

Терлеев В.В., Топаж А.Г., Гурин П.Д. Программа «HYSTERESIS» для расчета сорбционных и десорбционных ветвей петли гистерезиса водоудерживающей способности почвы // В Сб. «Материалы научной сессии по итогам 2012 года Агрофизического института».- СПб.: АФИ, 2013.- с. 161-166.

УДК [631.43+004.65]

Программа «HYSTERESIS» для расчета сорбционных и десорбционных ветвей петли гистерезиса водоудерживающей способности почвы

В.В. Терлеев¹, А.Г. Топаж², П.Д. Гурин²

¹*НИУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

²*ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт РАСХН*

ВВЕДЕНИЕ

Целью работы является разработка алгоритма и программная реализация расчета петель гистерезиса, образованных ветвями иссушения и увлажнения водоудерживающей способности почвы. Как известно, водоудерживающая способность почвы описывается т.н. основной гидрофизической характеристикой почвы (ОГХ) в виде зависимости между объемной влажностью почвы и капиллярным давлением почвенной влаги [4]. По сути, эта зависимость представляет собой изотерму термодинамического состояния почвенной влаги при равновесии сил взаимодействия молекул воды с твердой, жидкой и газообразной фазами почвы. По причине необратимости термодинамических процессов указанная изотерма в принципе не может быть представлена в виде однозначной функции состояния, связывающей величины объемной влажности почвы и капиллярного давления почвенной влаги. Тем не менее, ранее практиковалось представление ОГХ в виде лишь одной главной десорбционной ветви водоудерживающей способности почвы. Это мотивировалось трудоемкостью измерения ОГХ, а также тем, что суммарная длительность периодов высыхания почвы как совокупности квазиравновесных десорбционных состояний почвенной влаги обычно превышает длительность периодов увлажнения почвы в сезон вегетации. И, следовательно, погрешность моделирования динамики почвенной влаги, накопленная в периоды увлажнения будет незначительной. В настоящее время данная мотивация не выдерживает никакой критики. В задачах ирригационного земледелия эти периоды соотносятся в совершенно иных пропорциях [1,2]: суммарная длительность периодов увлажнения почвы значительно возросла. Однако, главная причина несостоятельности такой мотивации заключается в ином: основные трудности определения ОГХ, вообще говоря, имеют непреодолимый характер, поскольку измерить всю траекторию состояний почвенной влаги на предстоящий сезон вегетации не представляется возможным, поскольку достоверные метеоусловия являются неизвестными. Вместе с тем, эту траектория можно предсказать, опираясь на соответствующую модель [6-8, 11], с использованием метеорологических прогнозов, данных агрофизических исследований почвы [3] или методов косвенной оценки почвенно-гидрологических показателей [16].

МЕТОД

В лаборатории математического моделирования агроэкосистем дано теоретическое обоснование водоудерживающей способности почвы в рамках представлений о почве как капиллярно-пористом теле с логнормальным распределением пор по размерам [5, 13]. Данное обоснование не ограничено какими-либо условиями и, вообще говоря, должно быть

применимым как к десорбционным, так и к сорбционным изотермическим равновесиям почвенной влаги.

Ниже рассматриваются причины отличий сорбционных и десорбционных изотерм почвенной влаги. При лабораторном исследовании десорбционных равновесий почвенной влаги с помощью пневматического пресса вытеснение воды из почвы достигается компенсированием капиллярного давления влаги ψ путем создания избыточного давления воздуха над исходно влагонасыщенным (без защемленного воздуха в порах) почвенным образцом, расположенным на керамической мембране. При достижении газового давления значения P_{ae} сила взаимодействия между молекулами воды и поверхностью почвенных частиц оказывается неспособной удерживать воду в наиболее широких порах, поэтому часть воды вытекает из почвы, а освободившийся объем пор занимает воздух, проникший непосредственно из окружающей атмосферы. Величину P_{ae} называют *давлением входа воздуха*. Этой величине соответствует капиллярное давление почвенной влаги $\psi_{ae} = -P_{ae}$. После вытеснения воды из широких капилляров приходит очередь опорожнения капилляров меньшего радиуса. Первая причина гистерезиса ОГХ заключается в том, что $\psi_{ae} \neq 0$.

Увлажнение исходно воздушно-сухой почвы обычно сопровождается задержкой в тупиковых порах *защемленного воздуха* в виде *воздушных пробок*. При этом влажность равновесного состояния почвы оказывается меньше влажности почвы десорбционного равновесия для одинаковых значений давления влаги. Вытеснение газовых пузырьков из почвенной влаги может наблюдаться с увеличением капиллярного давления влаги ψ до значения ψ_{we} ($\psi_{ae} \leq \psi_{we}$). Это достигается разрежением атмосферы над почвенным образцом или приложением дополнительного (положительного) гидравлического давления P_{we} . Величину P_{we} называют *давлением входа воды* ($\psi_{we} = -P_{we}$). Обычно $P_{ae} \geq P_{we} \geq 0$. В природе выделение атмосферных газов из почвенной влаги, а также их растворение в воде и скопление в ней в виде пузырьков возможны со сменой барических систем атмосферы, а дополнительное гидравлическое давление может появиться в результате образования слоя свободной влаги на поверхности почвы, а также при подъеме грунтовых вод над точкой наблюдения. Вторая причина гистерезиса ОГХ заключается в том, что $\psi_{we} \geq \psi_{ae} \neq 0$.

Радиус почвенного капилляра не является постоянным по своей длине, т.е. он напоминает трубку с утолщениями (четками), из-за чего существует различие между сорбционными и десорбционными изотермическими равновесиями почвенной влаги в отношении степени заполнения влагой такого капилляра. Различие проявляется в том, что для одного и того же давления под искривленной поверхностью влаги объем воды, удерживаемой системой четочных капилляров при сорбционном равновесии, будет меньше объема воды, которая удерживается этими капиллярами при десорбционном равновесии. Из-за этого доля капилляров с узкими входными отверстиями в эффективном объеме порового пространства для случая сорбции оказывается более низкой по сравнению с десорбционным случаем. Таким образом, «сорбционный» наиболее вероятный радиус пор оказывается несколько больше «десорбционного». Это можно рассматривать как третью причину гистерезиса.

Учет этих причин гистерезиса ОГХ состоит в том, что «начало отсчета» капиллярного давления у изотерм равновесия почвенной влаги смещается относительно нулевого значения, причем для каждой изотермы это смещение индивидуально: $\psi_{we} \geq \psi_{ae} \neq 0$. Параметры соотношений, используемых для описания иссушения и увлажнения, отметим индексами «d» и «w», соответственно. Принимая во внимание особенности десорбционных

равновесий исходно полностью влагонасыщенной почвы и сорбционных равновесий исходно воздушно-сухой почвы, а также различия между значениями наиболее вероятного эффективного радиуса почвенных капилляров, запишем соотношения, описывающее две изотермы равновесия влаги в почве при опорожнении почвенных пор от воды, начиная с самых широких капилляров и заканчивая самыми узкими порами:

$$\begin{cases} \bar{\theta} = \left(1 + (-\alpha_d(\psi - \psi_{ae}))^n\right)^{-1}, & \psi < \psi_{ae}, \\ \bar{\theta} = 1, & \psi_{ae} \leq \psi, \end{cases}$$

а также при заполнении пор водой, начиная с самых узких капилляров и заканчивая самыми широкими порами:

$$\begin{cases} \bar{\theta} = \left(1 + (-\alpha_w(\psi - \psi_{we}))^n\right)^{-1}, & \psi < \psi_{we}, \\ \bar{\theta} = 1, & \psi_{we} \leq \psi, \end{cases}$$

где $\bar{\theta} = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ - приведенная объемная влажность почвы; θ - объемная влажность почвы; θ_s - объемная влажность полного насыщения почвы влагой; θ_r - минимальное значение содержание жидкой воды в почве; $\alpha_d = -1/(\psi_{0,d} - \psi_{ae})$; $\alpha_w = -1/(\psi_{0,w} - \psi_{we})$; $\psi_{0,d} = -\beta/r_{0,d}$; $\psi_{0,w} = -\beta/r_{0,w}$; $n = 4/(\sigma\sqrt{2\pi})$, $r_{0,d}$ и $r_{0,w}$ - наиболее вероятные значения эффективных радиусов (десорбционного и сорбционного) цилиндрических почвенных капилляров, σ - среднеквадратическое отклонение логарифмов эффективных радиусов почвенных пор, $\beta = 2\gamma(g\rho_w)^{-1} \cos \varphi$, γ - коэффициент поверхностного натяжения воды на границе с воздухом в почве, φ - краевой угол смачивания влагой поверхности почвенных частиц, g - ускорение свободного падения, ρ_w - плотность воды.

Эти изотермы называются *главной ветвью иссушения* и *главной ветвью увлажнения* водоудерживающей способности почвы. Далее, с использованием подобной методологии осуществляется построение семейств первичных ветвей увлажнения и иссушения почвы, затем – вторичных и т.д. Таким образом, предложено теоретическое обоснование гистерезиса ОГХ, дано описание этого явления в форме математической модели и разработан алгоритм расчета объемной влажности почвы как функции капиллярного давления почвенной влаги с учетом особенностей процесса установления термодинамического равновесия влаги в почве.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В среде разработки *Borland Delphi* с использованием графической библиотеки *TeeChart* разработано демонстрационное приложение «HYSTERESIS», которое позволяет осуществлять вычислительные эксперименты с математической моделью гистерезиса водоудерживающей способности почвы. На рис. 1 представлен общий вид диалогового окна этой программы и результат расчета главных сорбционной и десорбционной ветвей гистерезиса ОГХ. На рис. 2 приведены результаты расчета семейства сорбционных и десорбционных изотерм почвенной влаги при произвольном варьировании величины капиллярного давления почвенной влаги (при этом динамика почвенного потенциала может задаваться пользователем вручную смещением соответствующего визуального элемента управления – «ползунка»).

В частности, из этого рисунка видно, что одному значению капиллярного давления (потенциала) почвенной влаги, например -330 см вод.ст., используемому для определения величины наименьшей влагоемкости, соответствует целый набор возможных значений объемной влажности почвы. Из этого факта, в частности, вытекает, что если не учитывать

явление гистерезиса водоудерживающей способности почвы, то не следует ожидать высокой точности прогнозирования динамики почвенной влаги в условиях орошаемого земледелия.

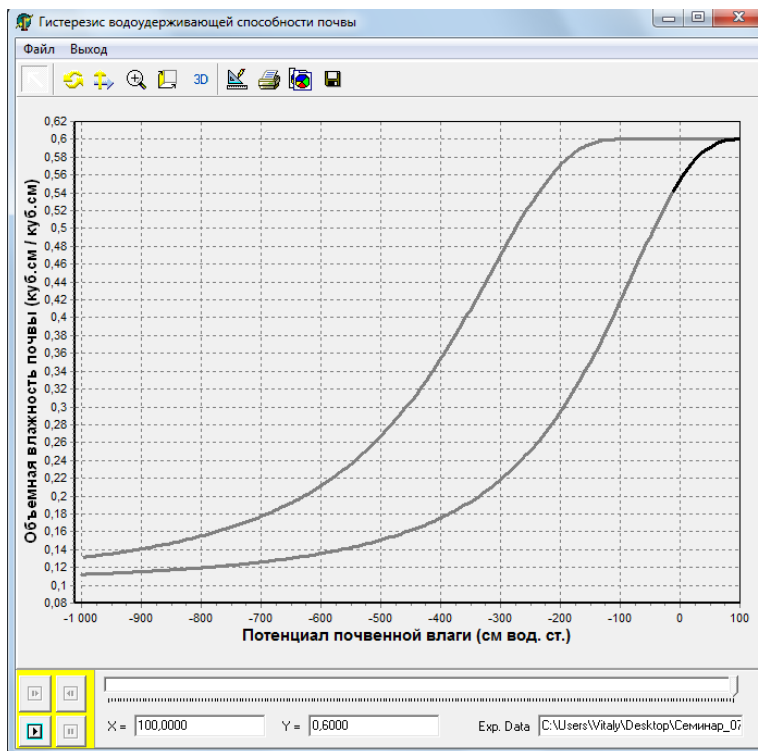


Рис. 1. Главные ветви увлажнения и иссушения петли гистерезиса ОГХ

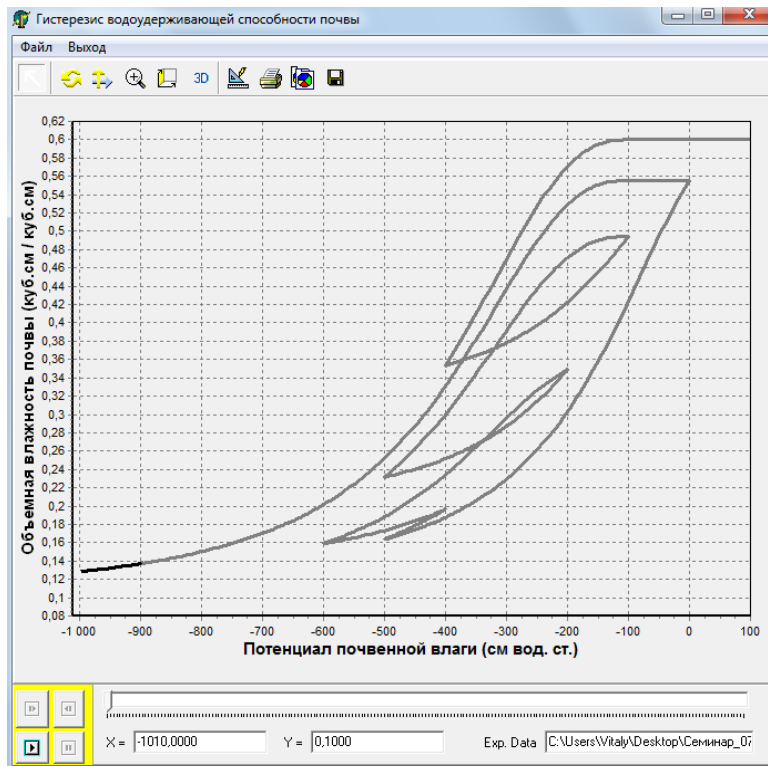


Рис. 2. Семейство сорбционных и десорбционных кривых гистерезиса ОГХ при произвольном варьировании капиллярного давления почвенной влаги.

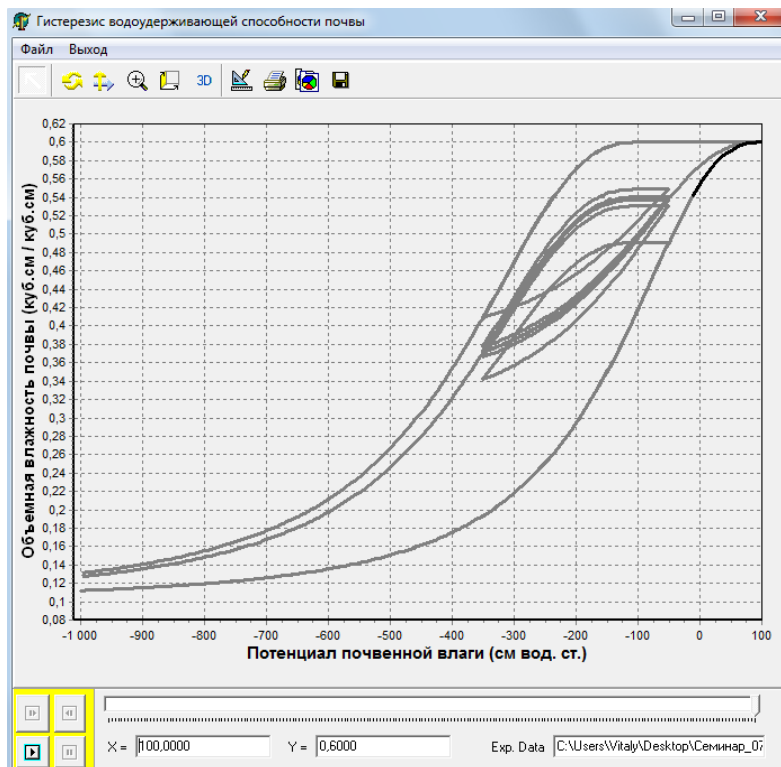


Рис. 3. Результаты эксперимента с моделью при варьировании капиллярного давления почвенной влаги в фиксированном диапазоне: негативного «эффекта помпы» не выявлено.

На рис. 3 представлен результат вычислительного эксперимента, демонстрирующий отсутствие в исследуемой модели накопления погрешности при расчетах значений объемной влажности почвы для осцилляций величины капиллярного давления почвенной влаги в фиксированном диапазоне. Иными словами, нежелательный «эффект помпы» в данной модели не выявлен.

Таким образом, построена математическая модель гистерезиса водоудерживающей способности почвы и осуществлена программная реализация этой модели. Полученные результаты позволят существенно повысить точность моделирования не только влагозапаса почвы, но и процессов обмена, переноса и поглощения питательных веществ в почве [9-11]. Кроме того, включение поостренной модели в систему имитационного моделирования AGROTOOL [12] позволит эффективно использовать данную модель в экспертных системах поддержки агротехнических решений [14, 15] в задачах ирригационного земледелия.

Работа выполнена при поддержке DAAD, DFG и РФФИ № 09-05-00415-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Терлеев В.В., Латышев Н.К., Крылова И.Ю., Глядченкова Н.А. 2011. Определение водно-физических свойств почв при мелиоративных изысканиях. Мелиорация и водное хозяйство. 2:18-21.
2. Арефьев Н.В., Wenkel К.-О., Mirschel W., Баденко В.Л., Терлеев В.В., Волкова Ю.В. 2012. Комплексная оценка агромелиоративных систем для планирования их реконструкции. В: Тенденции развития агрофизики в условиях изменяющегося

- климата. Международ. конф., ГНУ АФИ, Санкт-Петербург, 20-21 сентября 2012, Санкт-Петербург, с. 468-472.
3. Баденко В.Л., Терлеев В.В., Латышев Н.К., Крылова И.Ю., Муравьева Л.С. 2011. Агрофизические исследования почвы для технологий точного земледелия: постановка задачи и метод. Плодородие. 1:29-31.
 4. Глобус А.М. 1969. Экспериментальная гидрофизика почв. Изд. Гидрометеиздат, Ленинград.
 5. Гурин П.Д., Терлеев В.В. 2012. Моделирование водоудерживающей способности почвы с учетом гистерезиса. В: Тенденции развития агрофизики в условиях изменяющегося климата. Международ. конф., ГНУ АФИ, Санкт-Петербург, 20-21 сентября 2012, Санкт-Петербург, с. 497-501.
 6. Полуэктов Р.А., Терлеев В.В. 2002. Моделирование водоудерживающей способности и дифференциальной влагоемкости почвы. Метеорология и гидрология. 11:93-100.
 7. Полуэктов Р.А., Опарина И.В., Терлеев В.В. 2003. Три способа расчета динамики почвенной влаги. Метеорология и гидрология. 11:90-98.
 8. Полуэктов Р.А., Терлеев В.В. 2005. Моделирование водоудерживающей способности почвы с использованием агрогидрологических характеристик. Метеорология и гидрология. 12:98-103.
 9. Полуэктов Р.А., Терлеев В.В. 2010. Компьютерная модель динамики содержания азота в корнеобитаемом слое почвы. Агрехимия. 10:68-74.
 10. Терлеев В.В., Кокотов Ю.А., Крейер К.Г., Федотов М.В. 2000. Исследование обменного калия в дерново-подзолистой супесчаной почве методом Бекетта. Агрехимия. 9:29-35.
 11. Терлеев В.В. 2001. Моделирование обмена, переноса и поглощения фосфора и калия в корнеобитаемом слое почвы. Автореферат диссертации на соискание степени доктора сельскохозяйственных наук. ГНУ АФИ. Санкт-Петербург. 40 с.
 12. Терлеев В.В., Полуэктов Р.А., Бакаленко Б.И. 2012а. Структура информационного обеспечения модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Агрофизика. 2:29-36.
 13. Терлеев В.В., Mirschel W., Баденко В.Л., Гусева И.Ю., Гурин П.Д. 2012б. Физико-статистическая интерпретация параметров функции водоудерживающей способности почвы Агрофизика. 4:1-8.
 14. Якушев В.П., Полуэктов Р.А., Петрова М.В., Терлеев В.В., Петрушин А.Ф., Бакаленко Б.И. 2008. Имитационно-экспертная система поддержки агротехнологических решений (концепция). Вестник РАСХН. 5:7-9.
 15. Якушев В.П., Полуэктов Р.А., Петрова М.В., Терлеев В.В., Петрушин А.Ф., Бакаленко Б.И. 2008. Имитационно-экспертная система поддержки агротехнологических решений (реализация). Вестник РАСХН. 6:6-9.
 16. Terleev V.V., Mirschel W., Schindler U., Wenkel K.-O. 2010. Estimation of soil water retention curve using some agrophysical characteristics and Voronin's empirical dependence. Journal International Agrophysics. 24(4):381-387.