

УДК 631.434.12

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАПИЛЛЯРМЕТРИЧЕСКОГО И МИКРОСКОПИЧЕСКОГО МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОРИСТОСТИ НАСЫПНЫХ ПОЧВ

В. А. ТОРМАСОВ, А. В. ЖУРОВ, И. Д. ГРОМЫКО, Н. С. ОДИНОВА

(Почвенно-агрономический музей им. В. Р. Вильямса)

Неоднородность порового пространства почвы оказывает большое влияние на ее водно-воздушный режим и водные характеристики (величину капиллярного подъема влаги, коэффициента фильтрации, водопроницаемости и др.). Поэтому при исследовании водного режима почвы необходимо определять не только общую скважность, но и распределение почвенных пор по их размерам (дифференциальную пористость).

В лабораторных экспериментах и в модельных опытах при изучении указанных водных характеристик и побочных (химических) процессов, связанных с ними, широко используется метод насыпных почвенных колонн (лотков). Способ получения таких колонн общеизвестен и сводится к следующему: в емкость того или иного сечения и конфигурации засыпается почва в дисперсном состоянии до желаемой плотности. Укладка почвенных частиц характеризуется объемной массой, дифференциальной пористостью и при известном механическом составе исходного материала гипотетическими рассуждениями о возможных расположении элементарных почвенных частиц, форме и размерах пор.

В настоящей работе при определении пространственного распределения почвенных частиц, формирующих определенное поровое пространство, наряду с традиционными методами, в частности капиллярметрическим [1, 2], применен микроскопический анализ, тем самым гипотетический подход к микроструктуре и поровому пространству почвы заменен инструментальным.

В результате эксперимента нами получены сравнительные данные о дифференциации активных капиллярных пор различных насыпных колонн (песчаной и супесчаной) с помощью двух методов: капиллярметрического и микроскопического.

### Методика

В эксперименте для набивки почвенных колонн использовали отсеянный песок 0,1—0,25 мм и легкую супесь, приготовленную путем смешивания четырех частей кварцевого песка 0,1—0,25 мм и одной части пылеватого покровного суглинка  $\leq 0,1$  мм. Механический состав супеси следующий (%): фракции 0,25—0,1 мм — 80; 0,1—0,01 мм — 8,7; 0,01—0,005 мм — 2,5; 0,005—0,001 мм — 3,0;  $< 0,001$  мм — 5,5; потери от обработки  $\text{HCl}$  — 0,3.

Песок и супесь в воздушно-сухом состоянии засыпали при постоянном постукивании

в стеклянные колонки с внутренним диаметром 16 мм (для взятия шлифов и аншлифов) и металлические стаканы (высотой 5 см и диаметром 6,4 см) для капиллярметрических определений. Плотность в обоих случаях доводили примерно до 1,6 г/см<sup>3</sup>.

Исследование микроструктуры почвенного материала и анализ порового пространства насыпных почв проводили микроскопическим методом, описанным нами ранее [5, 6]. Дифференциальную пористость этих же почв определяли капиллярметрическим методом на капиллярметре ВНИИГиМ в модификации И. Д. Громыко.

## Микростроение почвенного материала и характеристика порового пространства в колонках песка и супеси

С учетом механического состава песка и супеси (частиц диаметром 0,1—0,25 соответственно 100 и 80%) пространственное распределение элементов в почвенных колонках с известной долей уверенности можно представить следующим образом.

Основу порового пространства полидисперсного материала формирует жесткий скелет из кварцевых песчинок сравнительно крупной фракции. Пространственное расположение частиц в S-матрице приближается, по-видимому, больше к кубической упаковке, чем к гексагональной. В случае песчаных колонок пространство между ними будет свободным, а в колонках с супесью заполнено физической глиной, причем остается место для пор.

Результаты традиционного анализа (табл. 1) показали, что общая пористость в обоих вариантах практически одинакова и составляет при-

Таблица 1

Физические свойства и пористость исследуемых почв

№ образца	Объемная масса	Плотность	Общая пористость, %	Гравитационные поры	Капиллярные поры			Связанная вода
					всего	активные <600 —	неактивные ≤3,5 мкм	
	г/см <sup>3</sup>					в % от общей порозности		
<b>Песок</b>								
1	1,53	2,65	42,3	0,7	41,6	36,8	4,1	0,7
2	1,60	2,65	39,5	0,6	38,9	33,6	4,6	0,7
3	1,62	2,65	38,8	0,6	38,2	31,4	6,1	0,7
Среднее	1,58	2,65	40,2	0,6	39,6	33,9	4,9	0,7
<b>Супесь</b>								
1	1,58	2,65	40,3	7,7	32,6	22,5	6,1	4,0
2	1,60	2,65	39,5	6,2	33,3	22,3	7,0	4,0
3	1,62	2,65	38,8	5,6	32,2	22,2	6,9	4,1
Среднее	1,60	2,65	39,5	6,5	33,0	22,3	6,7	4,0

мерно 40%, что характерно для песчаных почв с кубической упаковкой и соответствует «идеальной почве» по А. А. Роде [3]. Как мы видим, экспериментальные данные довольно четко соответствуют нашим гипотетическим представлениям.

В случае набивки до одинаковой объемной массы общая пористость в колонках с супесью должна быть примерно такой же, как в колонках с песком, при значительном различии в структуре. От общей суммы пор 0,6% для песка и 6,5% для супеси составляют гравитационные поры, то есть супесь содержит в 10 раз больше гравитационных пор. Объясняется это как сложением почвенного материала, так и возможностью появления защемленного воздуха в супеси при капиллярном насыщении. В этом случае гравитационных пор может вообще не быть.

Из табл. 1 видно, что активных капиллярных пор в песке в 1,5 раза больше, чем в супеси, и, наоборот, микропор (плюс связанная вода) вдвое больше в супеси, чем в песке. Это свидетельствует о резком различии в строении порового пространства исследуемого почвенного материала.

Дифференциация капиллярных пор по размерам (табл. 2) в колонках песка и супеси имеет ряд закономерностей. В распределении пор в песке наблюдаются три ясно выраженных максимума: группа пор от 100 до 60 мкм составляет почти 50% капиллярной пористости, а от 60 до 15 мкм — 40%; третий, меньший пик приходится на группу пор разме-

## Дифференциация капиллярных пор (% от их объема)

№ образца	Дифференциация капиллярных пор (% от их объема)									
	600—200	200—100	100—60	60—30	30—15	15—10	10—6	6—3,5	≤3,5	
Песок										
1	0,7	1,3	45,4	6,5	28,4	2,0	2,4	1,3	12,0	
2	0,5	1,0	52,6	7,3	20,3	2,1	2,2	1,7	12,1	
3	0,3	1,3	45,1	7,5	21,5	2,5	2,3	1,5	18,0	
Среднее	0,5	1,2	47,8	7,1	23,4	2,2	2,3	1,5	14,0	
Супесь										
1	0,7	3,0	19,8	18,3	14,6	7,1	5,0	0,9	30,6	
2	0,6	2,8	19,8	18,5	13,0	6,0	3,9	2,2	33,2	
3	0,8	2,1	17,4	20,6	12,6	6,3	4,3	2,5	33,1	
Среднее	0,7	2,6	19,0	19,1	13,5	6,5	4,4	1,9	32,3	

ром  $\leq 3,5$  мкм. Первые два максимума — поры сравнительно крупные, сформированные скелетом кварцевого песка в кубической упаковке. Третий максимум — поры тонкие, образованные за счет контактов песчаной фракции. Последней группы пор ( $\leq 3,5$  мкм) в действительности может и не быть. Этот вопрос будет более подробно освещен в следующем разделе настоящей работы.

В супесчаной почве нет таких четко выраженных пиков, как в песчаной, однако на группу пор от 100 до 15 мкм приходится более 50% капиллярной пористости. Второй максимум падает на группу пор с выходными отверстиями диаметром  $\leq 3,5$  мкм. Наличие двух максимумов свидетельствует о разнопористости супесчаного материала. Первый максимум соответствует группе более крупных пор, сформированных, как и в первом случае, зернами кварцевого песка, второй — группе пор, находящейся в тонкодисперсном материале.

Изучение сложения почвенного материала микроскопическим способом (рис. 1, а) показало, что, как и теоретически предполагалось, частицы кварцевого песка (песчаные колонки) образуют вещественную основу шлифа и формируют скелет почвы с зернистой упаковкой *S*-матрицы [4].

В колонках супеси скелетные зерна и плазма размещены относительно друг друга следующим образом: чаще отдельно взятое кварцевое зерно со всех сторон (или с одной стороны) окружено глиной; поры приурочены к контуру глинистого вещества и сформированы частицами собственно глины, а также глины и кварца (рис. 1, б); поры, образованные только частицами песка, встречаются намного реже и нетипичны. Более крупные поры (из числа видимых) соединяются между собой посредством более мелких пор, в результате чего образуется непрерывная их система, простирающаяся по всей плоскости шлифа. Поры в основном неправильной формы, не имеющие четких границ, как это наблюдается в естественной почве, и составляют каналную и фрактурную пористость *S*-матрицы.

Таким образом, при набивке насыпных колонн полидисперсным сыпучим материалом, состоящим из отсеянной фракции песка (0,1—0,25 мкм), кварцевые песчинки укладываются, контактируя друг с другом, составляя «идеальную почву» с кубической упаковкой и зернистой структурой *S*-матрицы. В колонках с супесью кварцевые песчинки укладываются, не контактируя между собой, а тонкодисперсное вещество (физическая глина), прерываясь порами, образует своеобразные мостики между частицами песка, составляя агломероплазмовую структуру *S*-матрицы [4].

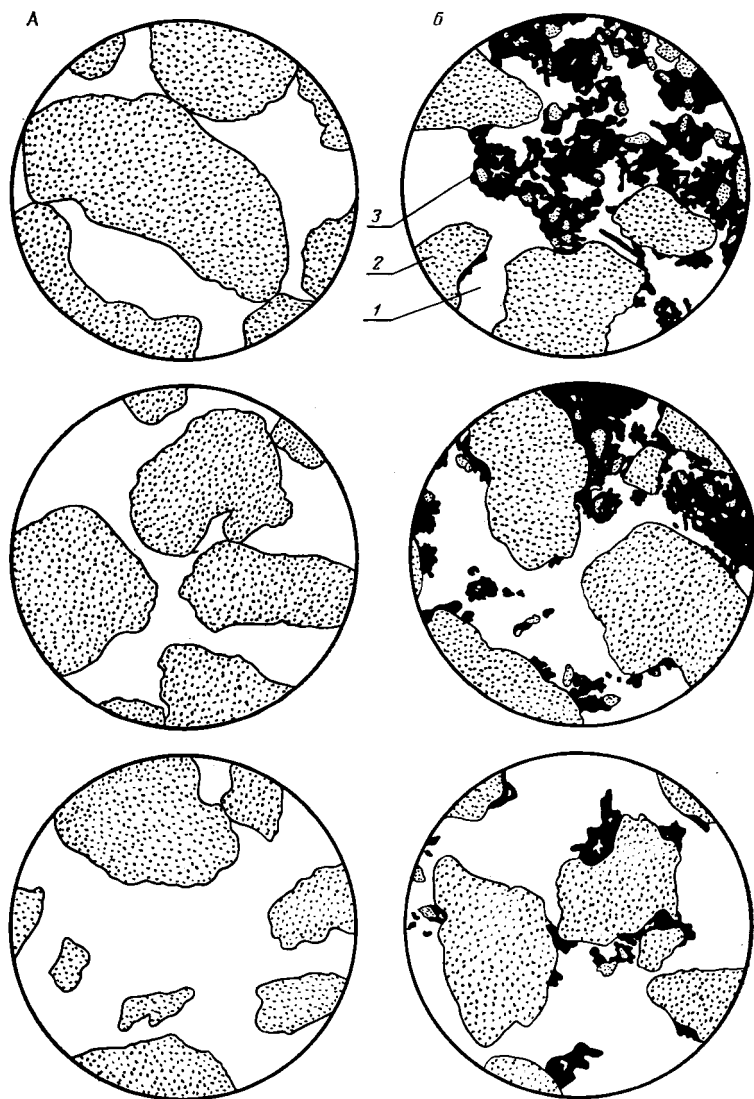


Рис. 1. Микросложение и структура порового пространства в насыпных колонках песка (А) и супеси (Б).

Дешифрованные микрофотографии аншлифов (собственное увеличение микроскопа  $\times 315$ ); 1 — пора; 2 — зерно кварца; 3 — плазма и поры, не видимые при этом увеличении.

Как показал микроскопический анализ, картина пространственного размещения почвенных частиц в насыпных колонках значительно сложнее, чем это можно представить на основании только макроскопических методов.

#### Сравнительная оценка активной капиллярной пористости капиллярметрическим и микроскопическим методами

Среди различных методов изучения пористости почвы наиболее часто употребляется капиллярметрический способ. В этом случае для подразделения капиллярных пор по величине обычно пользуются зависимостью между диаметром пор и капиллярным натяжением, удерживающим воду в порах. Эта зависимость выражается уравнением Жюрена, применяемым для гидрофильных капилляров.

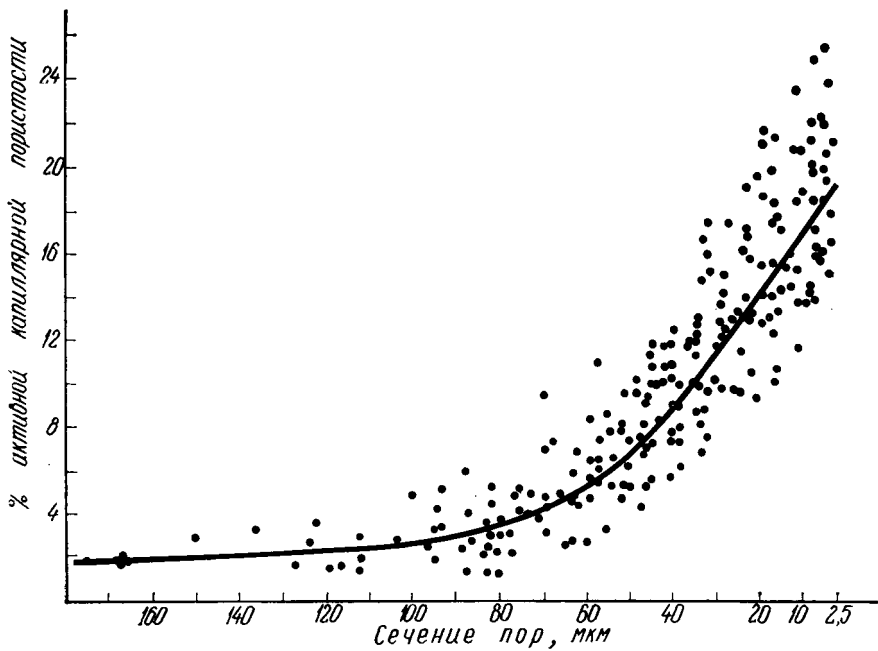


Рис. 2. Дифференциация поперечников пор в супеси.

В связи с тем, что уравнение Жюрена справедливо только для цилиндрических капилляров, а почвенные поры имеют неправильную форму, вычисленный по этому уравнению диаметр почвенных пор называется «эффективным» или эквивалентным диаметром. Это значит, что почвенные поры неправильной формы по их водоудерживающей силе соответствуют цилиндрическим капиллярам данного диаметра.

Такой подход к определению пористости почвы, хотя и является традиционным и инструментальным, пригоден в основном для сравнительной характеристики различных почв или разных горизонтов одной и той же почвы. Для характеристики же самих пор внутри почвы (структура, форма, сечение, количество различных по величине пор в определенном объеме) одного капиллярметрического метода мало. Здесь на помощь приходит микроскопический способ. Существенный интерес поэтому представляет сравнение результатов анализа активных капиллярных пор, выполненного микрофотографическим и вакуумкапиллярметрическими способами.

Ввиду слабой набухаемости используемого в опыте почвенного материала в значительной степени исключался эффект, связанный с изменением порового пространства при насыщении почв перед капиллярметрированием.

Представляется также возможность определить, в какой степени эффективные диаметры, или диаметры «входных» отверстий (то есть наиболее узкие сечения конкретных групп пор), полученные на

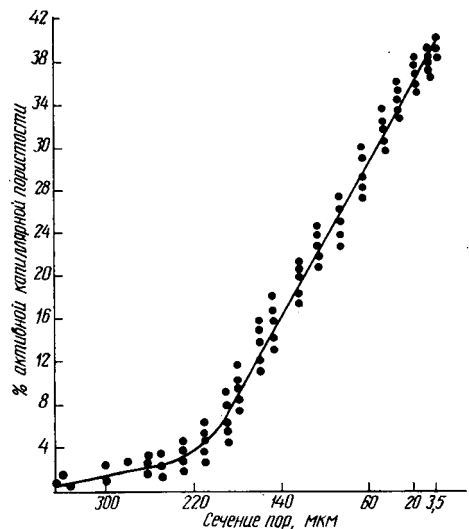


Рис. 3. Дифференциация поперечников пор в песке.

Статистические показатели активной капиллярной пористости на аншлифах

Почва	Повторность	Среднее арифметическое	Среднее квадратическое отклонение	Кoeffициент вариации, %	Ошибка среднего арифметического	Точность определения, %	Критерий достоверности
Песок	5	41,4	2,8	15	$\pm 0,55$	$\pm 2,5$	19
Супесь	21	19,4	3,5	18	$\pm 0,75$	$\pm 4,0$	26

капиллярметре, отличаются от реальных сечений пор, наблюдаемых в плоскости поля зрения микроскопа.

Из рис. 2 и 3 видно, что распределение сечений пор по размерам (а точнее, коммулята сечений пор, видимых при данном увеличении микроскопа) значительно различается для песка и супеси. Для колонок супеси (рис. 2) кривая расположена более полого по отношению к оси ординат, что свидетельствует о наличии значительно большего количества мелких пор, чем в песке (рис. 3). Наблюдается также заметный разброс экспериментальных точек. Однако, как показали статистические расчеты (табл. 3), средняя величина активной капиллярной пористости незначительно варьирует и может быть определена с достаточно высокой точностью.

Необходимо отметить, что для колонок песка вся общая пористость — 41,4% (табл. 4), определенная микроскопическим способом, соответствует активной капиллярной пористости (600—3,5 мкм), а по капиллярметрическим данным последняя составляет лишь 33,9%. Таким образом, колонки кварцевого песка не имеют ни гравитационной пористости, ни микропор диаметром  $\leq 3,5$  мкм.

Содержание активных капиллярных пор в супеси при определении микроскопическим способом ( $19,4\% \pm 3,5$ ) лишь немного меньше содержания этих же пор, полученного капиллярметрическим способом (22,3%).

Определение дифференциации активной капиллярной пористости (табл. 4) в колонках кварцевого песка и супеси с помощью капиллярметрического (объемного) и микроскопического методов дало весьма неодинаковые результаты.

При использовании капиллярметрического способа значительно занижается содержание активных капиллярных пор крупного диаметра (группы 600—200, 200—100 и 60—30 мкм) и искусственно увеличивается количество более мелких пор. Это связано с явлением капиллярного гистерезиса и выражается в том, что величина отсасывающего давления определяется не диаметром почвенных пор, а диаметром меньшего входного отверстия в пору. Диаметр же почвенной поры, как правило, всегда больше диаметра входной (выходной) поры [2].

Таблица 4

Дифференциация пор по размерам (% от активной капиллярной пористости)

Метод	Поры от 600 до 3,5 мкм, %	Диаметр пор (сечений), мкм							
		>600—200	200—100	100—60	60—30	30—15	15—10	10—6	6—3,5
Кварцевый песок									
Капиллярметрический	33,9	0,6	1,4	55,7	8,2	27,1	2,6	2,7	1,7
Микроскопический	41,4	13,1	45,5	17,9	13,1	6,1	2,1	1,3	0,9
Супесь									
Капиллярметрический	22,3	0,9	3,8	27,0	26,3	22,3	10,2	6,2	2,7
Микроскопический	19,4	0	13,7	13,8	33,4	21,2	7,2	8,1	2,6

Считается, что воду из капилляра можно отсосать, если противопоставить менисковым силам противоположно направленную большую силу. Сила натяжения менисков характеризуется высотой капиллярного подъема столба воды, а воздействие вакуумированием — ее противоположно направленным аналогом, выраженным в единицах давления водного столба. Следовательно, в системе капилляров с переменным поперечником (рис. 4, а), чтобы отсосать воду из наиболее широкого звена с диаметром ( $d^1$ ), следует прежде преодолеть сопротивление менисковых сил в звене с меньшим диаметром ( $d$ ), для чего требуется создать разрежение, соответствующее подъему столба воды в капилляре с диаметром  $d$  (рис. 4, б), то есть значительно большее, чем для осушения капилляра с диаметром  $d^1$ .

Однако формула Жюрена предполагает линейную связь между диаметром капилляра и степенью разрежения ( $d = 2r = \frac{30}{H}$  мм). Если учесть, что при отсасывании получают порции воды в объемном выражении, являющиеся синонимом объема пор, то вода, извлеченная из более крупного звена поры, будет отнесена за счет поры меньшего размера, и тем самым количество (объем) крупных пор искусственно занижается, а мелких увеличивается.

Микрофотографический метод дает возможность определять не только объемное (площадное) содержание поперечников пор, но и содержание отдельных групп пор в процентах от их количества. Из рис. 5 видно, что в песчаной почве преобладают поры с поперечником от 200 до 15 мкм, а в супесчаной почве — от 60 до 6 мкм.

Необходимо отметить, что объем, занимаемый отдельными группами пор, не всегда пропорционален их количеству. Например, в кварцевом песке группа пор диаметром от 600 до 200 мкм составляет около 13% объема (табл. 4) и всего около 3,5% общего их количества, то есть из 100 пор, падающих на поле зрения микроскопа, лишь у трех-четырех пор диаметр от 600 до 200 мкм. Однако, как правило, в большинстве случаев объемное содержание отдельных групп пор пропорционально их количеству, что хорошо видно из табл. 4 и рис. 5.

Таким образом, при изучении внутренней структуры почвенного материала микроскопический метод в сочетании с традиционными макроскопическими методами является достаточно эффективным средством выявления особенностей сложения почв и строения их порового пространства.

## Выводы

1. При набивке насыпных колонн полидисперсным сыпучим материалом, состоящим в одном случае из отсеянной фракции кварцевого

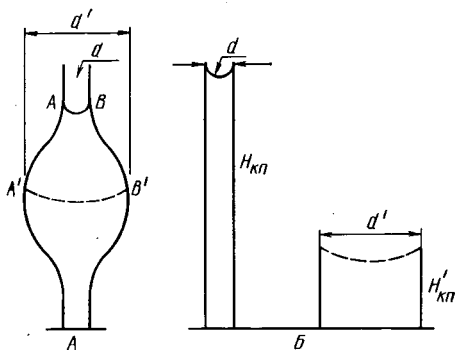


Рис. 4. Капиллярные явления в порах с переменным диаметром.

А — четочный капилляр; Б — цилиндрические составляющие.

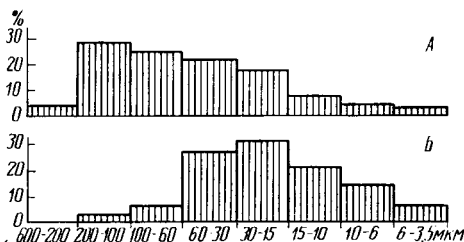


Рис. 5. Частота встречаемости различных поперечников, % от их общего количества.

А — песок; Б — супесь.

песка (0,1—0,25 мм) и в другом из четырех частей этого же песка и од- части физической глины, наблюдается различный характер упаковки почвенного материала.

В песчаных колонках частицы кварца укладываются, контактируя друг с другом и формируя жесткий скелет почвы зернистой структуры. В колонках супеси частицы песка укладываются, не контактируя друг с другом, а плазменное вещество (физическая глина), прерываясь порами, образует своеобразные мостики между скелетными зернами, определяя интертекстурное микросложение почвы.

2. Поровое пространство насыпной почвы является непрерывным. В отличие от твердой фазы, где контур минерала всегда замкнут, поры, ветвась, то расширяются, то сужаются, переходя непосредственно одной части физической глины, наблюдается различный характер упаковки почвенного материала.

3. Сравнение определения дифференциальной пористости в насыпных почвах с использованием микроскопического и капиллярметрического методов показало, что в последнем случае значительно занижается содержание активных капиллярных пор крупного диаметра (группы пор 600—200, 200—100 и 60—30 мкм) и искусственно увеличивается количество более мелких пор.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Астапов С. В. Мелиоративное почвоведение (практикум). М., Сельхозгиз, 1958. — 2. Долгов С. И. Агрофизические методы исследования почв. М., «Наука», 1966. — 3. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Л., Гидрометеиздат, 1965. — 4. Розанов Б. Г. Генетическая морфология почв. Изд-во МГУ, 1975. — 5. Журов А. В., Тормасов В. А. Исследование структуры укладки почвенного материала в насыпной колонке. «Почвоведение», 1973, № 8, с. 135—138. — 6. Журов А. В., Тормасов В. А., Одинокова Н. С. Изучение порового пространства почвы микроскопическим способом. «Изв. ТСХА», 1976, вып. 3, с. 114—125.

*Статья поступила 18 августа 1978 г.*

#### SUMMARY

Information on spatial distribution of soil particles causing the porosity of artificial soils is presented in the paper. Pore space of an artificial soil is shown to be continuous. Comparative characteristic of porosity determined by means of capillarimetric and microscopic methods is presented. The comparison has shown that capillarimetric method considerably reduces the number of active capillary pores of big diameter (600—30 mkm) artificially increasing the number of pores of smaller size.