

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, кляксы, 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.

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:

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

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

Выражение (B.1.1) можно записать в виде

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

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

Параметр $K = \frac{k}{\eta}$ в отечественной литературе получил название коэффициента фильтрации. Зависимость вида (B.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 $\mu = 4,3; 4,8; 5,0; 4,7$ и $4,7$.

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

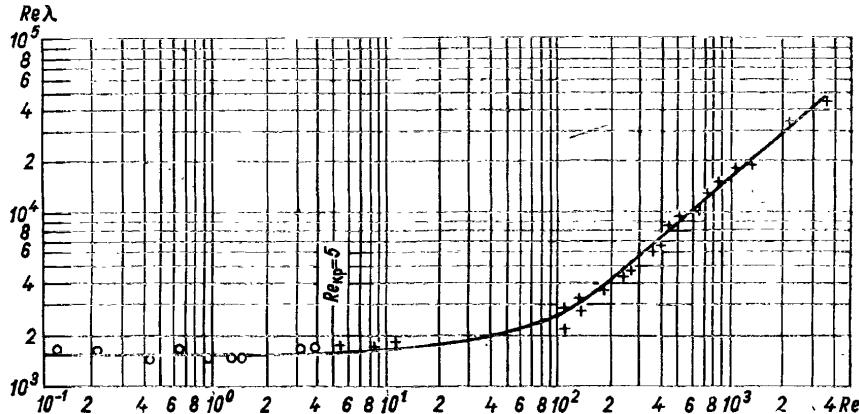


Рис. В.1. Зависимость $Re \lambda = f(Re)$.

Значения числа Рейнольдса определяются по формуле

$$Re = \frac{Vd_{eff}}{\nu},$$

а величина коэффициента сопротивления

$$\lambda = \frac{2gd_{eff}I}{\nu^2},$$

где V — скорость фильтрации; ν — кинематическая вязкость; g — ускорение силы тяжести; I — 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_{kp} можно сделать лишь один вывод — действительная геометрия порового пространства не эквивалентна пористой среде с характерным размером d , а вязкость жидкости η 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 попечного 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 глинистом 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

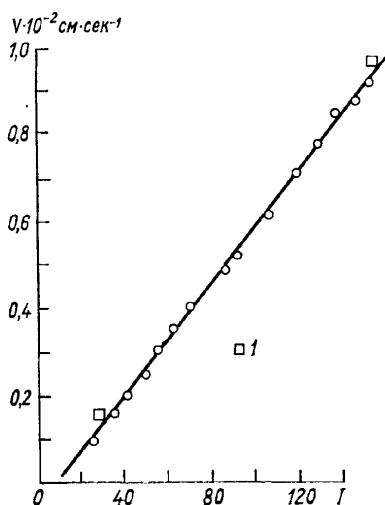


Рис. В.2. Зависимость скорости фильтрации от градиента напора для мединского глиноzemистого песчаника [218].

I — данные контрольных замеров.

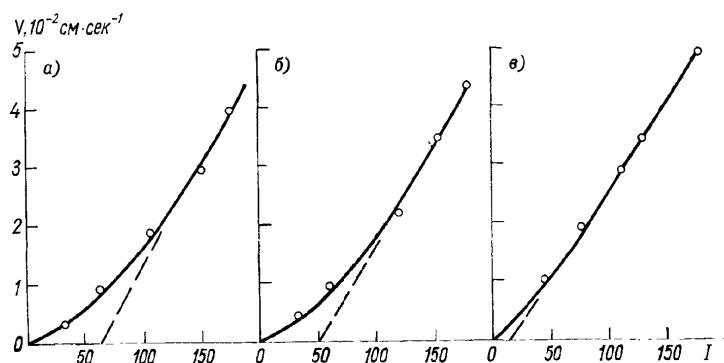
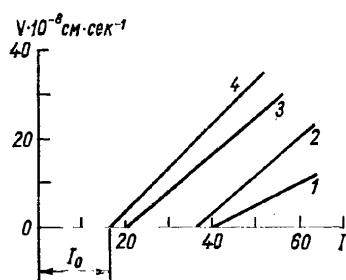


Рис. В.3. Зависимость скорости фильтрации от градиента напора для глинизированного песчаника [212].

a — дистиллированная вода; b — раствор NaCl 0,88N; c — 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]¹. Подробный обзор работ зарубежных исследователей по этому вопросу выполнен Сварцен-друбером [234] и Кутилеком [222].

Олсен [226] считает, что наблюдаемые в некоторых опытах отклонения от закона Дарси могут быть отнесены за счет экспериментальной ошибки.² Однако большинство опубликованных данных не вызывает сомнения в существовании фильтрационных аномалий, не связанных с ошибками в эксперименте. Для объяснения наблюдавшихся 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» вода³; 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 неионогенной жидкости [223].

4. Возникают сопутствующие напорной фильтрации электрохимические 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 наблюдавшиеся аномалии, которые необходимы для понимания излагаемого предмета; более подробные сведения можно найти в специальной литературе, ссылки на которую даны в тексте.

¹ Термин «начальный градиент» был предложен Н. П. Пузыревским [161].

² Olsen 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.

³ 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 СИЛЫ¹ И МЕХАНИЗМЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Условием термодинамического равновесия системы является постоянство в каждой ее точке химического потенциала μ 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

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

Здесь N и n — соответственно число частиц растворителя и растворенного вещества; μ_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

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

¹ 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

$$\mu' = -\frac{\partial \theta}{\partial n} = KT \ln \frac{n}{N} + \chi(P, T) + U'(x, y, z). \quad (I.1.2)$$

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 ΔC , то должен возникнуть поток растворителя, направленный через капилляр (пористую среду), связанный с различием химического потенциала растворителя на концах капилляра в объемной¹ части жидкости, заполняющей капилляр.

В соответствии с (I.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

¹ 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, ΔU — 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 возникать 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,¹ капиллярно-осмотические, термоосмотические и диффузионфоретические. Эти силы возникают у поверхности твердых тел в связи с непостоянством в растворе концентрации ионов (нейтральных молекул), энталпии 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 мембранны. 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 электрохимическим, 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,

¹ Электроосмос рассмотрен в гл. VII.

концентрация растворенных веществ будет возрастать, а в другом сосуде раствор будет обедняться. Если между сосудами поддерживать разность концентрации 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 энталпии 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 покрывают пленку 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 μ' в направлении, нормальному стенкам капилляра, обуславливает диффузный характер распределения концентрации растворенных веществ; с повышением C диффузный слой «сжимается» (рис. I.1). Химические же потенциалы растворенного вещества μ' и растворителя в растворе μ вдоль капилляра не равны.

В случае I химический потенциал растворителя в растворе в при-стеночном слое μ^C в соответствии с формулой (I.1.1) в левом конце капилляра μ^C_m ниже, чем в правом μ^C_n , т. е. $\mu^C_m < \mu^C_n$; в объеме же капилляра, наоборот, $\mu^C_m > \mu^C_n$. 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 правового конца. Для простоты здесь рассмотрен случай, когда потоком растворенных веществ по сравнению с потоком растворителя можно пренебречь.

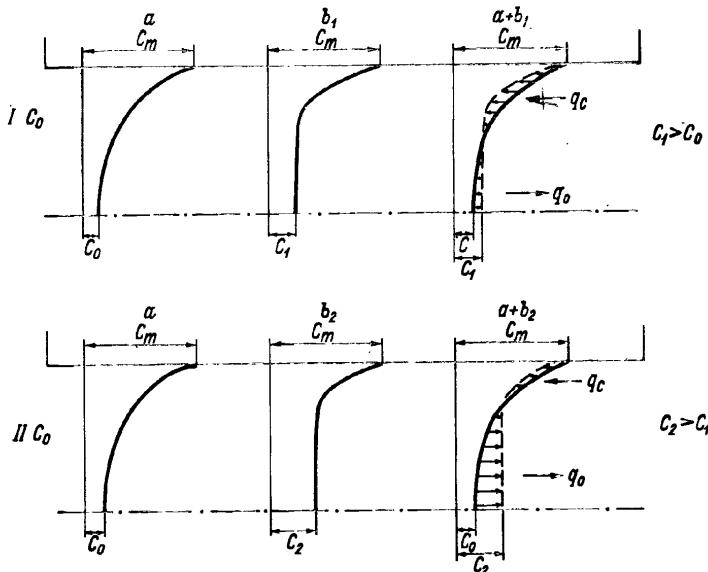


Рис. I.1. Капиллярный осмос и самодиффузия.

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 CaCl₂ в аналогичных опытах получены Б. Ф. Рельтовым и Н. А. Новицкой [167], которые при дальнейшем увеличении концентрации примерно до 20% наблюдали уже «нормальный» осмос.