующей между скоростями падения частиц и их размерами, плотность твердой фазы (методом пикнометров), пористость (расчетным методом), содержание гумуса (методом Тюрина в модификации Симакова) (таблица 1).

Таблица 1 – Гранулометрический состав и физические свойства чернозема выщелоченного

Горизонт	Глубина, см	Гранулометрический состав		Плотность твердой фазы, г/см^3	Плотность, г/см^3	Общая пористость, %
		<0,01,%	<0,001,%			
А	0-10	22,64	13,42	2,63	1,11	57,8
	10-20	23,31	12,48	2,59	1,33	48,7
	20-30	19,91	11,19	2,63	1,39	47,1
АВ	30-40	26,98	17,80	2,63	1,13	57,0
В	40-50	34,25	21,71	2,66	1,39	47,7
	50-60	26,17	20,14	2,70	1,21	55,2
	60-70	30,05	12,61	2,70	1,26	53,3
	70-80	31,70	22,85	2,70	1,62	40,0
ВС	80-90	13,67	11,32	2,70	1,42	47,4
	90-100	23,58	11,74	2,90	1,50	48,3

Содержание физической глины (фракции <0,01) на исследуемом участке колеблется от 19,91 до 31,7%. Верхний гумусовый горизонт (слой 0-40 см) содержит в среднем 23,2% физической глины. По шкале Качинского данный слой

можно оценить как легкосуглинистый. Вниз по профилю содержание фракции физической глины слегка увеличивается до 31,7%. В пахотном слое чернозема плотность твердой фазы составляет 2,62 г/см^3, с незначительным увеличением в подпахотном горизонте – до 2,67 г/см^3. Такая плотность твердой фазы характерна для малогумусных почв.

Плотность почвы в верхней части профиля имеет наименьшее значение – 1,11 г/см^3, вследствие более высокого содержания органического вещества. При оценке плотности по Н.А. Качинскому данная величина соответствует культурной свежевспаханной пашне. Средняя плотность гумусового слоя (0-40 см) составила 1,24 г/см^3, что позволяет оценить пашню как уплотненную.

В соответствии с показателями плотности профиля и плотности твердой фазы почвы находится величина общей пористости – суммарного объема всех пор в единице объема почвы. Ее уровень изменяется от 40,0 % в слое 70-80 см, до 57,8 % в слое 0-10см. Среднее значение пористости в пахотном слое 0-30 см составило 51,2 %. По шкале Н.А. Качинского, такая пористость для пахотного слоя является удовлетворительной.

По определению содержания общего гумуса установили, что исследуемый участок относится к слабогумусированным почвам с содержанием гумуса в верхнем 30-сантиметровом слое 3,6%. С увеличением глубины, содержание органического вещества уменьшается до 2% в слое 30-40см.

Основные физические свойства почвы (гранулометрический состав, плотность, пористость), которые были определены в работе, использовались для расчетного метода определения ОГХ. Достоинством этого метода является использование традиционной для отечественных почвоведов информации. В его основу положена концепция развитая А.Д. Ворониным [2], согласно которой каждой почвенно-гидрологической константе (ПГК) на кривой водоудерживания соответствует определенное давление влаги. Следовательно, задача восстановления ОГХ свелась к расчету почвенно-гидрологических констант из данных гранулометрического состава почвы. На обширном экспериментальном материале установлено, что значения почвенно-гидрологических констант связаны с плотностью (ρ), пористостью (ε) почвы и содержанием фракций гранулометрического состава (ω), регрессионными уравнениями (1):

$$\begin{aligned}
&\varepsilon = 0{,}805 + 0{,}183\omega_1 + 0{,}285\omega_2 + 0{,}057\omega_5 - 0{,}266\rho;\\
&W_{Ò} = 0{,}082 + 1{,}163\omega_2 - 0{,}287\omega_3 - 0{,}107\omega_6 + 0{,}312\varepsilon;\\
&W_{ÏÀ} = 0{,}5 + 0{,}085\omega_1 + 0{,}514\omega_2 + 0{,}142\omega_4 - 0{,}145\omega_6;\\
&W_{ÏÏÀ} = 0{,}053 + 0{,}941\omega_2 - 0{,}139\omega_3 - 0{,}031\omega_6 + 0{,}165\varepsilon; \quad (1)\\
&W_{ÏÀ} = -0{,}009 + 0{,}198\omega_1 - 0{,}059\omega_2 + 0{,}0\ \omega_4 + 0{,}078\omega_6;
\end{aligned}$$

где ω_1, ω_2 … ω_6 – фракции гранулометрического состава почвы от ила до крупного песка по классификации Н.А. Качинского [3].

В представленных расчетных уравнениях не учитывается содержание органического углерода и почвенный профиль не дифференцируется по глубине. Но этот недостаток компенсируется учетом значений плотности и пористости почвы, во многом зависящих от генетических особенностей почвенных горизонтов [3].

Помимо этого следует отметить, что современные исследования почвообразования, изучение свойств почв и анализ их функционирования показывают, что объективная интерпретация полученных при этом результатов, возможность оптимизации ряда режимов почв требует использования одной из стабильной почвенной характеристики – удельной поверхности почв. Несмотря на очевидность факта – тесной связи множества свойств почв с качественными и количественными характеристиками удельной поверхности почв, ее изучение и разработка методов ее определения до настоящего времени не получали должного внимания.

В работах Н.А. Качинского (1965 г.), А.Д. Воронина (1986 г) данная характеристика почвы определяется как «общая площадь поверхности почвенных частиц отнесенная, к единице массы почвы или ее объема».

Удельную поверхность в почвоведении принято разделять на общую, внешнюю и внутреннюю. Однако формальных, логически и научно обоснованных критериев подразделения на внешнюю и внутреннюю разновидности нет. Предлагаемое разделение поверхности осуществляется на основе методов ее определения. Внешняя поверхность определяется методом низкотемпературной адсорбции азота по принципу БЭТ, а общая поверхность методом БЭТ, адсорбцией паров воды. Таким образом, молекулы азота как более крупные (d = 3,72^{0}А не адсорбируется на поверхностях куда проникают молекулы H_2O (d = 2,5^{0}А). Считается, что внешняя удельная поверхность является более активной в «жизни» почвы.

Удельная поверхность почвы как почвенная характеристика не рассматривается строго двумерной границей раздела фаз, а предполагается трехмерной, «толщиной» в несколько ангстрем, которая отражает специфику поверхности твердой фазы (минералогическое и химическое строение), что обуславливает ее неоднородность. Неоднородность поверхности, как установлено специальными, научными исследованиями, выражается наличием активных центров (кластеров), функционирование которых и определяет ее влияние на свойства почвы. Роль удельной поверхности в функционировании и свойствах почв многогранна и до конца не исследована.

К настоящему времени ни почвоведение, ни коллоидная химия не располагают достаточно точными методами определения удельной поверхности дисперсных систем. Во всех методах, применяемых для ее определения, делаются определен-

ные допуски, делающие полученные результаты приблизительными, и по их значениям можно говорить лишь о сравнительном порядке величин. Для определения удельной поверхности почвы пользуются прямыми и косвенными методами. В работе удельная поверхность определялась с помощью прибора SORBI MS. По результатам исследования слоя, необходимого для оптимального развития растений, были получены результаты, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Удельная поверхность частиц исследуемого образца

Горизонт	Глубина, см	Удельная поверхность (метод БЭТ), м²/г	Удельная поверхность (метод STSA), м²/г
A	10-20	6,1 ± 0,0	6,7 ± 0,1
AB	20-30	6,1 ± 0,0	7,3 ± 0,4
B	30-40	6,3 ± 0,2	5,7 ± 0,5
	40-50	21,0 ± 0,3	19,6 ± 0,4

Факт связи между продуктивностью почв и ее удельной поверхностью был установлен при проведении бонитировочных работ, в процессе выделения приоритетных факторов плодородия почв. Статистический анализ экспериментального материала, на основании которого определяется роль свойств почв в формировании урожая, показал, что удельная поверхность и плотность сложения почв, объединенные в форме индекса удельной поверхности (I_{Sh}) достоверно коррелируют с продуктивностью почв. Индекс удельной поверхности вычисляют по формуле (2):

$$J_{Sh} = S \cdot d \cdot h \cdot 10^4 , \qquad (2)$$

где J_{Sh} – индекс удельной поверхности;
S – удельная поверхность почвы, м²/г;
d – плотность почвы, г/см³;
h – мощность пахотного слоя почвы, см.

Результаты исследований

По формулам, представленным выше, была рассчитана соответствующая влажность для каждого давления влаги. По результатам этих данных был построен график (рисунок 1).

На оси ординат откладывается давление влаги, выраженное в логарифмических единицах (pF), на оси абсцисс откладывается влажность почвы, выраженная в процентах (w, %).

По рисунку 1 мы видим, что в области pF >4 влажность почвы будет составлять около 2%. Эта величина является недоступной для растений. В области pF 2,8-4 величина влажности будет изменяться от 2 до 16%, что соответствует области пленочной влаги. В интервале pF 2,8-2,2 влажность будет изменяться от 16 до 28%, что соответствует капиллярной области. Область насыщения почвы (28-50% влажности) соответствует интервалу pF 0-2,2.

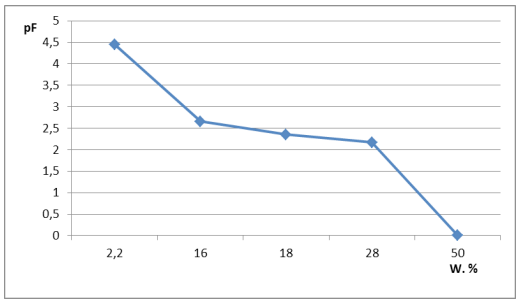

Рисунок 1 – Кривая водоудерживающей способности (ОГХ) выщелоченных черноземов, полученная расчетным методом

Для получения ОГХ инструментальным методом в области pF от 4,4 до 6,5 (область адсорбированной прочносвязанной и пленочной влаги) мы использовали метод десорбции паров воды над насыщенными растворами солей. А для определения основной гидрофизической характеристики в области высоких давлений, pF до 3 (область пленочно-капиллярной и капиллярной влаги) в нашей работе использовался метод, приближенный к методу тензиостатов. И по полученным результатам построили график (рисунок 2).

Сравнивая графики, построенные по результатам проведенных исследований, можно отметить, что лабораторный и расчетный методы дают одинаковые результаты и в целом наблюдается хорошее соответствие. Но лабораторный метод построения ОГХ очень трудоемкий, длительный по времени (шесть и более недель), требует поддержания постоянных внешних условий в ходе проведения эксперимента. Расчетный метод позволяет строить кривые ОГХ по общедоступным, хорошо изученным физическим свойствам. Поскольку определение физических свойств по общеизвестным методикам, используемых в работе, процесс не продолжительный, и очень часто физические свойства изучены и определены, то построение графика осуществляется быстрее. Разница во влажности объясняется полным насыщением образцов в инструментальном методе.

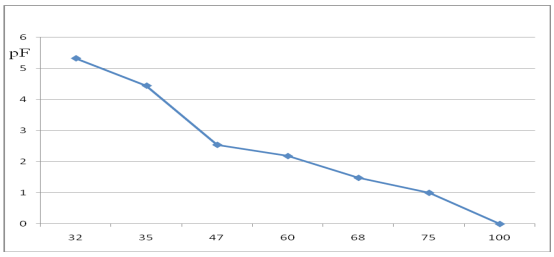

Рисунок 2 – Кривая водоудерживающей способности (ОГХ) выщелоченных черноземов, полученная инструментальным методом

Создание алгоритма моделирования

Дальнейшая работа была посвящена моделированию. Моделирование в почвоведении – это в

первую очередь формализация некоторых общих понятий, способствующих качественному и количественному анализу рассматриваемых явлений [4]. Несмотря на чрезвычайную сложность почвы как объекта моделирования последние десятилетия это направление в почвоведении активно развивается. Вопрос о создании искусственной почвы встает давно. Если сделать ее самим, то можно регулировать в ней соотношения питательных веществ и воды так, как это необходимо растениям. В этом случае можно было бы получить максимум продукции и при этом избежать трудоемкости в вопросах селекции, а так же избежать больших финансовых вложений в мелиоративные мероприятия. Мы не ставили перед собой задачу найти такие вещества, которые можно было бы использовать для создания искусственной почвы. Мы попытались овладеть процессом создания почвы известного гранулометрического состава из частиц различной механической прочности, которые образовывая различные прослойки, обладают различной способностью удерживать влагу.

Работа в лаборатории показала, что такое моделирование возможно, если известны гидрофизические характеристики различных почв, базу которых можно создать, используя предлагаемый нами метод. При этом следует отметить, что программное обеспечение создавалось без учета минерализации почв и ее тепловых свойств.

Разработанная программа предназначается для расчёта гранулометрического состава почвы из почвенно-гидрологических констант. Программа выполняет построение опытного и модельного графиков по входным точкам, проводит совмещение этих графиков в указываемой пользователем точке и находит ошибку по влажности W (%) и по давлению pF для данной точки. Также разработанная программа решает задачу нахождения значений влажностей по заданным фракциям гранулометрического состава почвы (от ила до крупного песка) и обратную ей задачу нахождения значений фракций по заданным влажностям. Программа позволяет снизить трудоемкость и увеличить наглядность проводимых расчётов. На начальном этапе результаты представлены в виде совмещенных графиков, позволяющих проводить анализ применяемых методов исследования (рисунок 3).

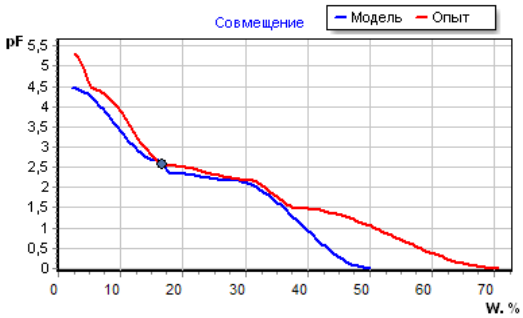

Рисунок 3 – Сравнение опытных и смоделированных данных

По каждой из точек совмещения графиков возможно провести и проанализировать ошибки в определении используемых величин (рисунок 4).

Кроме этого имеется возможность нахождения значений влажностей по заданным фракциям гранулометрического состава почвы (от ила до крупного песка) и решение обратной задачи – нахождения значений фракций по заданным влажностям.

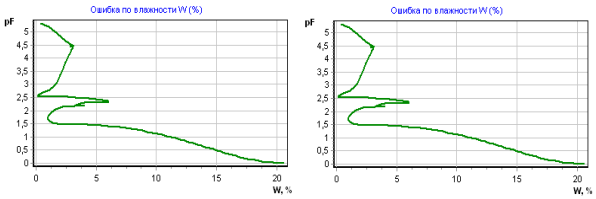

Рисунок 4 – Анализ ошибок при определении значения величин

Выводы

Таким образом, информация, содержащаяся в ОГХ, сама по себе и в сочетании с дополнительными данными играет существенную роль в описании динамики поля влагосодержания почвы, осуществляющейся за счет потоков влаги. Так, при влажности почвы нашего участка начиная с 16% включительно и до 18%, можно говорить о состоянии физической спелости почвы, а, следовательно, о ее готовности к обработке. При влажности 18% начинает проявляться липкость, которая будет оказывать отрицательное влияние на условия обработки. При влажности 28% - наблюдается проявление пластичности и при влажности 50% почва переходит в состояние текучести.

Ввиду фундаментального значения основной гидрофизической характеристики почв, эта зависимость получает все более широкое распространение в самых различных областях почвоведения и смежных дисциплинах. Но поскольку стоимость получения почвенно-гидрофизической информации, особенно с учетом пространственно-временной изменчивости, обычно велика и временные затраты построения основной гидрофизической характеристики могут достигать порядка двух месяцев, поэтому актуальной задачей является упрощение решения указанных задач.

Список литературы

1 Дембовецкий А. В. Основная гидрофизическая характеристика: связь с почвенными константами и расчет по физическим свойствам : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1998. 19 с.

2 Воронин А. Д. Основы физики почв. М., 1986. 244 с.

3 Шеин Е. В., Архангельская Т. А., Гончаров В. М. и др. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв. М. : Изд-во МГУ. 2001. 199 с.

4 Рыжова И. М. Математическое моделирование почвенных процессов. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1987. 82 с.