

Н. И. Гамаюнов, К. С. Пантелей

ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛИИ ФИЛЬТРАЦИИ В ТОРФЕ

Вопросы передвижения влаги в дисперсных материалах в связи со сложностью процессов фильтрации и гидромеханическим подходом к решению этой проблемы изучены еще недостаточно. Предполагалось, что решающее значение имеет лишь дисперсность материала, гидравлическое сопротивление пористой среды потоку и вязкостные свойства жидкости. Вопросам взаимодействия дисперсионной среды и дисперсной фазы, поверхностным явлениям в тонких порах и пленках, диффузионным процессам на границе раздела фаз не уделялось должного внимания. Между тем в коллоидных высокодисперсных системах, таких как торф, глины, илы, сапрпель, гумифицированные почвы, влияние физико-химических процессов на перенос влаги становится особенно заметным. Наличие коллоидной фракции, легко изменяющей свои свойства и компактность в зависимости от внешних условий, приводит к нестабильности пористой структуры и водных свойств перечисленных сред в ходе рассматриваемых явлений массопереноса.

Многие исследователи отмечали нарушение зависимости Дарси в связных грунтах, по-разному трактуя физический смысл этих аномалий. Значительное уменьшение коэффициентов фильтрации грунтов во времени (закон затухания и восстановления фильтрации) объяснялось вымыванием мелких частиц и скоплением их в слоях, перпендикулярных движению воды, закупоркой пор и фильтров коллоидной фракцией, деформированием структур переплетения гидродинамическими силами, набуханием гумусовых веществ, что в условиях жесткой кюветы влечет сжатие водопроводящих каналов, влиянием заземленного и растворенного воздуха, капиллярным противодействием, направлением фильтрационного потока (закон зональности потока), режимом потока (ламинарный и турбулентный), пристенной неустановившейся фильтрацией, структурированностью поровой влаги, вымыванием из образца водорастворимых гидрофильных веществ, зарастанием крупных пор непрочными коллоидными структурами, аномальной вязкостью рыхлосвязанной воды и др.

Количественному исследованию аномалий фильтрации и их механизма на таком сложном многокомпонентном полифракционном полуколлоидно-высокомолекулярном соединении, каковым является торф, посвящена данная работа.

Весь комплекс исследований выполнен на образцах шести видов низинного и верхового торфа в фильтрационно-компрессионном приборе. Для образцов разной плотности снимались полные фильтрационные характеристики, и в зависимости от дифференциальной пористости рас-

считывались параметры структуры. Начальные градиенты напора определялись графически по зависимостям скорости фильтрации v от градиентов напора i .

На рис. 1 показана зависимость $v=f(i)$ для низинного осокового торфа $R=20-25\%$ при вертикальных нагрузках $P=0,25 \cdot 10^5$; $0,5 \cdot 10^5$; $0,75 \cdot 10^5$; 10^5 и $1,5 \cdot 10^5$ н/м² (соответственно кривые 1—6) и $K_{\phi}=f(i)$ (кривые 1'—6'). Следовательно, с увеличением градиентов давления от

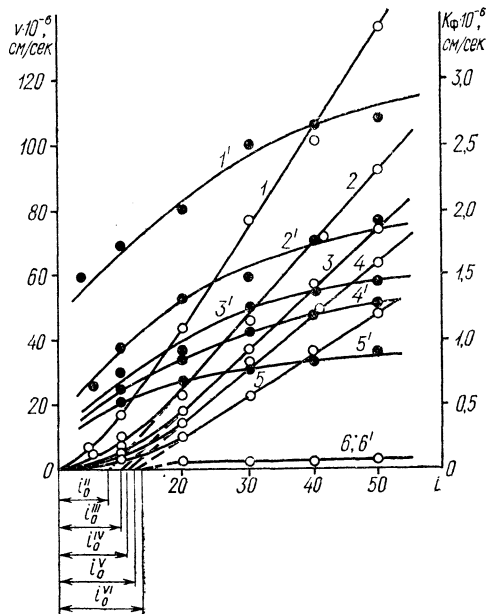


Рис. 1. Зависимость скорости фильтрации v и коэффициента фильтрации K_{ϕ} от градиента напора i при различной плотности образцов (торф низинный осоковый, $R=20-25\%$):

1, 2, 3, 4, 5, 6 — $v=f(i)$ соответственно при значениях коэффициента пористости $\varepsilon=10,5$; $10,4$; $10,2$; $10,1$; $10,0$; $6,8$; 1', 2', 3', 4', 5', 6' — $K_{\phi}=f(i)$ для тех же значений $\varepsilon \cdot i_0^I, i_0^{II}, i_0^{III}, i_0^{IV}, i_0^V, i_0^{VI}$ — начальные градиенты напора соответственно при вертикальных уплотняющих нагрузках $P=0,25 \cdot 10^5$; $0,5 \cdot 10^5$; $0,75 \cdot 10^5$; 10^5 ; $1,5 \cdot 10^5$ н/м².

0 до 50 закон Дарси в виде прямой линии $v=K_{\phi} i$ не соблюдается, а значения K_{ϕ} не остаются постоянными во всем диапазоне изменения i . Это нарушение зависимости Дарси является формальным, так как с увеличением напоров мы имеем дело не с исходной поровой структурой, а с совершенно другой. Дело в том, что с ростом гидравлических градиентов в фильтрацию вовлекается все большее количество ультрапор ($<0,5$ мк), которые до этого вследствие наличия следов сдвиговой прочности в паровой влаге, осмотических и электровязкостных эффектов не участвовали в транзитном переносе влаги. Это подтверждается увеличением среднего диаметра пор приблизительно в 1,40 раза для всех исследованных образцов торфа с увеличением градиентов давления от 10 до 50 (табл. 1).

В данном случае налицо не увеличение эквивалентного диаметра пор, а вступление в фильтрацию микрокапилляров. А. А. Головач [1] в опытах с применением радиоактивного индикатора $\text{Na}_2\text{S}_{35}\text{O}_4$ показал, что при высоких градиентах давления становится возможной фильтра-

Таблица 1

Градиенты напора i	Эквивалентный диаметр пор D_g , мк				
	медиум-торф $R=5-10\%$, $\varepsilon_0=19$	осоковый $R=20-25\%$, $\varepsilon_0=10,5$	медиум-торф $R=30-35\%$, $\varepsilon_0=10,9$	осоковый $R=30-35\%$, $\varepsilon_0=11,5$	тростниково- осоковый $R=30-35\%$, $\varepsilon_0=11,2$
10	5,74	2,30	1,83	1,27	3,23
20	6,16	2,46	1,89	1,80	4,34
30	6,48	2,78	1,91	1,89	4,98
40	6,58	2,80	1,92	2,26	5,08
50	6,71	2,90	1,91	2,37	5,38

ция воды через пронизанные тончайшими порами растительные остатки. Так, для медиум-торфа ($R=15-20\%$) с увеличением i от 10 до 50 активная пористость m и кинетическая удельная поверхность увеличиваются соответственно в 1,25 и 1,75 раза, в то же время средний диаметр водопроводящих пор (D_{cp}) и гидравлический радиус пор уменьшаются в 1,2 и 1,4 раза. Следовательно, специфическое строение части торфа приводит к росту активной пористости, что и вызывает формальное нарушение закона Дарси и диспропорциональное увеличение водопроницаемости при росте градиента напора.

При нагружении образца, когда деформируется большое количество сравнительно однородных мелких пор, увеличение напоров уже в меньшей мере сказывается на изменении K_{Φ} , что подтверждается снижением отношения K_{Φ} , полученного при $i=50$, к K_{Φ} , рассчитанного при $i=10$, по мере увеличения вертикальных уплотняющих нагрузок (табл. 2).

Таблица 2

Вертикальная нагрузка $P \cdot 10^5$, Н/м ²	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,5
$a = \frac{K_{\Phi, i=50}}{K_{\Phi, i=10}}$ раз	2,05	1,95	1,90	1,85	1,65	1,35

Это и понятно, так как при больших нагрузках межагрегатные поры становятся соизмеримыми с порами форменной части растений и одинаково труднопроницаемыми в широком диапазоне градиентов давления ($i=10-50$). Поэтому крутизна линий $K_{\Phi}=f(i)$ (см. рис. 1, кривые 1'-6') с увеличением сжимающих нагрузок уменьшается, а торфяная система в целом приближается к такой пористой среде, для которой при описании фильтрации прибегают к формулам Козени-Кармана, Шведова-Бингама, Букингема. Решение задачи о фильтрации жидкости через дисперсную систему с учетом функции распределения пор по размерам и начального градиента напора i_0 дано Н. В. Чураевым (на основе вывода С. В. Нерпина и Н. Ф. Бондаренко о наличии предельного напряжения сдвига в поровой воде) при рассмотрении уравнения Букингема для расхода структурированной жидкости (вязкопластичного тела) для модели грунта из цилиндрических пор одинаковых размеров [2]. В том случае, когда фильтрация возможна во всем объеме порового пространства ($m=n$), зависимость скорости фильтрации от градиента напора характеризуется нелинейным законом фильтрации и описывается уравнением типа

$$v = AI - B + C/I^3,$$

где A, B, C — постоянные коэффициенты, зависящие от размеров пор, характера их распределения, пористости образца и реологических свойств жидкости.

При дальнейшем увеличении i это уравнение преобразуется в следующее:

$$v = AI - B$$

и при значительных градиентах напоров и выравнивании размеров пор модифицируется в широкоиспользуемое при решении ряда фильтрационных задач уравнения вида

$$v = K_{\phi}(I - I_0).$$

Графический способ [3] нахождения начальных градиентов напора иллюстрируется рис. 1. Отметим, что подобный метод определения дает значительно завышенные результаты по сравнению с прямым определением начальных градиентов.

Так, при отсутствии вертикальных нагрузок графический метод определения i_0 дает значение, приблизительно равное 5,0. В то же время непосредственным определением по фильтрующей способности образца получаем $i_0=0,35$. Но для качественных сравнений i_0 графический метод вполне приемлем, так как снятие фильтрационных характеристик для уплотненного образца при больших градиентах напора не требует значительных затрат времени и усилий. В данной серии опытов i_0 для естественного неуплотненного торфа получены прямым определением, а для плотных — графически. В зависимости от плотности образ-

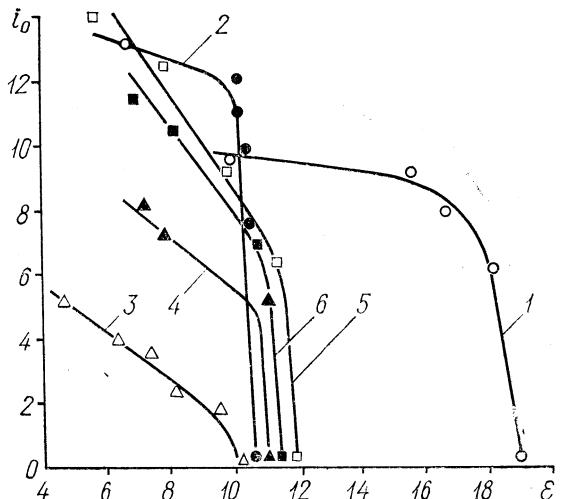


Рис. 2. Зависимость начальных градиентов напора i_0 от коэффициента пористости образцов ϵ_0 :

- 1 — медium-торф, $R=5-10\%$; 2 — осоковый, $R=20-25\%$; 3 — тростниково-осоковый, $R=30-35\%$; 4 — медium-торф, $R=30-35\%$; 5 — осоковый, $R=30-35\%$; 6 — тростниковый, $R=30-35\%$.

цов $i_0=0,1-14,0$. Незначительные значения i_0 для низинного торфа (или даже их полное отсутствие) сменяются при уже небольших сжимающих нагрузках стремительным увеличением их абсолютных величин. При дальнейшем уплотнении (снижении ϵ) крутой участок функции $i_0=f(\epsilon)$ сменяется пологим. Причиной этого является наличие дефектов в структуре торфа, содержащего множество неоднородностей. Наличие в начале опыта крупных водопроводящих полостей и каналов практически делает систему водопроницаемой при любых малых напорах, а их быстрое закрытие, даже при малых нагрузках, приводит к резкому увеличению значений i_0 (на рис. 2. кривые 1—6).

Природа начального градиента в торфяных грунтах может быть объяснена реологическими свойствами дисперсионной среды [4], процессами структурообразования [5], осмотическим скоплением жидкости [6], электровязкостным эффектом [7].

Табл. 3 дает наглядное представление о вкладе электроосмоса, термоосмоса и капиллярного (солевого) осмоса в общий расход напорной фильтрации через образцы низинного осокового торфа $R=30-35\%$.

По эффективности воздействия на фильтрующую способность образца, вносимого этими возмущениями в фильтрационное поле, они располагаются в следующий ряд: электроосмос, термоосмос, капиллярный (солевой) осмос. Малая изменчивость найденных коэффициентов массопереноса в зависимости от тока, температуры, вида и концентрации электролита, плотности образца позволяет рекомендовать их для выполнения предварительных инженерно-технических расчетов баланса влаги при осушении, естественной сушке и искусственном обезвоживании торфа.

Некоторое представление о влиянии на фильтрационные свойства коллоидно-химических превращений, проходящих в образцах осокового торфа $R=30-35\%$ при пропуске через них дистиллированной воды, дает рис. 3. Вымывание из образца катионов (кривые 3, 4, 5, 6 на рис. 3, б) и диффузия водородных ионов (кривая 1) в мигрирующую влагу приводят к снижению числа водородных связей и «сшивок» макромолекул поливалентными катионами. Диспергирование агрегатов торфа и их набухание вследствие сил кулонового отталкивания уменьшает

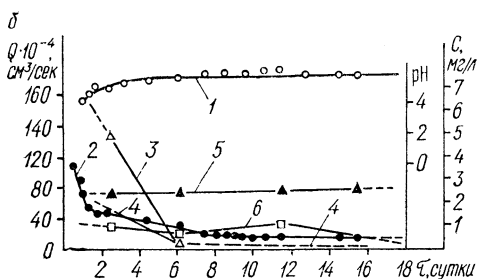
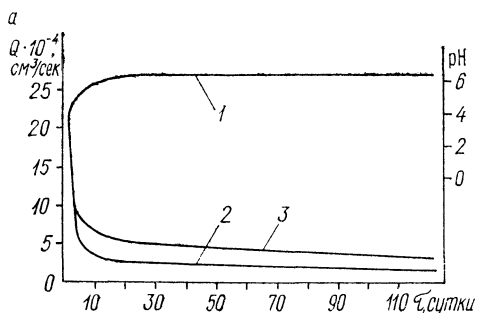


Рис. 3. Изменение расходов Q , кислотности фильтра pH и его катионного состава при пропуске через образец дистиллированной воды:

а: 1 — pH фильтрата; 2, 3 — расходы Q ; б: 1 — pH фильтрата; 2 — расходы Q ; 3, 4, 5, 6 — соответственно концентрация ионов K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Fe^{3+} в фильтрате.

на протяжении 12—15 суток исходные расходы в 6—10 раз (кривые 2, 3 на рис. 3, а; кривая 2 на рис. 3, б). Даже через 110 суток фильтрации продолжается снижение расходов с суточной интенсивностью $(0,01-0,015) 10^{-4}$ см³/сек. Следовательно, применительно к коллоидным капиллярно-пористым средам можно говорить о каком-то условном структурно-фильтрационном равновесном состоянии системы. Одновременно эти опыты свидетельствуют, что при лабораторных определениях коэффициентов фильтрации подобных материалов необходимо пользоваться естественной дисперсионной средой, отобранной одновременно с образцом.

Процессы структурообразования зачастую и приводят к возникновению начальных градиентов напора вследствие развития структур гелевого типа, пептизации ассоциатов торфа и электрокинетического торможения течения в тонких пленках и порах, соизмеримых по толщине с размером граничных слоев [7]. Измеренные для этого торфа электрокинетический потенциал и потенциал протекания, как правило, не превышают 1—2 мВ, и, следовательно, электровязкостным эффектов можно пренебречь.

Таблица 3

Электроосмос			Термоосмос			Капиллярный осмос		
напряженность поля Φ , В/см	коэффициент электроосмоса $K_{\Phi} \times 10^{-6}$, см ² /В·сек	напор, эквивалентный действию электроосмоса, h_{Φ} , см	градиент температур ΔT , град/см	коэффициент термоосмоса $K_T \times 10^{-6}$, см ² /град·сек	напор, эквивалентный действию термоосмоса h_T , см	градиент концентрации и вид раствора τC , моль/см ³	коэффициент солевого осмоса $K_C \times 10^{-5}$, см ² /моль·сек	напор, эквивалентный действию солевого осмоса, h_0 , см
1,00	5,80	12,5	2	0,44	0,432	0,263 MgCl ₂	3,80	0,019
2,46	5,50	29,2	3	0,41	0,570	0,525 MgCl ₂	2,86	0,019
3,92	5,20	43,9	4	0,40	0,705	0,525 MgCl ₂	3,70	0,013
5,19	5,65	63,0	5	0,39	0,816	0,525 MgCl ₂	4,50	0,189
7,00	5,55	84,0	6	0,38	0,915	1,050 MgCl ₂	3,38	0,071
9,10	4,80	94,0	7	0,37	0,980	1,314 MgCl ₂	3,40	0,068
			8	0,37	1,080	0,090 CaCl ₂	11,50	0,014
						0,025 KCl	11,60	0,005

В этих же опытах определена удельная поверхностная проводимость торфа $K=3,7 \cdot 10^{-9}$ см⁻¹, характеризующая степень насыщенности электропроводящего пространства торфа активными ионогенными диссоциирующими функциональными группами. Сравнение коэффициента структурного сопротивления торфяной диафрагмы $\beta=4,3$ и коэффициента ее эффективности $\alpha=2,8$ указывает на отсутствие в торфяной системе явления электрической «сверхпроводимости» [8], т. е. для I—I-валентных электролитов (стандартным раствором служил 0,1 N KCl) поправка на поверхностную электропроводность адсорбционных слоев и электрокинетическое торможение потока жидкости не существенны.

Таким образом, передвижение влаги в пористом влагонасыщенном теле может происходить не только под действием сил гидродинамической природы, но и под влиянием градиентов концентрации веществ, электричества и температуры. В случае осмотического движения жидкости причиной его является скольжение влаги по стенкам, которые при обычной фильтрации препятствуют ее течению. Для реализации этих сил физико-химической природы вовсе нет необходимости предполагать наличие стенок у капилляров, следует лишь допустить определенное чередование вдоль потока функциональных ионогенных групп — активных центров сорбции — десорбции влаги, массопереноса, процессов ионообмена и структурообразования.

На основании результатов исследования фильтрационных аномалий в торфах можно сделать следующие выводы:

1. Нарушение основного фильтрационного закона Дарси в торфяных системах объясняется их микрогетерогенностью и реологическими свойствами поровой влаги.

2. Основными причинами существования начальных градиентов в тонкодисперсных коллоидных телах являются осмотические, структурообразовательные, электрокинетические явления. Для осокового торфа $R=30-35\%$ исследован количественно каждый из этих факторов.

3. С уменьшением размеров пор начальный градиент напора i_0 увеличивается по кривой, близкой к экспоненте, и в целом находится в пределах $i_0=0,1-14$ при варьировании значений коэффициента пористости.

4. При уплотнении образцов отношение коэффициентов фильтрации, полученных при $i=50$, K_{Φ} , рассчитанному при $i=10$, уменьшается

с 1,80—6,75 раза до 1,15—1,35 раза вертикальная нагрузка $(0-2) \times 10^5 \text{ Н/м}^2$), так как межагрегатные поры становятся соизмеримыми с порами растительных остатков и одинаково трудноводопроницаемыми в широком диапазоне градиентов давления.

5. При расчетах фильтрационной консолидации торфяных оснований вследствие дефектности структуры и наличия массы неоднородностей значения i_0 исчезающе малы и в формулах ими можно пренебречь.

6. Найденные коэффициенты массопереноса для насыщенного торфа можно рекомендовать для предварительных инженерно-технических расчетов водного баланса при осушении, естественной сушке и искусственном (осмотическом) обезвоживании торфа вследствие их незначительной изменчивости в зависимости от силы тока, температуры, концентрации и вида электролита, плотности проводящей среды.

Литература

1. А. А. Головач. Изучение водных свойств и пористой структуры верховых торфов низкой степени разложения. Автореф. дисс. Калинин, 1968.
2. Н. В. Чураев. Фильтрация структурированных жидкостей через гетеропористые тела. Изв. АН СССР, механика и машиностроение. Вып. 1. 1964.
3. С. А. Роза. К вопросу о начальном градиенте напора при фильтрации воды через бетон. «Гидротехническое строительство», 1961, № 6.
4. Н. Ф. Бондаренко. Влияние межмолекулярных водородных связей на характер течения жидкостей в капиллярах. ЖФХ, т. 42, вып. 1, 1968.
5. Б. Ф. Рельтов. Влияние структурообразовательных процессов на водопроницаемость грунта (природа начального градиента). Сб. «Инженерно-геологические свойства горных пород и методы их изучения». М., 1962.
6. М. П. Воларович, Н. В. Чураев. Влияние поверхностных сил на передвижение влаги в пористых телах. Сб. «Исследования в области поверхностных сил». М., 1964.
7. Н. В. Чураев, Б. В. Дерягин. Влияние перекрытия ионных слоев на электрокинетические явления в тонких пленках и порах. Коллоид. журн., т. 28, № 5, 1966.
8. И. И. Жуков, Д. А. Фридрихсберг. Электрокинетические характеристики капиллярных систем. Поверхностная проводимость. Коллоид. журн., т. 11, № 3, 1949.