

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЩЕЛЕВОМ ЛОТКЕ

Х. Х. ПАРМАСТО

При исследовании динамики грунтовых вод наиболее надежными являются наблюдения в полевых условиях.

Однако при изучении неустановившегося движения в условиях анизотропных грунтов полевые наблюдения не дают точной картины, так как они связаны с местными условиями, а граничные условия обычно не определены. В лабораторных же условиях возможно моделирование в разных вариантах с заданными граничными условиями.

Теоретическое исследование неустановившейся фильтрации затруднительно, так как форма кривой депрессии в начальный момент неизвестна. Пока отсутствует и общее математическое решение для случая неустановившейся фильтрации (даже для изотропного грунта), так как уравнение фильтрации является нелинейным дифференциальным уравнением с частными производными второго порядка. Процесс фильтрации в двухслойной среде, имеющий место при осушении глинистых почв, еще сложнее. Математическое решение для случая, когда кривая депрессии при фильтрации через двухслойный грунт находится в верхнем горизонте, дано П. Ф. Полубариновой-Кочиной [6]. Для случая, когда кривая депрессии частично находится и в нижнем горизонте, математического решения нет. В связи с этим для выяснения общих закономерностей целесообразно использование лабораторных методов.

Для лабораторного исследования фильтрации существует ряд методов, из которых важнейшими являются метод электрогидродинамической аналогии (ЭГДА) и моделирование в грунтовом и щелевом лотке. При пользовании методом ЭГДА свободная поверхность находится путем постепенного приближения, а моделирование неустановившейся фильтрации невозможно. При моделировании в щелевом лотке кривая депрессии получается непосредственно, автоматически, и имеется возможность определить пьезометрическое давление в любой точке. С помощью красителей можно наблюдать и линии токов. Особенно удобно моделировать таким образом неустановившуюся фильтрацию. Ранее проведенные опыты хорошо совпадают с теорией [6, 7].

Моделирование фильтрационного потока в щелевом лотке основано на аналогии между ламинарным движением жидкости в щели между пластинками и движением воды в грунте. Теория лотка изложена В. И. Аравинным [1].

Для исследования неустановившегося движения нами был построен из стекла один лоток для моделирования установившейся и 4 лотка для моделирования неустановившейся фильтрации в двухслойной среде. 3 лотка имели разные соотношения коэффициентов проницаемости верхнего и нижнего слоев, условно принимаемых за пахотный и подпахотный слои, а в четвертом лотке моделировалась уменьшающаяся по глубине подпахотного горизонта проницаемость.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

### Установившаяся фильтрация

1. Для схемы, при которой весь подпахотный горизонт покрыт малым слоем воды одной и той же высоты, удельный расход определен по гидродинамической сетке в лотке (рис. 1) при  $\frac{l}{T} = 1,5$



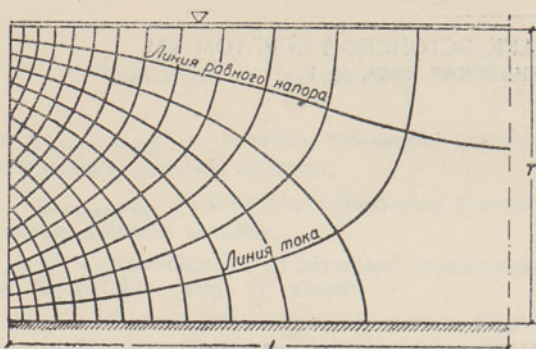


Рис. 1. Гидродинамическая сетка для случая, когда уровень грунтовых вод выше поверхности земли.

$$q' = 0,72 kT,$$

где  $k$  — коэффициент фильтрации;  
 $T$  — толщина фильтрующего грунта.

Теоретически получено, что при  $\frac{l}{T} = 2,0$   $q' = 0,72 kT$  и при  $\frac{l}{T} = \infty$   $q' = 0,74 kT$  [4], где  $l$  — половина расстояния между дренами или канавами.

Полученные данные показывают, что результаты опытов хорошо совпадают с теоретическими значениями.

Когда подпахотный горизонт заполнен слоем воды одной высоты, основная часть общего расхода в начальный момент поступает из зоны, расположенной вблизи дрены (рис. 2), где  $\frac{l}{T} = 1,5$ . На рис. 2 на оси абсцисс отмечено расстояние места определения элементарного расхода от дрены в долях от половины расстояния между дренами.

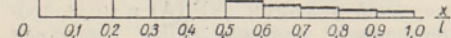


Рис. 2. Элементарные расходы в зависимости от расстояний от дрены.

депрессии элементарный расход между двумя линиями токов из зоны, находящейся в середине между дренами, увеличивается. Это значит, что увеличивается и скорость понижения уровня грунтовых вод в этой зоне.

2. При внутреннем питании грунтовых вод, когда образована кривая депрессии, линии равных напоров не являются вертикальными, как это предполагается при использовании гидравлической теории (предположение Дюпюи). Уклон свободной поверхности жидкости также неточно соответствует градиенту напора (рис. 3). Исходя из этого является неточной и формула Ротэ. Однако с увеличением соотношения  $\frac{l}{T}$  влияние «аномальной» части (зоны вблизи дрена и в середине междудренья) уменьшается.

### Неустановившаяся фильтрация

Цель опытов заключалась в выяснении механизма работы дренажа при двуслойной среде с неустановившейся фильтрацией.



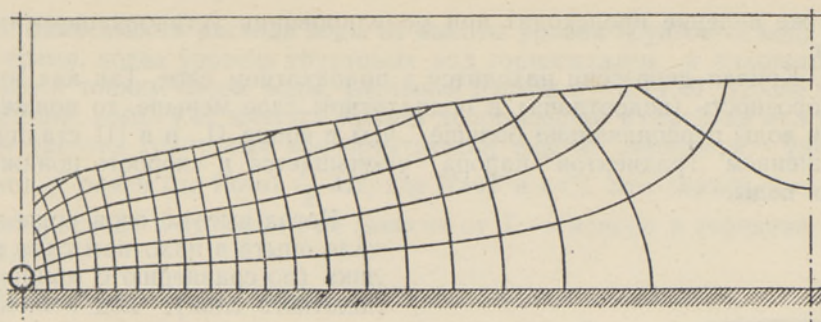


Рис. 3. Гидродинамическая сетка при внутреннем питании грунтовых вод.

Рассматривались следующие вопросы: 1) ход освобождения пахотного горизонта от воды, 2) время освобождения пахотного горизонта от воды, 3) зависимость расхода воды от уровня грунтовых вод, 4) влияние водопроницаемости засыпки дренажной траншеи на время освобождения пахотного горизонта от воды и 5) форма депрессионной кривой.

Водопроницаемость пахотного слоя при принятых размерах щелей в лотке была в 125 раз больше водопроницаемости подпахотного горизонта.

**1. Ход освобождения пахотного слоя от гравитационной воды.** При большой (по сравнению с мощностью пахотного слоя) высоте воды в пахотном горизонте можно проследить понижение уровня грунтовой воды в середине между дренами и разбить его на четыре стадии (рис. 4).

**I.** Вначале горизонтальная свободная поверхность переходит в линию депрессии. Сток происходит в пахотном и подпахотном слое прямо в засыпку. Понижение свободной поверхности в середине между дренами относительно малое. Происходит интенсивный сток из области, непосредственно прилегающей к дрене.

**II.** Образовалась кривая депрессии, которая находится сперва целиком в пахотном слое, а затем опускается в подпахотный слой (в дренажную траншею). Позже место пересечения кривой депрессии с подпахотным слоем удаляется от дренажной траншеи. Происходит сильный сток вдоль пахотного слоя. Когда точка пересечения кривой депрессии с линией, отделяющей пахотный и подпахотный слой, находится на некотором расстоянии от дренажной траншеи, приток воды к дрене происходит только через подпахотный слой. С понижением слоя воды в пахотном слое уменьшается уклон кривой депрессии, уменьшаются также сток вдоль пахотного слоя и скорость понижения уровня грунтовых вод.

**III.** Сток вдоль пахотного слоя практически окончен несмотря на то, что половина депрессионной кривой еще находится в пахотном слое ( $\xi=0,5$ ). В конце стадии увеличиваются как сток из зоны, расположенной в середине между дренами, так и скорость понижения уровня воды.

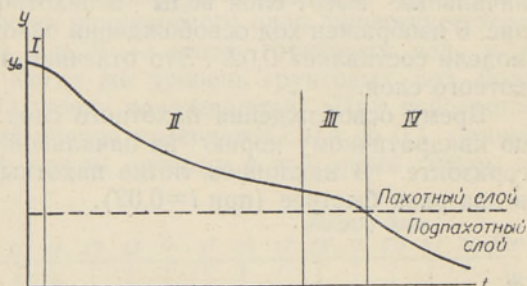


Рис. 4. Ход освобождения пахотного слоя от воды при большой высоте начального слоя воды:  $t$  — время от начала опыта,  $y$  — высота уровня воды в середине между дренами над поверхности дрен,  $y_0$  — высота уровня воды в начале опыта.



Такое же явление происходит при моделировании установившегося движения.

IV. Кривая депрессии находится в подпахотном слое. Так как активная порозность (водоотдача) в подпахотном слое меньше, то понижение уровня воды первоначально больше, чем в конце II и в III стадий. С уменьшением градиентов напора уменьшается и скорость понижения уровня воды.

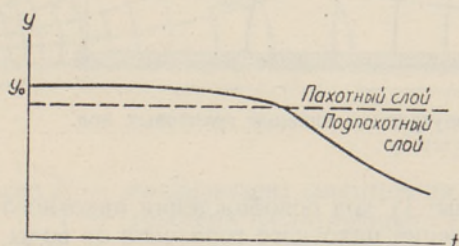


Рис. 5. Ход освобождения пахотного слоя от воды при небольшой высоте начального слоя воды:  $t$  — время от начала опыта,  $y$  — высота уровня воды в середине между дренами над поверхностью дрен,  $y_0$  — высота уровня воды в начале опыта.

Когда высота слоя воды в начале опыта в пахотном слое невелика (по сравнению с мощностью пахотного слоя), ход понижения уровня грунтовых вод происходит иначе (рис. 5). Хотя зона вблизи дрена освобождалась сравнительно быстро, это не влияет на ход понижения уровня в середине между дренами, так как отсутствует сток вдоль пахотного слоя и последний освобождается от воды только через подпахотный слой. Быстрое понижение уровня воды начинается после опускания кривой депрессии в подпахотный слой.

**2. Время освобождения пахотного слоя от гравитационной воды.** На рис. 6 и 7 показан ход освобождения пахотного слоя в зависимости от начальных высот слоя воды в пахотном слое. Пунктирной линией на рис. 6 изображен ход освобождения пахотного слоя, когда уклон щелевой модели составляет 0,02. Это отвечает профилированию подошвы подпахотного слоя.

Время освобождения пахотного слоя приблизительно пропорционально квадратичному корню из начальной высоты слоя воды в пахотном горизонте. В наклонном лотке пахотный слой освобождается примерно в два раза быстрее (при  $i=0,02$ ).

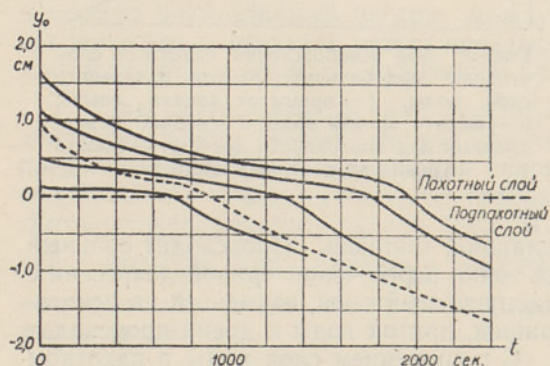


Рис. 6. Время освобождения пахотного слоя от воды в зависимости от начальной высоты слоя воды:  $t$  — время освобождения пахотного слоя от воды,  $y_0$  — начальная высота слоя воды в пахотном слое.

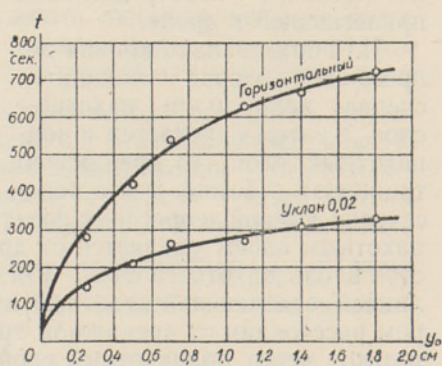


Рис. 7. Влияние уклона подошвы пахотного слоя на время освобождения пахотного слоя от воды:  $t$  — время освобождения пахотного слоя от воды,  $y_0$  — начальная высота слоя воды в пахотном слое.



3. Зависимость расхода воды от высоты уровня грунтовых вод. В первое время, когда уровень грунтовых вод горизонтален и пахотный слой заполнен тонким слоем воды, удельный расход  $q' = 0,74 kT$ . После начала движения, когда уже имеется кривая депрессии, но в середине между дренами уровень грунтовых вод практически еще не понизился, удельный расход  $q'$  равен (по Ротэ)  $\frac{H}{x} kH$ , где  $H \approx T$  и  $x < l$ . Это значит, что уменьшение расхода в это время не зависит от  $T$  — напора в середине между дренами.

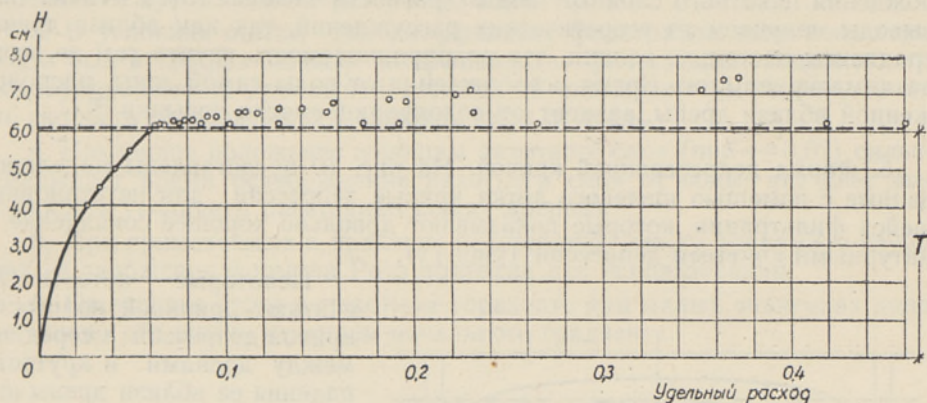


Рис. 8. Кривая расхода в слоистом грунте.

На основе ряда опытов составлена кривая расходов (рис. 8), по которой можно заметить, что в границах подпахотного слоя существует определенная зависимость  $q = j(H)$ , где  $H$  — напор грунтовых вод, и эта зависимость параболическая. Когда же уровень грунтовых вод поднимается в пахотный слой ( $H \approx T$ ), точки рассеиваются. При небольшой высоте начального слоя удельный расход изменяется с 0,4 до 0,1, причем высота уровня воды в середине между дренами в это время совсем не изменяется.

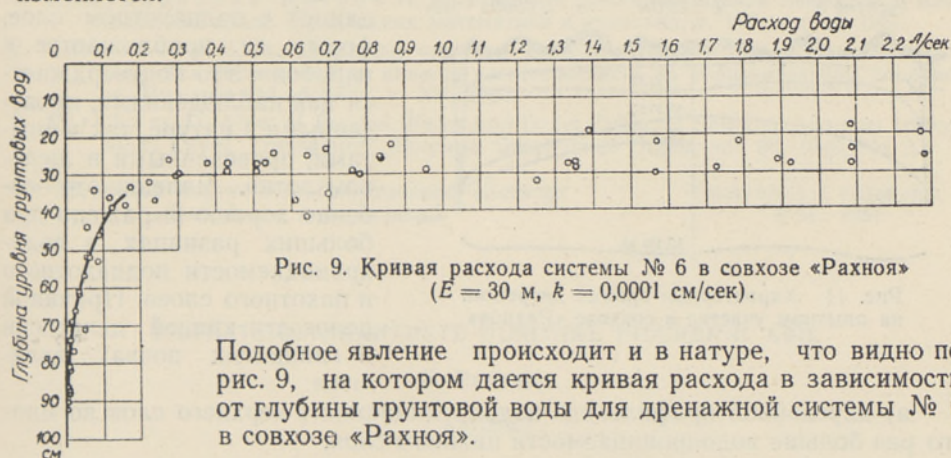


Рис. 9. Кривая расхода системы № 6 в совхозе «Рахноя» ( $E = 30$  м,  $k = 0,0001$  см/сек).

Подобное явление происходит и в природе, что видно по рис. 9, на котором дается кривая расхода в зависимости от глубины грунтовой воды для дренажной системы № 6 в совхозе «Рахноя».

4. Влияние водопроницаемости засыпки дренажной траншеи на время освобождения пахотного слоя от воды. Для выяснения этого вопроса определено время освобождения пахотного слоя от гравитационной воды при различных начальных высотах слоев воды в пахотном горизонте и при разной водопроницаемости засыпки, а именно:



- а) водопроницаемость засыпки и пахотного слоя равны,
- б) водопроницаемость засыпки примерно в 20 раз меньше водопроницаемости пахотного слоя,
- в) водопроницаемость засыпки равна водопроницаемости подпахотного слоя; это значит, что она в 125 раз меньше проницаемости пахотного слоя.

Выяснено, что при данных соотношениях водопроницаемость засыпки дренажных траншей практически не оказывает влияния на время освобождения пахотного слоя от воды (разность меньше 5%). Такие же выводы получаем из теоретических рассуждений, так как вблизи дрены градиенты настолько велики, что водопроницаемость грунта там не всегда лимитирует сток. Время освобождения от воды самой зоны, расположенной вблизи дрены, зависит от водопроницаемости засыпки [2].

**5. Форма депрессионной кривой.** На рис. 10 представлены моделированные с помощью щелевого лотка кривые депрессии для неустановившейся фильтрации, которые показывают довольно хорошее совпадение с натурными кривыми депрессии (рис. 11).

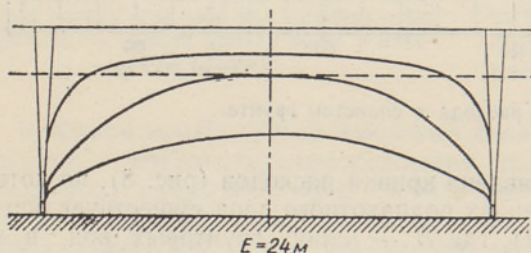


Рис. 10. Кривые депрессии в щелевом лотке.

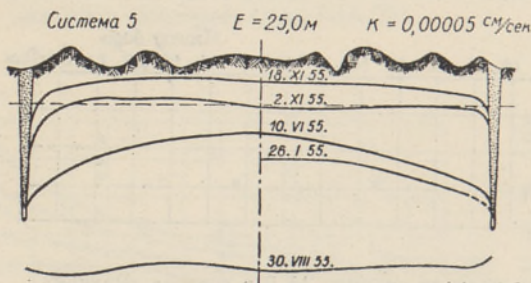


Рис. 11. Характерные кривые депрессии на опытном участке в совхозе «Рахноя».

Некоторые авторы [3] считают причиной пологости кривой депрессии в середине между дренами и крутости падения ее вблизи дрены интенсивное испарение в глинистых почвах. Но наблюдения, произведенные поздней осенью, когда испарение незначительно, показывают, что в том случае, когда кривая депрессии находится в пахотном слое, она всегда почти горизонтальна. Напротив, когда депрессионная кривая находится по всей своей длине в подпахотном слое, форма ее приближается к параболе. Это подтверждается как наблюдениями, проведенными в натуре, так и опытами, проведенными в щелевом лотке. Явление это особенно хорошо выражено при больших разностях в водопроницаемости подпахотного и пахотного слоев. Причиной пологости кривой депрессии в глинистых почвах являются:

- а) двуслойной профиль, где водопроницаемость верхнего слоя во много раз больше водопроницаемости нижнего слоя,
- б) увеличения плотности и уменьшение водопроницаемости в нижнем слое.



## Выводы

1. Для исследования фильтрационных явлений при осушении глинистых почв, где водопроницаемость пахотного слоя во много раз больше водопроницаемости подпахотного, можно использовать щелевой лоток, так как полученные таким образом результаты (кривые расходов и депрессий) хорошо совпадают с результатами, полученными в натуре.

2. Освобождение пахотного слоя от гравитационной воды происходит в основном путем стока через подпахотный слой.

3. В условиях опыта, где коэффициент фильтрации пахотного горизонта был в 125 раз больше коэффициента фильтрации подпахотного, водопроницаемость дренажной засыпки не оказывает заметного влияния на скорость освобождения пахотного слоя от воды.

4. Наклонное положение подошвы пахотного слоя (при  $i=0,02$ ) сильно уменьшает время освобождения пахотного слоя от воды, что дает возможность увеличить расстояние между дренами.

5. При применяемых в практике расстояниях между дренами и глубинах их заложения формула Ротэ пригодна для использования.

6. Отсутствие стока в пахотном горизонте при малых значениях напора можно объяснить влиянием начального градиента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аравин В. И., Основные вопросы экспериментального исследования движения грунтовых вод в щелевом лотке. Известия Научно-исследовательского института гидротехники, т. XXIII, 1938.
2. Ведерников В. В., Теория фильтрации и ее применение в области ирригации и дренажа. М.—Л., 1939.
3. Гейтман В. Г. и Писарьков Х. А., Осушение сельскохозяйственных земель. М., 1955.
4. Нельсон-Скорняков Ф. Б., Фильтрация в однородной среде. Москва, 1949.
5. Полубаринова-Кочина П. Я., О некоторых неустановившихся движениях грунтовых вод. Изв. АН СССР, ОТН, 1949, № 6.
6. Полубаринова-Кочина П. Я., К теории неустановившихся движений в многослойной среде. Прикладная математика и механика, т. XV, вып. 4, 1951.
7. Семчинова М. М., Сравнение опытных данных с теорией для случая неустановившейся фильтрации из канала, расположенного на горизонтальном водоупоре. Инженерный сборник, т. XV, 1953.
8. Kirkham, D., Flow of Ponded Water into Drain Tubes in Soil Overlying an Impervious Layer. Transaction, American Geophysical Union, vol. 30, 1949, No. 3.

Эстонский научно-исследовательский институт  
земледелия и мелиорации

Поступила в редакцию  
8 III 1957

## FILTRATSIOONINÄHTUSTE UURIMINE PILURENNI ABIL

H. Parmasto

Resümee

Savimaade kuivendamisel, kus künnikiht vastavalt põlluharimisvõtetele on hästi vett juhtiv, künnialune kiht aga halvasti vett juhtiv, esineb filtratsioonisvool kahekihilises keskkonnas. Kuna nimetatud juhul puudub üldine matemaatiline lahendus ja kuna pole võimalik otseseid vaatlusi looduses alati teha, uuriti neid küsimusi pilurennis modelleerimise abil. Modelleerimise tulemused (äravoolukõverad ja depressioonijooned) ühtivad looduses tehtud vaatluste andmetega.



Modelleerimisandmetest selgus järgmist:

- 1) Künnikihi vabanemine veest toimub peamiselt äravoolu teel läbi künniluse kihi.
- 2) Katsetes, kus künnikihi filtratsioonikoefitsient oli 125 korda suurem aluskihi filtratsioonikoefitsiendist, ei avalda drenikaeviku täitematerjali veejuhtivus (antud vahekorra juures) praktiliselt mingit mõju ajale, mille vältel künnikiht vabaneb veest.
- 3) Kui künni aluskiht on profileeritud ja omab langu 0,02, siis toimub künnikihi vabanemine veest kaks korda kiiremini. Künni aluskihi profileerimine võimaldab suurendada drenide vahelaisu.
- 4) Praktikas kasutatavate drenide vahelaiuste ja sügavuste arvutamiseks, kui drenid asuvad vett mitte läbilaskval kihil, on kehtiv Rothe valem.
- 5) Et voolamine piki künnikihtu lõpeb, kui suur osa depressioonijoonest asub veel künnikihis, tõestab, et põhjavee voolamiseks on vajalik nn. alggradient.

Eesti Maaviljeluse ja Maaparanduse  
Teadusliku Uurimise Instituut

Saabus toimetusse  
8. III 1957

## RESEARCH ON FILTRATION PHENOMENA BY MEANS OF CAPILLARY FLUMES

H. Parmasto

### Summary

At the draining of loamy soils where, owing to cultivating methods, the cultivating horizon conducts water to a sufficient extent, and the subsoil, on the other hand, conducts water insufficiently, the filtration flow is conducted in a 2-layer medium. As there is no general mathematical solution of the problem and it is not always possible to carry out an observation in natural surroundings, the problem was investigated on a model of a capillary flume. The data of the experiments (the drainage and depression curves) coincide with the results attained in nature.

The data of the research proved, as follows:

1. The drainage of the topsoil takes place by the water running off through the subsoil.
2. At the tests, where the filtration coefficient of the topsoil exceeds by 125 times that of the subsoil, the conductivity of water of the filling material of drainage ditches does not practically affect the duration of the draining process of the topsoil.
3. When the subsoil is profiled and has a slope of 0.02, the draining of the topsoil is effected twice as rapidly. The profiling of the subsoil enables to increase the distance between the drains.
4. The distance between the drains and the depth of the trenches, used in practice, may be computed with the help of Rothe's formula, if the drains are situated in a water-tight stratum.
5. An initial gradient is necessary for the drainage of depth water, which is proved by the fact that the flow along the topsoil stops when a large part of the depression line is still in the cultivating horizon.

The Estonian Scientific Research Institute  
of Agriculture and Melioration

Received  
March 8, 1957