

## 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.;  $K_\Phi$  – 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.

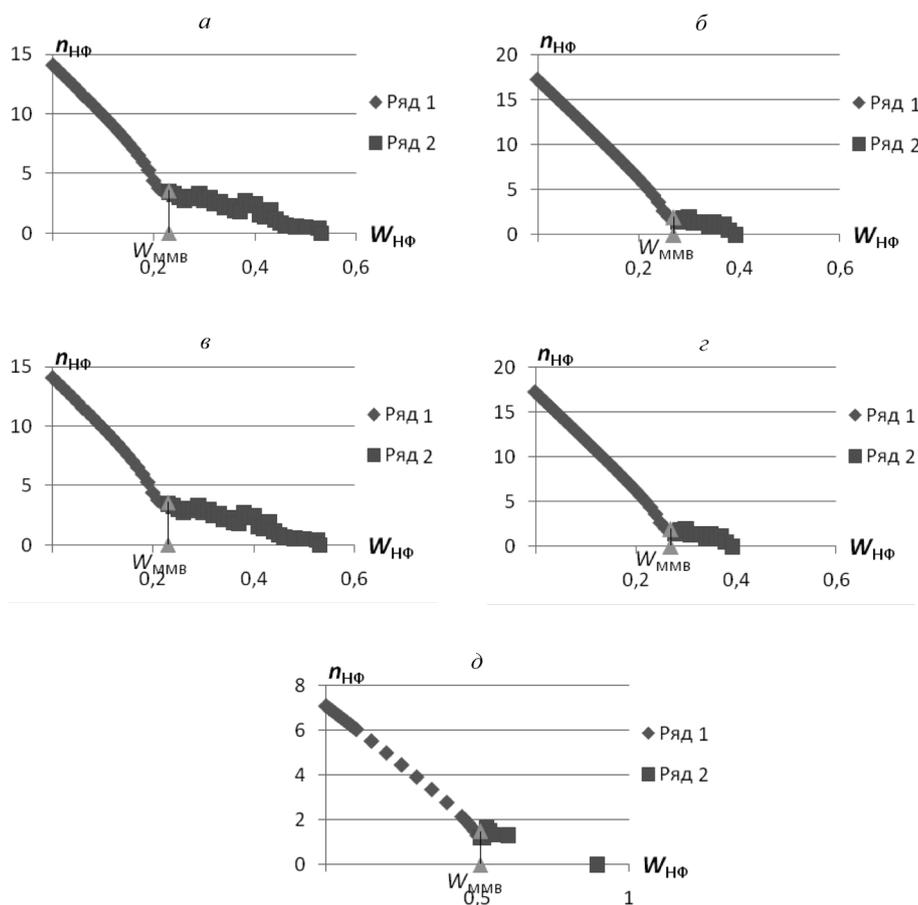


Рис. 1. Графики зависимости  $n_{HФ} = f(W_{HФ})$  для разных почвогрунтов: а – песок; б – оглеенный песчаник; в – жирная глина; г – плотный суглинок; д – торф; ряд 1 – связанная влага; ряд 2 – свободная влага

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 <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	0,41	0,46	0,53	0,39	0,90
$W_{НВ}$ , см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	0,21	0,27	0,31	0,34	0,62
$W_{ММВ}$ , см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	0,14	0,19	0,23	0,27	0,51
$W_{МГ}$ , см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	0,12	0,17	0,20	0,24	–
$W_{ММВ}/W_{НВ}$	<b>0,67</b>	<b>0,70</b>	<b>0,74</b>	<b>0,79</b>	<b>0,82</b>

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

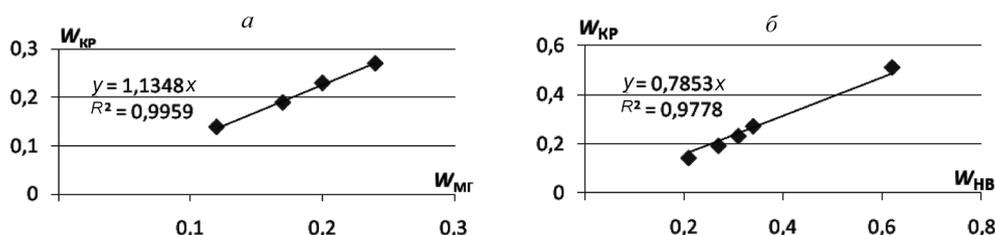


Рис. 2. Графики связи критической влагоемкости с почвенно-гидрологическими показателями: *а* – зависимость критической влагоемкости от максимальной гигроскопичности; *б* – связь критической влагоемкости с наименьшей влагоемкостью

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 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>.

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

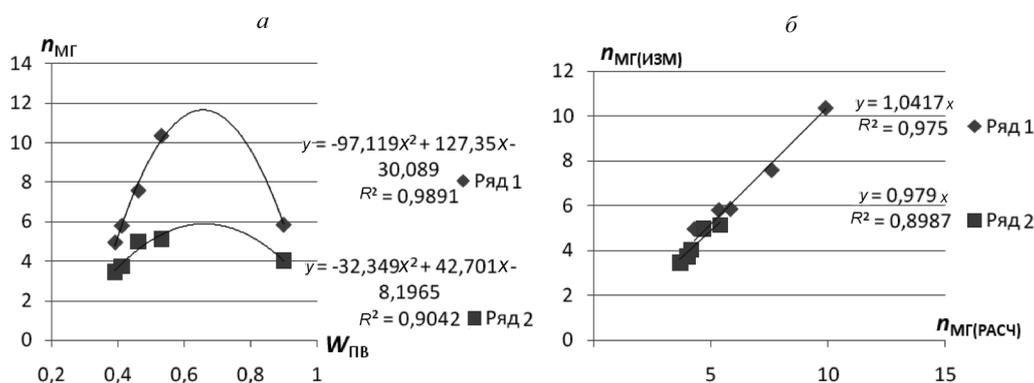


Рис. 3. Зависимость показателей степени в формуле (5) от плотности сложения почвогрунтов: а – эмпирическая связь; б – графики соответствия показателей степени, установленных по опытным данным и рассчитанных по формуле (6); ряд 1 – начальная фиксированная влажность в формуле (2) равна нулю; ряд 2 – начальная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