

**Н.Ф. Бондаренко**

**Физика движения подземных  
вод**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 55  
ББК 26.3  
Н11

Н11 **Н.Ф. Бондаренко**  
Физика движения подземных вод / Н.Ф. Бондаренко – М.: Книга по Требованию, 2021. – 216 с.

**ISBN 978-5-458-46541-0**

Монография содержит оригинальные разработки автора на основе развития и обобщения результатов исследований советских ученых П. А. Ребиндера, Б. В. Дерягина, С. В. Нерпина и др. Освещаются вопросы физики течения жидкостей в пористых средах, рассматривается природа фильтрационных аномалий и учет этих явлений в теории процессов фильтрации и изотермического влагопереноса. Дается расчет отдельных задач по фильтрации воды при неполном заполнении пор и течению воды через тонкие поры. Книга представляет практический и научный интерес для гидрологов, мелиораторов, гидрогеологов.

**ISBN 978-5-458-46541-0**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)



## ВВЕДЕНИЕ

### § 1. ЗАКОН ДАРСИ. ВЕРХНИЙ ПРЕДЕЛ ПРИМЕНИМОСТИ ЛИНЕЙНОГО ЗАКОНА ФИЛЬТРАЦИИ

В 1856 г. Дарси установил, что «объем воды, который протекает через слой песка с данными свойствами, пропорционален давлению и обратно пропорционален толщине слоя песка» [210].

Для случая когда давление под фильтром равно атмосферному, уравнение для потока жидкости Дарси записал в следующем виде:

$$Q = \frac{K\omega}{l} (H + l), \quad (\text{В.1.1})$$

где  $Q$  — объем воды, протекающей в единицу времени;  $\omega$  — площадь фильтра;  $l$  — его толщина;  $H$  — высота слоя воды над песком.

Выражение (В.1.1) можно записать в виде

$$Q = \frac{k}{\eta} \omega I, \quad (\text{В.1.2})$$

где  $k$  — проницаемость пористой среды, которая определяется теперь только геометрией порового пространства, занятого жидкостью;  $\eta$  — вязкость жидкости;  $I = \frac{H+l}{l}$  — градиент напора.

Параметр  $K = \frac{k}{\eta}$  в отечественной литературе получил название коэффициента фильтрации. Зависимость вида (В.1.2), постулирующая линейную связь между потоком (скоростью) и действующими силами, получила название закона Дарси.

Многие экспериментальные данные подтверждают справедливость закона Дарси, который лежит в основе большинства современных исследований по теории фильтрации. С увеличением скорости создается дополнительный механизм обмена количеством движения; при этом происходит более быстрое возрастание сопротивления с ростом скорости течения и закон Дарси нарушается. Описания опытов по определению критического числа Рейнольдса, при котором происходит нарушение закона Дарси, опубликованы в многочисленных статьях. В качестве примера приведем результаты опытов Наги и Каради [225] с песком и смесью гравия. Было использовано шесть сортов почвенных смесей с диаметром зерен

( $d_{eff}$ ) = 0,015; 0,042; 0,12; 0,52; 0,83 и 1,2 см, коэффициентом однородности  $u = 4,3; 4,8; 5,0; 4,7$  и  $4,7$ .

Результаты экспериментов представлены в системе билогарифмических координат (рис. В.1):  $Re \lambda = f(Re)$ .

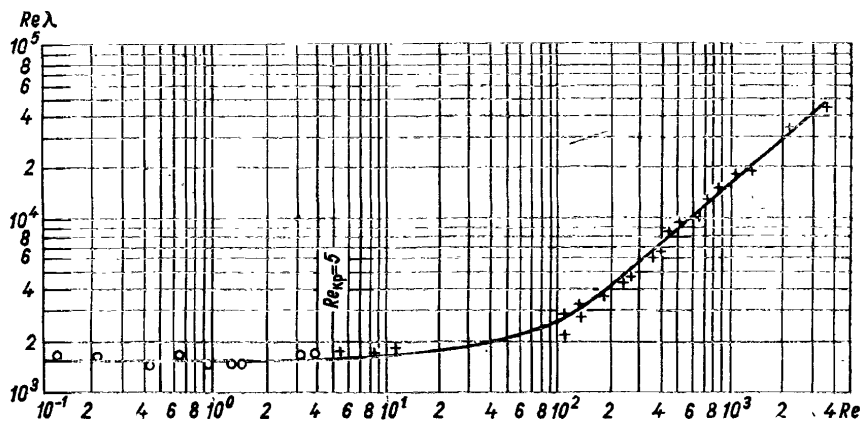


Рис. В.1. Зависимость  $Re \lambda = f(Re)$ .

Значения числа Рейнольдса определяются по формуле

$$Re = \frac{V d_{eff}}{\nu},$$

а величина коэффициента сопротивления

$$\lambda = \frac{2 g d_{eff} l}{\nu^2},$$

где  $V$  — скорость фильтрации;  $\nu$  — кинематическая вязкость;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $l$  — градиент напора.

На основе этих экспериментов можно разграничить три диапазона:

- 1) соответствующий закону Дарси ламинарный для  $Re < 5$ ;
- 2) переходный при  $Re = 5 - 2 \cdot 10^2$ ;
- 3) турбулентный,  $Re > 2 \cdot 10^2$ .

Из обзора Д. Э. Шейдеггера [198] следует, что полученные различными исследователями значения критического числа Рейнольдса различаются в сотни раз.

Из такого разброса экспериментальных значений  $Re_{кр}$  можно сделать лишь один вывод — действительная геометрия порового пространства не эквивалентна пористой среде с характерным размером  $d$ , а вязкость жидкости  $\eta$  может не оставаться постоянной при изменении сдвиговых напряжений.

В работе [225] подчеркивается то обстоятельство, что фильтрация грунтовой воды в беспорядочных почвенных пустотах должна рассматриваться как движение повышенной неустойчивости. На

краях зерен при неожиданном, но обязательном расширении поперечного сечения должны возникать нарушения, ведущие при неустойчивом режиме течения к возникновению местной турбулентности уже при малых скоростях фильтрации. Нарушение закона Дарси может быть обусловлено в значительной мере этим эффектом. В опытах авторов отклонение от линейного закона имеет место уже при  $Re > 5$ . Систематические исследования области справедливости закона Дарси выполнены Г. Ф. Требиным [182].

## **§ 2. ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ЗАКОНА ДАРСИ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ**

Уже в 1898 г. Кинг [218] опубликовал результаты экспериментов, которые показывают, что закон Дарси нарушается и с уменьшением скорости фильтрации.

На рис. В.2 представлена зависимость скорости фильтрации  $V$  от градиента напора  $I$  для мэдисонского глиноземистого песчаника, опубликованная Кингом. Важно отметить (в связи с рассмотрением в дальнейшем стабильности фильтрационного потока во времени), что на рисунке представлены также данные, полученные при контрольном замере в конце опыта.

На рис. В.3 показаны результаты тщательно выполненных экспериментов Энгельгардта и Танна [212]. Особый интерес эти данные, в которых четко проявляется нелинейность зависимости  $V(I)$ , представляют в связи с тем, что исследовалась фильтрация не только воды в глинизированном песчанике, но и растворов электролитов различной концентрации. В дальнейшем (гл. II, § 3) вернемся к интерпретации этих результатов, здесь же лишь обратим внимание на «спрямление» зависимости  $V(I)$  при увеличении концентрации  $NaCl$ .

С. А. Роза провел систематические исследования фильтрации воды в глинах; на рис. В.4 представлены полученные им результаты для кембрийской глины [170].

Убедительные экспериментальные данные, свидетельствующие о нарушении закона Дарси в области малых градиентов напора, получены А. И. Котовым и С. В. Нерпиным с сотрудниками [24, 115, 116] и Н. В. Чураевым [493, 195].

Г. В. Короткевич [113], изучая соляной карст в Закарпатье, пришел к выводу, что «...длительная сохранность соляных залежей в верхней гидродинамической зоне обусловлена, по-видимому, тем, что насыщенные рассолы при малых градиентах падения уровня остаются у поверхности соли в состоянии покоя, защищая его от растворения. . . Мы считаем, что должен существовать определенный для данных рассолов и фильтрационной среды начальный градиент напора, до достижения величины которого практически нет фильтрации». В работе А. Е. Гуревича [65] утверждается, что «фактический материал по гидрогеологии различных районов находится в противоречии с признанием скоростей фильтрации подземных вод, рассчитываемых по закону Дарси» — расчетные значения

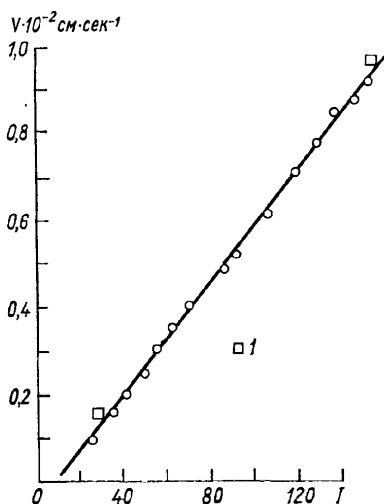


Рис. В.2. Зависимость скорости фильтрации от градиента напора для медисонского глиноземистого песчаника [218].

1 — данные контрольных замеров.

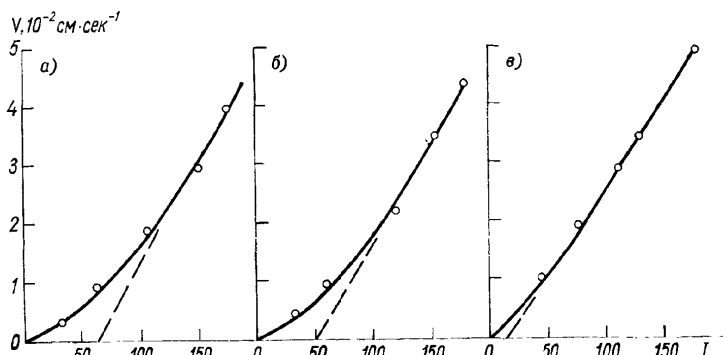
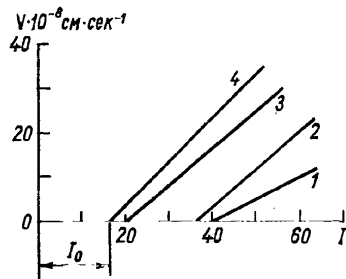


Рис. В.3. Зависимость скорости фильтрации от градиента напора для глинизированного песчаника [212].

а — дистиллированная вода; б — раствор NaCl 0,88N; в — раствор NaCl 1,83N.

Рис. В.4. Зависимость скорости фильтрации от градиента напора для кембрийской глины при различной плотности [170].

1 — влажность полного насыщения,  $W=27\%$ ;  
2 —  $W=27,7\%$ ; 3 —  $W=31\%$ ; 4 —  $W=32,5\%$ .





оказываются явно завышенными. На существование нижнего (как и верхнего) предела применимости закона Дарси указывал и Н. Н. Павловский [151].

Непропорциональное уменьшение скорости фильтрации с уменьшением градиента напора  $I$  и наличие начального градиента напора  $I_0$  (см. рис. В.4) отмечено многими исследователями [1, 2, 3, 10, 11, 21, 29, 57, 61, 74, 76, 110, 130, 162, 168, 224]<sup>1</sup>. Подробный обзор работ зарубежных исследователей по этому вопросу выполнен Сварцендубером [234] и Кутилеком [222].

Олсен [226] считает, что наблюдаемые в некоторых опытах отклонения от закона Дарси могут быть отнесены за счет экспериментальной ошибки.<sup>2</sup> Однако большинство опубликованных данных не вызывает сомнения в существовании фильтрационных аномалий, не связанных с ошибками в эксперименте. Для объяснения наблюдаемых аномалий обычно привлекались следующие соображения:

1. Фильтрующаяся жидкость, содержащая поверхностно-активные компоненты и коллоидные частицы, образует устойчивые коллоидные растворы [122, 181], которые обладают механической прочностью и разрушаются лишь при  $I > I_0$ .

2. Механические свойства жидкости постепенно меняются от твердой поверхности к объемной части жидкости: «прочносвязанная» вода — «связанная» вода — «рыхлосвязанная» вода<sup>3</sup>; с увеличением градиента напора в общий поток постепенно вовлекаются слои воды, более прочносвязанные с твердой поверхностью, и эффективная динамическая пористость системы увеличивается [196, 221].

3. Под влиянием поверхности вся вода в порах приобретает свойства неньютоновской жидкости [223].

4. Возникают сопутствующие напорной фильтрации электрокинетические и осмотические эффекты [216, 222, 234].

В следующей главе рассматривается влияние всех факторов, определяющих скорость ламинарного потока жидкости в пористой среде, на характер фильтрационного потока. При этом даются лишь те сведения о геометрии порового пространства, действующих силах и реологических свойствах жидкостей, в принципе ответственных за наблюдаемые аномалии, которые необходимы для понимания излагаемого предмета; более подробные сведения можно найти в специальной литературе, ссылки на которую даны в тексте.

---

<sup>1</sup> Термин «начальный градиент» был предложен Н. П. Пузыревским [161].

<sup>2</sup> Олсен исследовал фильтрацию воды через плотные глины, при этом никаких отклонений от закона Дарси не было обнаружено. Возможное объяснение этого факта будет дано в главах III и IV.

<sup>3</sup> Заметим, что не имеется четкой формулировки физического смысла терминов «прочносвязанная», «рыхлосвязанная» и «связанная» вода. По-видимому, по аналогии с диффузным ионным слоем полагают, что свойства «связанной» воды постепенно меняются от стенки к объему. Однако прямые исследования [78] показали, что граничные фазы, обладающие особыми свойствами по сравнению с объемной жидкостью, имеют с ней (или с переходным слоем) более или менее резкую границу.

## Глава I.

### ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СКОРОСТЬ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ. ХАРАКТЕР ФИЛЬТРАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ

#### § 1. ДЕЙСТВУЮЩИЕ СИЛЫ<sup>1</sup> И МЕХАНИЗМЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Условием термодинамического равновесия системы является постоянство в каждой ее точке химического потенциала  $\mu$  и температуры  $T$ . При нарушении этого условия процесс переноса энергии и вещества направлен в сторону меньших значений химического потенциала, что ведет к восстановлению равновесия. Интенсивность потока зависит от степени нарушения условий равновесия.

Термодинамический потенциал слабого раствора при наличии внешних полей (например, поля тяготения или электрического поля) выражается зависимостью

$$\begin{aligned}\theta = N\mu_0(P, T) + nKT \ln \frac{n}{eN} + n\chi(P, T) + NU(x, y, z) + \\ + nU'(x, y, z).\end{aligned}$$

Здесь  $N$  и  $n$  — соответственно число частиц растворителя и растворенного вещества;  $\mu_0$  — химический потенциал чистого растворителя;  $\chi(P, T)$  — функция, зависящая только от давления и температуры;  $U(x, y, z)$  и  $U'(x, y, z)$  — потенциальная энергия частиц растворителя и растворенного вещества, определяемая существующими внешними полями;  $K$  — постоянная Больцмана;  $e$  — заряд электрона.

Химический потенциал растворителя в растворе

$$\mu = \frac{\partial \theta}{\partial N} = \mu_0(P, T) - KT \frac{n}{N} + U(x, y, z), \quad (I.1.1)$$

<sup>1</sup> Здесь не учитываются силы инерции, которые становятся существенными лишь при больших скоростях. Не рассматривается также упругий режим фильтрации, характерный для пористых сред, находящихся под значительным внешним давлением, и течение жидкостей в пористых деформируемых средах. Обзор исследований по этим вопросам можно найти в книге [164].

а химический потенциал растворенного вещества

$$\mu' = -\frac{\partial \theta}{\partial n} = KT \ln \frac{n}{N} + \chi(P, T) + U'(x, y, z). \quad (1.1.2)$$

Из приведенных выражений следует, что интенсивность потока вещества или энергии зависит от градиента таких величин, как температура, давление, концентрация растворенных веществ, и потенциала внешних полей, определяющих действующие силы [27].

Перенос вещества в пористой среде может происходить в жидкой или паровой фазе.

### Жидкое состояние

Действующие на жидкость силы по характеру их приложения удобно разделить на три группы [144]:

- 1) объемные или формально приводящиеся к ним;
- 2) тангенциальные, действующие на пристенные слои жидкости;
- 3) поверхностные, приложенные к межфазной границе жидкость—газ.

Для относительно широких капилляров, когда диффузные слои не перекрываются, при таком разделении каждой группе сил независимо от их природы отвечают определенные виды потока с одинаковой формой профилей скоростей; при определенном сочетании действующих сил различной природы возникает инверсия потока.

**Объемные силы.** К этой группе относятся: силы тяжести и давление в жидкости, самодиффузия и термосамодиффузия жидкости.

а. Силы тяжести определяются гравитационным потенциалом; давление в жидкости складывается из давления в граничащем с ней газе и межфазного перепада давления на границе жидкость—газ;

б. Самодиффузия жидкости. Рассмотрим систему, состоящую из двух сосудов, соединенных капилляром или пористой перегородкой. Если между сосудами поддерживать разность концентраций растворенных веществ  $\Delta C$ , то должен возникнуть поток растворителя, направленный через капилляр (пористую среду), связанный с различием химического потенциала растворителя на концах капилляра в объемной<sup>1</sup> части жидкости, заполняющей капилляр.

В соответствии с (1.1.1) поток растворителя будет направлен в сторону сосуда с большей концентрацией растворенных веществ (рассматривается случай, когда потоком растворенного вещества, направленным в противоположную сторону, можно пренебречь). Если в направлении, противоположном самодиффузионному потоку, приложить объемные силы такой интенсивности, при которой напорный поток будет в точности равен самодиффузионному, то

---

<sup>1</sup> Капиллярноосмотический поток жидкости, связанный с непостоянством в растворе концентрации растворенных веществ в направлении, нормальном к стенке капилляра, вызывается тангенциальными силами и будет рассмотрен ниже.

суммарный поток будет равен нулю. Следовательно, формально самодиффузионный эффект может быть также сведен к действию объемных сил.

в. Термосамодиффузия жидкости. Так как время релаксации молекул определяется зависимостью  $t = t_0 \exp \left( - \frac{\Delta U}{KT} \right)$ ,

где  $t_0$  — частота собственных колебаний молекул,  $\Delta U$  — величина потенциального барьера,  $K$  — постоянная Больцмана и  $T$  — температура, то вероятность перехода молекул в направлении повышения и понижения температуры не может быть одинаковой. Основанное на этом эффекте явление термодиффузии примесей хорошо изучено [188] и находит практическое применение. Наличие потока молекул растворителя экспериментально не исследовалось, однако и в этом случае в направлении к более низким температурам должен возникнуть поток жидкости, интенсивность которого определяется градиентом температуры. Если в направлении, противоположном термосамодиффузионному потоку, приложить объемные силы такой интенсивности, при которой вероятность перехода молекул в противоположных направлениях станет снова одинаковой, то поток самодиффузии будет равен напорному потоку противоположного направления.

Таким образом, термосамодиффузионный эффект также может быть формально сведен к действию объемных сил.

Профиль скоростей, возникающих под влиянием объемных сил в случае относительно широких плоских или цилиндрических каналов, имеет параболическую форму.

**Тангенциальные силы.** К этой группе относятся силы электроосмотические,<sup>1</sup> капиллярно-осмотические, термоосмотические и диффузофоретические. Эти силы возникают у поверхности твердых тел в связи с непостоянством в растворе концентрации ионов (нейтральных молекул), энтальпии и электрического заряда в направлении, нормальном к поверхности раздела.

а. Капиллярный осмос (аномальный осмос). Аномальным осмосом было названо явление передвижения жидкости в сторону меньших концентраций (т. е. в противоположном нормальному осмосу направлении) в случае проницаемой мембраны. Общая теория капиллярного осмоса развита Б. В. Дерягиным с сотрудниками (см. например [86, 135]).

Основные положения этой теории заключаются в следующем.

Так как концентрация растворенных веществ в граничащем с твердой фазой слое отлична от объемной, т. е. имеется соответствующая диффузность граничного слоя, то в растворах нейтральных молекул должны возникать кинетические явления, подобные электрокинетическим, связанные с диффузностью двойного электрического слоя. Подвижность некоторой части диффузного слоя приводит к тому, что если между двумя сосудами, соединенными капилляром, создать перепад давления, то в сосуде, куда поток втекает,

---

<sup>1</sup> Электроосмос рассмотрен в гл. VII.

концентрация растворенных веществ будет возрастать, а в другом сосуде раствор будет обедняться. Если между сосудами поддерживать разность концентраций растворенных веществ, то возникает поток жидкости в сторону сосуда с меньшей концентрацией растворенных веществ. Скорость этого скольжения пропорциональна перепаду концентрации растворенных веществ.

б. **Термоосмос.** Как показано Б. В. Дерягиным, отличие энthalпии в различных слоях жидкости от объемного значения приводит к термоосмосу — движению жидкости через капилляр при наличии осевого градиента температуры. Скорость термоосмотического скольжения пропорциональна перепаду температуры на концах капилляра. Экспериментальное доказательство существования термоосмоса представлено в работах [60, 77, 83].

в. **Диффузиофорез** — движение частиц под влиянием градиента концентрации при отсутствии внешнего электрического поля. Диффузиофорез является аналогом электрофореза и предсказан в работах С. С. Духина [91] и Б. В. Дерягина. Интенсивность тангенциальных сил определяется величиной градиентов постоянного электрического поля, концентрации растворенных веществ и температуры вдоль потока.

В случаях цилиндрических или плоских капилляров профиль скоростей постоянен поперек потока, за исключением пристенных слоев, в пределах которых скорость уменьшается до нуля у границы твердое тело — жидкость.

**Поверхностные силы.** К этой группе сил относится поверхностное натяжение на границе вода—воздух, и, следовательно, они возникают только в ненасыщенных системах. Так как поверхностное натяжение зависит от температуры и концентрации растворенных веществ, то и интенсивность этих сил зависит от градиентов температуры и концентрации растворенных веществ. В простейшем случае, когда частицы покрывает пленка вязкой жидкости, профиль скоростей имеет форму треугольника с максимальной величиной скорости на межфазной границе жидкость—воздух.

**Инверсия потока.** Если вдоль потока жидкости в пористой среде со временем изменяются градиенты концентрации растворенных веществ (температуры или/и электрического поля), то это приводит к изменению интенсивности потока вплоть до его инверсии (изменения направления). Рассмотрим следующий случай.

а. **Капиллярный осмос и самодиффузия.** В системе, состоящей из двух сосудов, соединенных капилляром, концентрация растворенных веществ (нейтральных молекул или ионов) в левом сосуде равна  $C_0$ , в правом  $C$ , причем  $C_0 < C$ . Равенство химических потенциалов растворенного вещества  $\mu'$  в направлении, нормальном стенкам капилляра, обуславливает диффузный характер распределения концентрации растворенных веществ; с повышением  $C$  диффузный слой «сжимается» (рис. I.1). Химические же потенциалы растворенного вещества  $\mu'$  и растворителя в растворе  $\mu$  вдоль капилляра не равны.

В случае I химический потенциал растворителя в растворе в пристеночном слое  $\mu^c$  в соответствии с формулой (I.1.1) в левом конце капилляра  $\mu_{\text{л}}^c$  ниже, чем в правом  $\mu_{\text{п}}^c$ , т. е.  $\mu_{\text{л}}^c < \mu_{\text{п}}^c$ ; в объеме же капилляра, наоборот,  $\mu_{\text{л}}^c > \mu_{\text{п}}^c$ . Однако при данном соотношении  $C_0$  и  $C_1$  поток  $q_c \gg q_0$  и видимое движение жидкости осуществляется в сторону левого конца. В случае II  $q_0 \gg q_c$  и суммарный поток  $Q$  направлен в сторону правого конца. Для простоты здесь рассмотрен случай, когда потоком растворенных веществ по сравнению с потоком растворителя можно пренебречь.

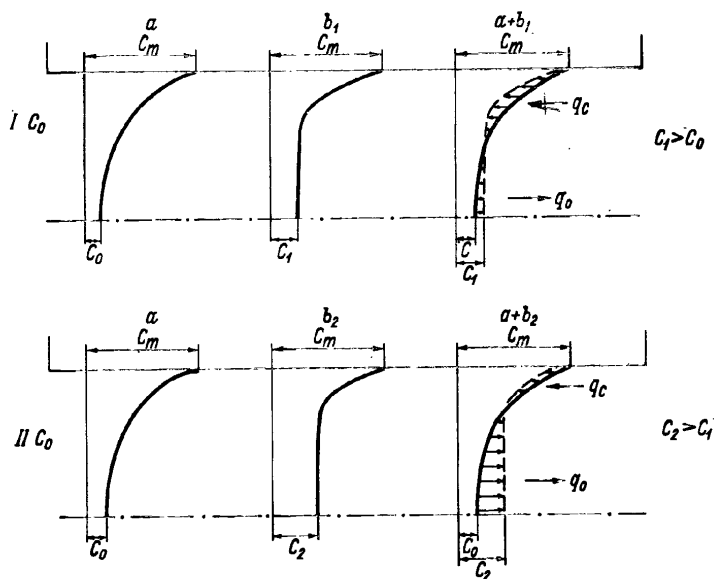


Рис. I.1. Капиллярный осмос и самодиффузия.

В опытах автора [26] по одну сторону фильтра (в качестве фильтров использовались жесткие диафрагмы из керамики и диафрагмы «мипласт», используемые в аккумуляторной промышленности; средний размер пор изменился от 0,3 до 30 мкм; толщина фильтра составляла 1,0 см) заливалась дистиллированная вода, по другую — раствор NaCl, концентрация которого изменялась от 1 до 15% (весовых). Во всех опытах наблюдался «аномальный» осмос; скорость суммарного потока жидкости увеличивалась с увеличением концентрации NaCl до 12%. При дальнейшем увеличении концентрации этот эффект уменьшался. Такие же результаты при указанной концентрации NaCl и  $\text{CaCl}_2$  в аналогичных опытах получены Б. Ф. Рельтовым и Н. А. Новицкой [167], которые при дальнейшем увеличении концентрации примерно до 20% наблюдали уже «нормальный» осмос.