

ЗЕМЛЯРОБСТВА І РАСЛІНАВОДСТВА

УДК 631.41

А. П. ЛИХАЦЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВОГРУНТОВ

Институт мелиорации, Минск, Республика Беларусь, e-mail: niimel@mail.ru

(Поступила в редакцию 18.07.2013)

Введение. Термин «почвогрунт» используют, когда при анализе изучаемых процессов нет необходимости различать почву (как плодородный слой) и грунт (как подстилающую горную породу). Под гидрофизическими понимают свойства почвогрунтов, определяющие взаимодействие почвенной влаги с твердой фазой (влагоперенос) в зоне аэрации. К ним относят коэффициенты фильтрации и влагопроводности, а также почвенно-гидрологические показатели (константы): максимальную гигроскопичность, максимальную молекулярную влагоемкость, влажность разрыва капиллярной связи, наименьшую влагоемкость, полную влагоемкость.

Моделирование перемещения влаги в поровом пространстве почвогрунтов выполняется с использованием дифференциального уравнения влагопереноса [1]. Одним из основных параметров данного уравнения является коэффициент влагопроводности. Разработка методов вычисления коэффициентов влагопроводности в зоне аэрации почвогрунтов интенсивно велась в 50–70-х годах XX века. К 80-м годам для моделирования влагопереноса было предложено несколько конкурирующих расчетных схем, которые используются до настоящего времени [2]. Сравнительный анализ результатов расчета по ним показал, что ни один из вариантов не может претендовать на универсальность: для каждого типа почвогрунта лучшее приближение к опытным точкам дают разные расчетные уравнения [2, 3].

Наиболее известная полуэмпирическая формула для расчета коэффициента влагопроводности в ненасыщенной зоне почвогрунтов была предложена академиком С. Ф. Аверьяновым [4]:

$$K_B = K_\Phi \left(\frac{W - W_{\text{ММВ}}}{W_{\text{ПВ}} - W_{\text{ММВ}}} \right)^n, \quad (1)$$

где K_B – коэффициент влагопроводности в ненасыщенной зоне почвогрунта, см/сут.; K_Φ – коэффициент фильтрации, см/сут.; W – текущая влажность почвогрунта; $W_{\text{ММВ}}$ – влажность, соответствующая максимальной молекулярной влагоемкости (наибольшее количество воды, которое может быть удержано в почве силами молекулярного притяжения); $W_{\text{ПВ}}$ – полная влагоемкость, т. е. влажность при полном заполнении порового пространства водой; n – показатель степени, согласно С. Ф. Аверьянову, равен 3,5.

Использование формулы (1) при расчете коэффициентов влагопроводности в области $W_{\text{ММВ}} < W \leq W_{\text{ПВ}}$ связано со значительными трудностями: во-первых, с наличием нескольких методик определения максимальной молекулярной влагоемкости (ММВ), дающих существенно различающиеся результаты [5]; во-вторых, с изменениями значений показателя степени в формуле (1) по типам почвогрунтов [3]; в-третьих, с невозможностью расчета коэффициента влагопроводности по формуле (1) в областях низкого влагосодержания (от максимальной гигроскопичности (МГ) до ММВ) [2].

Анализируя указанные недостатки, А. А. Роде указывал, что ... «методы определения максимальной молекулярной влагоемкости... в большинстве случаев не обеспечивают определения

данной величины в соответствии с относящимся к ней понятием, в силу чего величину ММВ следует считать условной» [5]. Вместе с тем при расчетах водно-солевых режимов почвогрунтов по причине доступности и простоты формула (1) продолжает пользоваться популярностью, но для расширения области применения этого уравнения некоторые исследователи вместо ММВ используют максимальную гигроскопичность, повышая при этом значение показателя степени и считая его величиной постоянной, не зависящей от типов почвогрунтов [2]. Однако игнорирование изменчивости показателя степени в формуле (1) по типам почвогрунтов приводит к большим ошибкам в расчетах коэффициентов влагопроводности [3]. Исключению данного недостатка и посвящена настоящая статья.

Материалы и методы исследования. В исследовании использованы опубликованные опытные данные по влагопереносу в ненасыщенной зоне порового пространства для четырех различающихся по плотности сложения и гранулометрическому составу минеральных почвогрунтов: песка, оглеенного песчаника, жирной глины и плотного суглинка [3], а также аналогичные данные для торфа [6].

Для учета установленной в опытах изменчивости показателя степени в формуле (1) по типам почвогрунтов и его зависимости от принятой начальной влажности (ММВ, МГ и др.) представим формулу С. Ф. Аверьянова в более общем виде:

$$K_B = K_\Phi \left(\frac{W - W_{\text{НФ}}}{W_{\text{ПВ}} - W_{\text{НФ}}} \right)^{n_{\text{НФ}}}, \quad (2)$$

где $W_{\text{НФ}}$ – начальная фиксированная влажность; $n_{\text{НФ}}$ – показатель степени, величина которого зависит от начальной фиксированной влажности. Область применения формулы (2) ограничивается диапазоном $W_{\text{НФ}} < W \leq W_{\text{ПВ}}$.

При реализации схемы расчета по формуле (2) необходимо, во-первых, «привязать» начальную фиксированную влажность ($W_{\text{НФ}}$) к конкретному почвенно-гидрологическому показателю и, во-вторых, установить зависимость показателя степени ($n_{\text{НФ}}$) от начальной фиксированной влажности, т. е. определить структуру функции:

$$n_{\text{НФ}} = f(W_{\text{НФ}}). \quad (3)$$

Для уточнения формы зависимости (3) целесообразно выполнить расчеты по формуле (2) для разных почвогрунтов (песка, оглеенного песчаника, жирной глины, плотного суглинка и торфа), изменяя $W_{\text{НФ}}$ от нуля (абсолютно сухого состояния почвогрунта) до полной влагоемкости.

Результаты и их обсуждение. Результаты расчета по формуле (2), представленные графически на рис. 1, показывают, что зависимость (3) по форме близка к линейной, имеющей перелом в некоторой точке, причем данная точка по оси абсцисс расположена в промежутке между максимальной гигроскопичностью и наименьшей влагоемкостью. Подобное расположение точки перелома функции (3) позволяет сделать вывод, что она разделяет «связанную» и «свободную» влагу, содержащуюся в поровом пространстве почвогрунтов. Следовательно, в точке перелома функции (3) начальная фиксированная влажность соответствует наибольшему количеству влаги, которое может быть удержано силами молекулярного притяжения, действующего в почвогрунтах. Однако, подобным образом характеризуется именно максимальная молекулярная влагоемкость.

Из вышеизложенного следует вывод, что максимальную молекулярную влагоемкость, разделяющую в почвогрунтах «связанную» и «свободную» влагу, нельзя считать неким условным параметром, она является ключевым показателем, *критической почвенно-гидрологической константой*.

Уточним положение максимальной молекулярной влагоемкости среди других гидрофизических характеристик почвогрунтов. В соответствии с общепринятой классификацией категорий воды в грунтах, предложенной еще в 1936 г. А. Ф. Лебедевым и детализируемой позднее в трудах известных советских почвоведов (А. А. Роде, Н. А. Качинский и др.) и геологов (Е. М. Сергеев и др.) [5, 7, 8], связанная влага (в диапазоне насыщения почвы от абсолютно сухого состояния до максимальной молекулярной влагоемкости) подразделяется на прочно- и рыхлосвязанную.

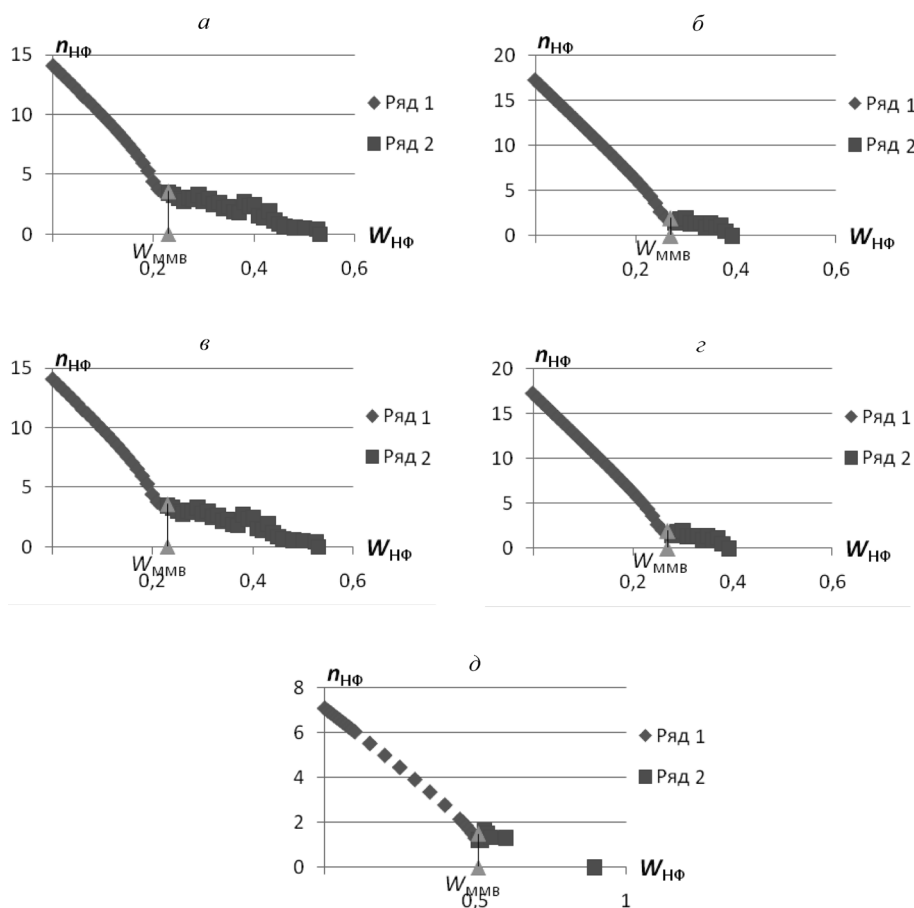


Рис. 1. Графики зависимости $n_{HФ} = f(W_{HФ})$ для разных почвогрунтов: а – песок; б – оглеенный песчаник; в – жирная глина; г – плотный суглинок; д – торф; ряд 1 – связанная влага; ряд 2 – свободная влага

Разделяет эти категории почвенной влаги показатель максимальной гигроскопичности. Свободная влага также подразделяется на подвешенную (насыщающую почву в пределах от максимальной молекулярной до наименьшей влагоемкости) и гравитационную влагу, передвигающуюся в поровом пространстве под действием собственного веса (при насыщении в пределах от наименьшей до полной влагоемкости).

Оценивая возможные варианты соотношения максимальной молекулярной влагоемкости и влажности разрыва капиллярной связи (влажности, при которой подвешенная влага в процессе своего испарения теряет способность передвигаться к впитывающей или испаряющей поверхности), приходим к выводу, что эти понятия являются синонимами, разделяя «связанную» и «свободную» влагу в поровом пространстве почвогрунтов. Для количественной оценки этого критического почвенно-гидрологического показателя можно применить реализованный нами выше метод расчета с использованием «начальной фиксированной влажности».

Т а б л и ц а 1. Гидрофизические показатели исследуемых почвогрунтов

Показатель	Песок	Оглеенный песчаник	Жирная глина	Плотный суглинок	Торф
$K_{Ф}$, см/сут.	400	75	25	10	75
$W_{ПВ}$, см ³ /см ³	0,41	0,46	0,53	0,39	0,90
$W_{НВ}$, см ³ /см ³	0,21	0,27	0,31	0,34	0,62
$W_{ММВ}$, см ³ /см ³	0,14	0,19	0,23	0,27	0,51
$W_{МГ}$, см ³ /см ³	0,12	0,17	0,20	0,24	–
$W_{ММВ}/W_{НВ}$	0,67	0,70	0,74	0,79	0,82

Принятые обозначения: $K_{Ф}$ – коэффициент фильтрации; $W_{ПВ}$ – полная влагоемкость; $W_{НВ}$ – наименьшая влагоемкость; $W_{ММВ}$ – максимальная молекулярная влагоемкость; $W_{МГ}$ – максимальная гигроскопичность.

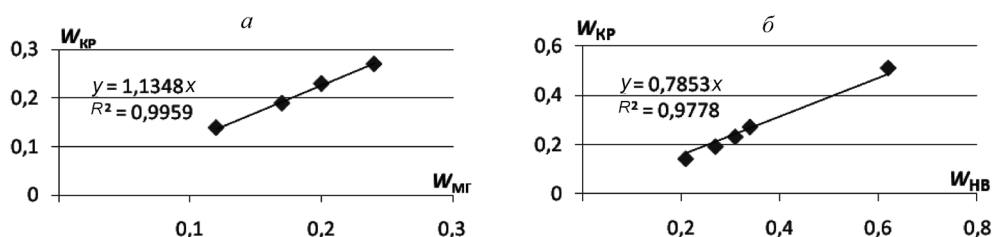


Рис. 2. Графики связи критической влагоемкости с почвенно-гидрологическими показателями: а – зависимость критической влагоемкости от максимальной гигроскопичности; б – связь критической влагоемкости с наименьшей влагоемкостью

Для подтверждения справедливости подобной идентификации максимальной молекулярной влагоемкости и влажности разрыва капиллярной связи сопоставим гидрофизические показатели исследуемых почвогрунтов (табл. 1). Как видим, установленная в опытах величина максимальной молекулярной влагоемкости по типам почвогрунтов колеблется в пределах 67–82 % от наименьшей влагоемкости, что согласуется с общепринятыми представлениями о влажности разрыва капиллярной связи.

В теории режимов орошения сельскохозяйственных культур граница между «связанной» и «свободной» влагой в почвогрунтах называется «критической влагоемкостью». Считаем, что именно этот термин в наибольшей степени соответствует физической сущности разделения связанной и свободной почвенной влаги (см. рис. 1), т. е.

$$W_{ММВ} = W_{ВРК} = W_{КР} \quad (4)$$

где $W_{ВРК}$ – влажность разрыва капиллярной связи в почвогрунтах; $W_{КР}$ – критическая влагоемкость.

Исследования показывают, что критическая влагоемкость коррелирует с другими почвенно-гидрологическими показателями (рис. 2). Наиболее тесная связь наблюдается с максимальной гигроскопичностью. Однако заметим, что полученное эмпирическое уравнение (рис. 2, а) действительно только для минеральных почвогрунтов в диапазоне изменения максимальной гигроскопичности от 0,11 до 0,25 см³/см³.

Значения показателей степени в формуле (2), вычисленные по опытным данным и соответствующие установленной закономерности (см. рис. 1), приведены в табл. 2. Они подтверждают полученный применительно к формуле (1) вывод А. Д. Ахмедова: при снижении исходной влажности от критической (максимальной молекулярной) влагоемкости до максимальной гигроскопичности величина показателя степени в расчетной формуле увеличивается [2]. Та же закономерность справедлива для формулы (2), а также при расширении области применения (2) от $W_{МГ} < W \leq W_{НВ}$ до $W_{МГ} < W \leq W_{ПВ}$ и от $W_{КР} < W \leq W_{НВ}$ до $W_{КР} < W \leq W_{ПВ}$ (см. табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Показатели степени в формуле (2) при соответствующих значениях начальной фиксированной влажности ($W_{НФ}$)

$W_{НФ}$	Показатель степени	Область применения (от – до)	Песок	Оглеенный песчаник	Жирная глина	Плотный суглинок	Торф
0	N	$W_{МГ} - W_{ПВ}$	8,41	12,11	14,42	17,48	7,14
		$W_{МГ} - W_{НВ}$	6,99	10,46	11,37	12,79	7,48
$W_{МГ}$	$n_{МГ}$	$W_{МГ} - W_{ПВ}$	5,80	7,58	10,34	4,96	5,85
		$W_{МГ} - W_{НВ}$	3,75	4,99	5,56	3,47	4,04
$W_{КР}$	$n_{КР}$	$W_{КР} - W_{ПВ}$	5,35	7,05	9,35	3,92	2,61
		$W_{КР} - W_{НВ}$	3,17	4,31	4,12	1,59	2,43

П р и м е ч а н и е: N – показатели степени в формуле (2) при начальной фиксированной влажности, равной нулю; $n_{МГ}$ – показатели степени в формуле (2) при начальной фиксированной влажности, равной максимальной гигроскопичности; $n_{КР}$ – показатели степени в формуле (2) при начальной фиксированной влажности, равной критической влагоемкости.

Средние квадратичные отклонения между измеренными и рассчитанными по формуле (2) значениями коэффициентов влагопроводности с подбором показателей степени, наиболее соответствующих равенству $K_{РАСЧ} = K_{ИЗМ}$ (здесь $K_{РАСЧ}$ – вычисленные по формуле (2) значения коэффициентов влагопроводности; $K_{ИЗМ}$ – измеренные в опытах значения коэффициентов влагопроводности), приведены в табл. 3. Как видим, расчет по формуле (2) во всей области наблюдаемых коэффициентов влагопроводности (от $W_{МГ}$ до $W_{ПВ}$) дает более точные результаты при начальной фиксированной влажности, равной нулю, однако при этом в диапазоне $W_{НВ} \dots W_{ПВ}$ могут наблюдаться весьма большие отклонения рассчитанных величин от измеренных (до 20 % от величины коэффициентов фильтрации).

Т а б л и ц а 3. Средние квадратичные отклонения между рассчитанными по формуле (2) и измеренными значениями коэффициентов влагопроводности, мм/сут.

$W_{НФ}$	Показатель степени	Область применения (от – до)	Песок	Оглеенный песчаник	Жирная глина	Плотный суглинок	Торф
0	N	$W_{МГ} - W_{ПВ}$	67,20	12,40	4,33	3,65	6,74
		$W_{МГ} - W_{НВ}$	1,80	0,37	0,019	0,33	6,70
$W_{МГ}$	$n_{МГ}$	$W_{МГ} - W_{ПВ}$	80,0	13,30	5,45	1,83	5,84
		$W_{МГ} - W_{НВ}$	1,20	0,15	0,040	0,081	1,10
$W_{КР}$	$n_{КР}$	$W_{КР} - W_{ПВ}$	113,2	17,4	5,10	3,64	1,80
		$W_{КР} - W_{НВ}$	2,70	0,22	0,003	3,89	2,04

Интерес представляет изучение закономерностей процесса влагопереноса в пределах наиболее вероятной динамики влагозапасов в корнеобитаемой зоне почвогрунтов, т. е. в диапазоне от максимальной гигроскопичности до наименьшей влагоемкости. В этой области лучшие результаты получены при начальной фиксированной влажности, равной максимальной гигроскопичности. Для минеральных почвогрунтов средние квадратичные отклонения расчета в диапазоне $W_{МГ} < W \leq W_{НВ}$ не превышают 0,5 % от значений коэффициентов фильтрации, а в абсолютных величинах они колеблются от 0,01 мм/сут. в глинах до 1,2 мм/сут. в песках.

Следовательно, для определения интенсивности влагопереноса в минеральных почвогрунтах в области влагонасыщения от $W_{МГ}$ до $W_{НВ}$ можем рекомендовать к использованию следующую формулу:

$$K_B = K_{\Phi} \left(\frac{W - W_{МГ}}{W_{ПВ} - W_{МГ}} \right)^{n_{МГ}} \quad (5)$$

На рис. 3 представлена связь показателей степени (табл. 2) с плотностью сложения исследуемых почвогрунтов, характеризуемая достаточно высокими коэффициентами детерминации. В соответствии с полученной аппроксимацией кривых на рис. 3, а найдем, что справедлива зависимость

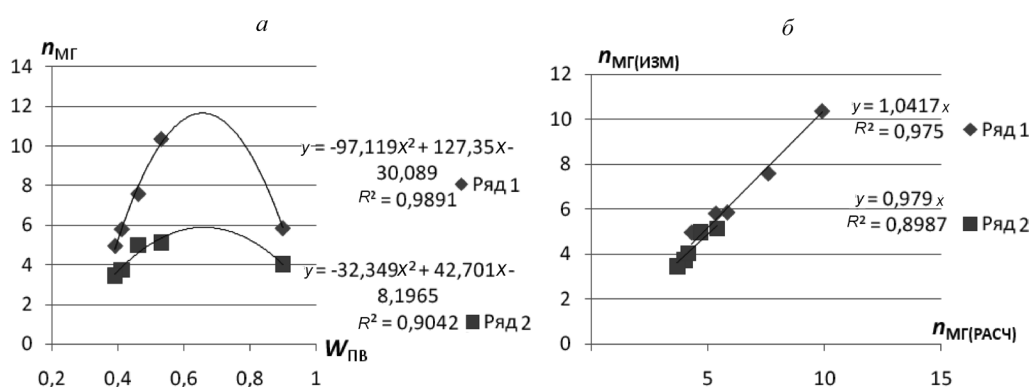


Рис. 3. Зависимость показателей степени в формуле (5) от плотности сложения почвогрунтов: а – эмпирическая связь; б – графики соответствия показателей степени, установленных по опытным данным и рассчитанных по формуле (6); ряд 1 – начальная фиксированная влажность в формуле (2) равна нулю; ряд 2 – начальная фиксированная влажность в формуле (2) равна максимальной гигроскопичности

$$n_{\text{МГ}} = n_{\text{МГmax}} \left[1 - \left(\frac{W_{\text{ПВ}} - W_{\text{ПВср}}}{C - W_{\text{ПВср}}} \right)^2 \right], \quad (6)$$

где $n_{\text{МГmax}}$ – максимальная величина показателя степени для заданной области расчета; C – эмпирический коэффициент; $W_{\text{ПВср}}$ – полная влагоемкость в почвогрунтах, для которых показатель степени в формуле (5) принимает максимальное значение ($n_{\text{МГmax}}$).

Тестирование зависимости (6) по опытным данным показало, что во всех случаях $W_{\text{ПВср}} = 0,66$, а значения других эмпирических параметров зависят от области, на которую распространяется действие функции (6). Например, при расчете интенсивности влагопереноса в области $W_{\text{МГ}} < W \leq W_{\text{ПВ}}$ показатель степени $n_{\text{МГmax}} = 11,6$; а эмпирический коэффициент $C = 1$. В области $W_{\text{МГ}} < W \leq W_{\text{НВ}}$ соответственно, $n_{\text{МГmax}} = 5,9$; а $C = 1,1$.

Для минеральных почвогрунтов расчет коэффициентов влагопроводности в области $W_{\text{МГ}} < W \leq W_{\text{НВ}}$ по зависимостям (5) и (6) дает отклонения, не превышающие 5 % (рис. 3, б), что убедительно свидетельствует о возможности применения формул (2), (5), (6) в практических расчетах.

Заключение. Результаты анализа опытных данных по влагопроводности в ненасыщенной зоне порового пространства различных почвогрунтов позволили предложить способ определения гидрофизической характеристики, разделяющей «связанную» и «свободную» влагу. Аналитические исследования показали, что так называемая «критическая (максимальная молекулярная) влагоемкость» является синонимом «влажности разрыва капиллярной связи». Показано, что коэффициент влагопроводности в ненасыщенной зоне различных почвогрунтов связан с коэффициентом фильтрации и зависит от плотности сложения почвогрунтов, их максимальной гигроскопичности, текущей влажности и двух эмпирических параметров, которые, в свою очередь, зависят от диапазона изменения влажности в поровом пространстве, задаваемого при расчете.

Литература

1. Афанасик, Г. И. Расчет водного режима мелиорированных почвогрунтов / Г. И. Афанасик, О. Р. Армоник, Н. Г. Скворцов // Конструкции и расчеты осушительно-увлажнительных систем: сб. науч. тр. – Вып. 2. – Минск, 1976. – С. 75–86.
2. Ахмедов, А. Д. Моделирование параметров влагопереноса в зависимости от влажности почвы / А. Д. Ахмедов // Теоретические и технологические основы воспроизводства плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур: материалы междунар. науч.-практ. конф. / Рос. гос. аграр. ун-т – МСХА им. Тимирязева; сост.: Н. С. Матюк. – М., 2012. – С. 90–97.
3. Зейлигер, А. М. Сопоставление моделей водно-физических характеристик почв с экспериментальными данными / А. М. Зейлигер // Оптимизация процессов комплексного мелиоративного регулирования: сб. науч. тр. – М., 1985. – С. 61–72.
4. Аверьянов, С. Ф. Зависимость водопроницаемости почвогрунтов от содержания в них воздуха / С. Ф. Аверьянов // Доклады АН СССР. – 1949. – Т. 69, № 2. – С. 141–144.
5. Роде, А. А. Основы учения о почвенной влаге: в 2 т. / А. А. Роде. – Т. 1. Водные свойства почв и передвижение почвенной влаги. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 664 с.
6. Папкевич, И. А. Исследование формирования водного режима почвогрунтов в зоне аэрации на основе потенциальной теории передвижения влаги / И. А. Папкевич // Конструкции и расчеты осушительно-увлажнительных систем: сб. науч. тр. – Вып. 2. – Минск, 1976. – С. 177–194.
7. Качинский, Н. А. Физика почвы: в 3 ч. / Н. А. Качинский. – М.: Высшая школа, 1970. – Ч. 2. Водно-физические свойства и режимы почв. – 358 с.
8. Грунтоведение / под ред. Е. М. Сергеева. – М.: Изд-во МГУ, 1971. – 596 с.

A. P. LIKHATSEVICH

ANALYSIS OF HYDRO-PHYSICAL CHARACTERISTICS OF SOIL

Summary

The paper deals with calculated dependence connecting moisture moving velocity in pore space of aeration zone of various soils with their density, maximum water absorption, wetness and filtration coefficient.