

КУРС ЛЕКЦИЙ по учебным дисциплинам:

Физика нефтяного и газового пласта.

Подземная гидромеханика

Нефтепромысловая геология

Скважинная добыча нефти

Интенсификация разработки и повышения нефтеотдачи
пластов

Автор профессор
Германович П.К.

Рекомендуемая учебная литература

1. Профессор П.К. Германович. Курс лекций

Гидравлика и нефтегазовая гидромеханика

Часть 1 Гидромеханика

Часть 2 Подземная гидромеханика.

Электронное учебное пособие. УлГУ 2015, 2016

2 Профессор П.К. Германович. Курс лекций

Физика нефтяного и газового пласта

Электронное учебное пособие. УлГУ 2016

3. С.И. Иванов. Учебное пособие

Интенсификация притока нефти и газа к скважинам

Москва Недра 2006.

4. Е.Ф. Крейнин, Н.Д. Цхадая . Учебное пособие

Нефтепромысловая геология. Ухта 2011.

5. И.Т. Мищенко Учебник

Скважинная добыча нефти

РГУ нефти и газа Москва 2016

Лекция 1. Подземная гидромеханика как наука о движении нефти, газа и воды в пластах.

Вопросы лекции.

1. Предмет, цели, задачи и содержание курса
2. Подземная гидромеханика как основа технологии добычи нефти и газа.
3. Краткая характеристика важнейших этапов развития подземной гидромеханики.
4. Краткие сведения о классификации режимов нефте-газоводоносных пластов.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью изучения дисциплины « Подземная гидромеханика» является образование базы знаний о движении жидкостей и газов в пористых горных породах, то есть тех знаний, которые являются теоретической основой процессов нефтегазового дела

Задачи дисциплины сформировать у студентов комплекс знаний, необходимых для решения производственно-технологических, научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных задач отрасли, в том числе связанных с построением проектов разработки месторождений, моделирование сложных режимов работы скважин, задач хранения и переработки нефти

Дисциплина входит в часть цикла профессиональных дисциплин и относится к профилю «Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти»

Дисциплина базируется на курсах математических и естественнонаучных : Математика, Физика, Химия, Информатика, Экология, Физика пласта, читаемых в 1-5 семестрах, и на материалах цикла профессиональных дисциплин : Гидравлика и нефтегазовая гидромеханика, Термодинамика и теплопередача.

В результате изучения дисциплины студент должен :

знать:

- методы расчета и основные расчетные формулы теории упругого режима
- приближенные методы теории упругого режима
- постановку и решение задач неустановившихся течений жидкостей.
- постановку и решение задач вытеснения жидкости из пласта
- законы фильтрации несжимаемой и сжимаемой жидкостей,
- основные фильтрационно-емкостные параметры;
- методы расчета одномерных установившихся потоков жидкости и газа;
- постановку и решение задач неустановившихся течений газа
- основные понятия и уравнения многофазных потоков
- основные понятия фильтрации неньютоновских жидкостей
- основные модели численного моделирования задач подземной нефтегазовой гидромеханики.

уметь:

- решать и проводить анализ задач по темам
 - установившиеся потоки жидкости и газа;
 - неустановившееся течение упругой жидкости и газа
- решать и проводить анализ задач по темам: плоские потоки и решение плоских задач–особенности фильтрации неньютоновских жидкостей;
- многофазные потоки

владеть

- методиками расчета одномерных гомогенных и многофазных потоков жидкости и газа (при нестационарном и стационарном течении)

Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Количество часов (форма обучения очная)			
	Всего по плану	В т.ч. по семестрам		
		7	-	
1				
Аудиторные занятия:	54	54		
Лекции	18	18		
Практические и семинарские занятия	18	18		
Лабораторные работы (лабораторный практикум)	18	18		
Самостоятельная работа	54	54		
Всего часов по дисциплине	108	108		
	-	-	-	
Виды промежуточного контроля (экзамен, зачет)	зачёт	зачёт		
Общая трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах	3	3		

СОДЕРЖАНИЕ КУРСА

Тема 1. Введение в дисциплину. Подземная гидромеханика как наука о движении нефти, газа, и воды в пластах

Подземная гидромеханика как основа технологии добычи нефти и газа.. Краткая характеристика важнейших этапов развития подземной гидромеханики. Краткие сведения о классификации режимов нефте- и газо- водоносных пластов.

Тема 2. Законы фильтрации нефти, газа и воды

Основные понятия и определения, относящиеся к движению жидкости в пористой среде. Основные законы фильтрации. Определение коэффициента фильтрации. Безнапорное движение жидкости в пористой среде. Напорное движение жидкости в пористой среде. Особенности фильтрации неньютоновских жидкостей.

Тема 3. Математические модели однофазной фильтрации пластовых флюидов

Моделирование основных процессов фильтрации пластовых флюидов. Гидродинамические модели повышения нефте-газо-конденсатоотдачи.. Изотермическая фильтрация флюидов в нефтегазовых пластах

Тема 4. Установившееся и неуставившееся движение жидкости и газа в пористой среде

Установившееся движение жидкости и газа в пористой среде.. Неуставившееся движение жидкости и газа в пористой среде. Движение жидкости и газа в трещиноватых и трещиновато-пористых средах

Тема 5. Теория многофазной фильтрации несмешивающихся жидкостей

Смешивающиеся и несмешивающиеся жидкости. Смешивающиеся жидкости. Несмешивающиеся жидкости. Теория двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей. Основы теории фильтрации многофазных систем

Лекция 1. Подземная гидромеханика как наука о движении нефти, газа и воды в пластах.

1. Подземная гидромеханика как основа технологии добычи нефти и газа.
2. Краткая характеристика важнейших этапов развития подземной гидромеханики.
3. Краткие сведения о классификации режимов нефте- газо- водоносных пластов.

2 Краткая характеристика важнейших этапов развития подземной гидромеханики.

Общую историю подземной гидромеханики будет правильно разделить на два периода:

первый период – с середины девятнадцатого века до 1917 – 1920гг.;

второй период – с 1917 – 1920гг. до последнего времени.

Сравнивая состояние нефтепромыслового дела до и после 1920 года, следует отметить:

во-первых, резкое увеличение среднегодовой добычи нефти и газа во всём мире;

во-вторых, значительное усложнение проблем технологии добычи нефти и газа.

Проблемы собственно нефтяной подземной гидромеханики поставлены и начали систематически развиваться лишь после 1920 года.

В этот период свои исследования проводили академик Н.Н. Павловский, Н.Е. Жуковский, Л.С. Лейбензон, руководившие научными школами ГИНИ и МГУ. Большая заслуга учёных Гроз. НИИ.

3. Краткие сведения о классификации режимов нефти – газо – водоносных пластов.

Поведение нефти – газо – водоносного месторождения в процессе его разработки и эксплуатации зависит от множества факторов:

1. Искусственно создаваемые условия разработки и эксплуатации.
2. Структурно-тектонические особенности пласта.
3. Фациально-литологические свойства пласта.
4. Форма, протяжение, мощность и взаимное расположение скоплений газа, нефти и воды в пределах одного и того же пласта.
5. Физико-геологические и физико-химические свойства слагающих пласт горных пород.
6. Физические условия в пластах.
7. Химический состав нефти, газа и воды.

Для подземной гидромеханики достаточно учесть пять простейших режимов нефти – газо – водоносных пластов.

1. Водонапорный режим.

Нефть, газ вытесняются в скважины под действием напора краевой или подошвенной воды.

2. Газонапорный режим.

Нефть или вода вытесняются в скважины под действием напора сжатого газа.

3. Гравитационный режим.

а) в нефтеносном пласте имеется свободное зеркало нефти или в водоносном пласте – свободное зеркало воды; давление на свободном зеркале атмосферное;

б) нефть и вода залегают в крутопоставленном пласте: пласт снизу выклинивается и связь с областью питания снизу отсутствует.

4. Режим растворённого газа.

Давление в пласте снижается ниже давления насыщения, газ выходит из раствора и пузырьки газа, расширяясь, вытесняют нефть к скважине.

5. Упругий режим.

В этом случае существенное влияние на поведение пласта и скважин в процессе эксплуатации оказывает объёмная упругость не только газа, но нефти, воды и самого пласта.

Рассматривая все режимы можно сделать вывод:

Наибольшая отдача нефти из пласта и наиболее выгодные условия эксплуатации скважин получатся в условиях водонапорного режима.

Лекция 2. Законы фильтрации нефти, газа и воды

Вопросы лекции

- 1. Основные понятия и определения, относящиеся к движению жидкости в пористой среде.**
- 2. Основные законы фильтрации.**
- 3. Определение коэффициента фильтрации.**
- 4. Безнапорное движение жидкости в пористой среде.**
- 5. Напорное движение жидкости в пористой среде.**
- 6. Особенности фильтрации неньютоновских жидкостей.**

1. Основные понятия и определения, относящиеся к движению жидкости в пористой среде

*Движение жидкости через пористую среду называют **фильтрацией**.*

Движение жидкости за счёт разности давлений в пористой среде без образования свободной поверхности называют **напорной фильтрацией**, а если жидкость при фильтрации образует свободную поверхность – **безнапорной фильтрацией**.

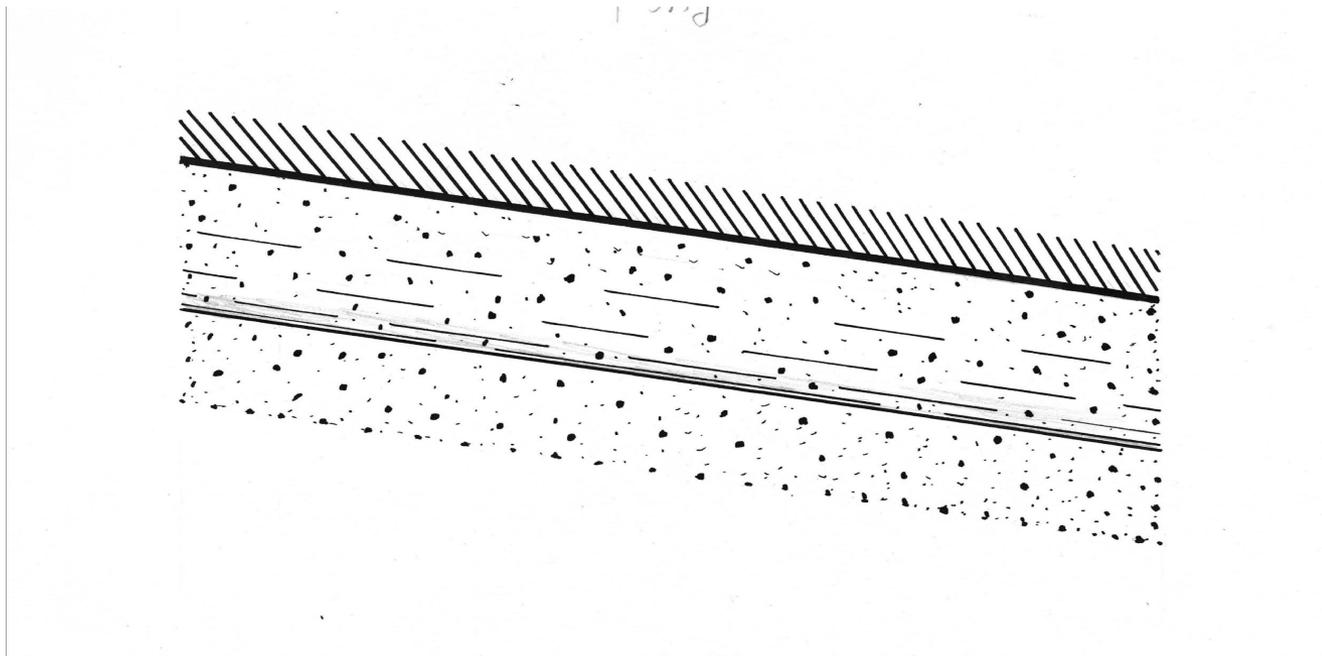


Рисунок 1- Фильтрация жидкости с образованием свободной поверхности, безнапорная фильтрация

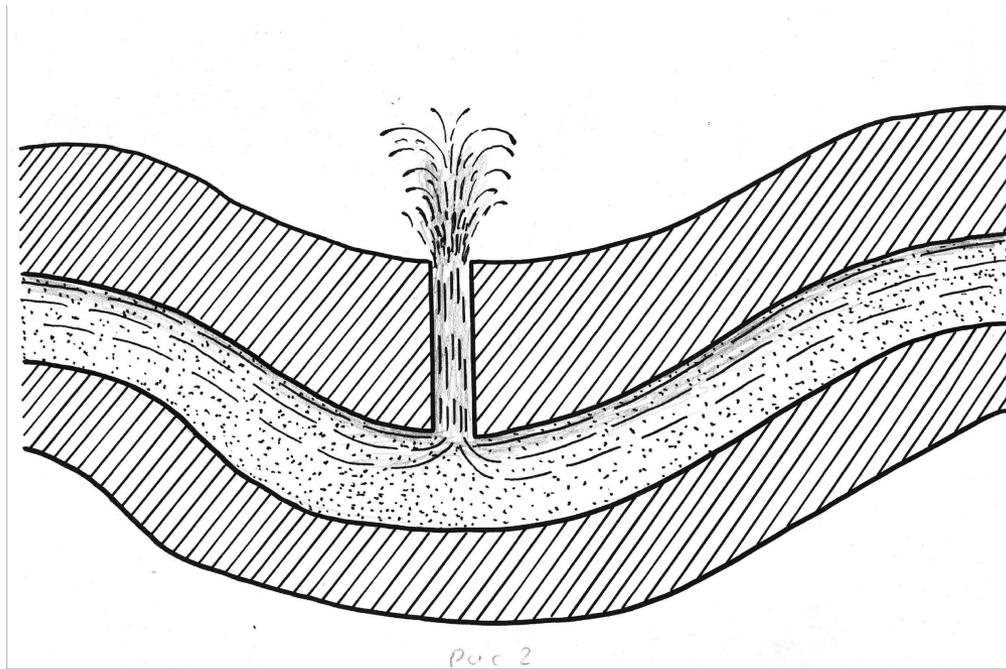


Рисунок 2- Фильтрация жидкости без образования свободной поверхности, напорная фильтрация.

Основные понятия.

Коэффициент пористости (m) – называют отношение объёма пор в породе (V_n) ко всему её объёму (V):

Коэффициент просветности (n) – это отношение площади пор в сечении породы (S_n) к площади всего сечения (S):

Среднее значение коэффициента n равно m .

Истинная скорость движения жидкости (V_d) это оношение Q (объёмного расход жидкости) к площади пор (S_n).

Скорость фильтрации (используется для практических расчётов) – это отношение Q (объёмного расход жидкости) к площади всего сечения (S);

так как $m < 1$, то скорость фильтрации меньше скорости движения жидкости .

Проницаемость – способность породы пропускать через себя жидкость. Эта способность для различных материалов разная и зависит от структуры породы.

2.Основной закон фильтрации

$$Q = kF \frac{h}{L},$$

где	Q	расход жидкости при фильтрации
	F	площадь фильтрации, под которой (напомним) понимают полное сечение всего фильтрующего слоя, включая сам грунт, так и поры между отдельными его частицами (для рассматриваемого случая F есть площадь поперечного сечения сосуда)
	h	потеря напора, равная и определяемая по разности показаний пьезометров
	L	толщина слоя грунта в направлении фильтрации
	k	так называемый коэффициент фильтрации, характеризующий одновременно как фильтрационные свойства пористой среды-грунта, так и физические свойства фильтрующейся жидкости.

Закон Дарси называют линейным законом фильтрации, т.к. при его соблюдении расход прямопропорционально разностям давлений

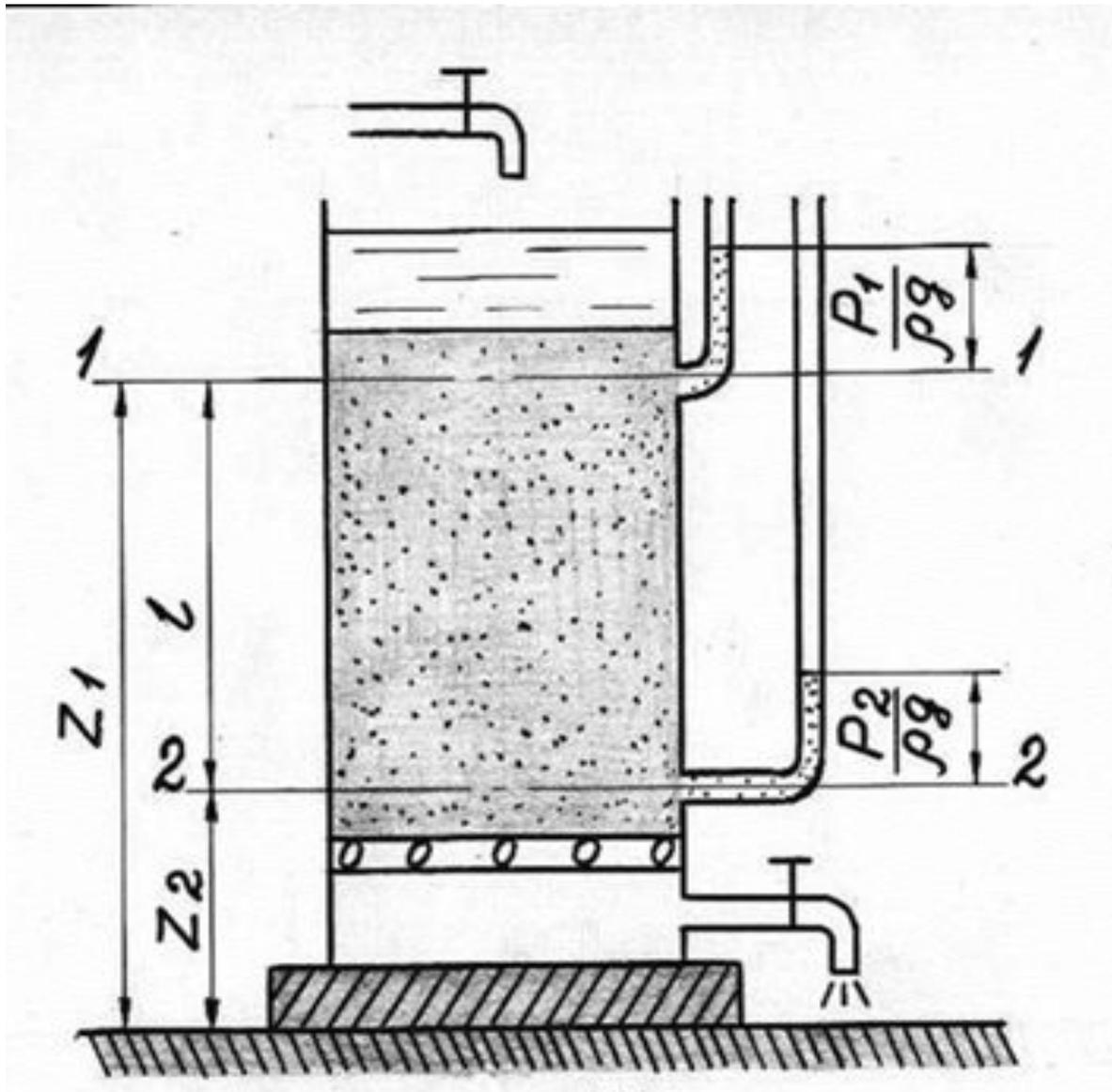


Рисунок 3- Прибор Дарси.

3 Определение коэффициента фильтрации

Коэффициент фильтрации обычно определяется опытным путем на установке и полученным данным с использованием формулы

$$K = \frac{Q \cdot L}{Fh}$$

, где

Q - расход жидкости при фильтрации

L – толщина слоя грунта в направлении фильтрации

F – площадь фильтрации (полное сечение фильтрующего слоя)

h – потеря напора.

Для теоретического определения используется формула Газена

$$K = c \frac{de^2}{\mu}$$

, где

de – эффективный диаметр, см.

c – коэффициент, учитывающий пористость грунта.

Для воды формула Газена

$$k = 75cd_e^2(0,7 + 0,03t)$$

t– температура воды, 0С.

По формуле Слихтера

$$k = 10,22 \frac{de^2}{\mu\sigma}$$

σ – коэффициент зависящий от пористости m и просвета n

$$\sigma = \frac{1-n}{n^2}$$

Для воды формула Слихтера

$$k = 766 \frac{de^2}{\sigma}$$

4. Безнапорное движение жидкости в пористой среде

В качестве примера безнапорного движения грунтовых вод можно рассматривать откачку воды из колодца или скважины, заложенной в водоносном пласте с горизонтальным непроницаемым слоем.

До начала откачки грунтовые воды в пласте находятся в покое и поверхность их горизонтальна. Если начать откачку воды из колодца, в водоносном слое начнется движение грунтовых вод к колодцу. При этом уровень воды в колодце понизится. Одновременно произойдет понижение уровня грунтовых вод в пласте; это понижение будет наибольшим у стенок колодца, постепенно убывая по мере отдаления от него (рисунок 4.). Чем интенсивнее будет производиться откачка, тем ниже будет располагаться уровень воды в колодце и тем больше будет его дебит (расход).

Расход фильтрации определяется по формуле

$$Q = \pi k \frac{H_{ст}^2 - H_{д}^2}{\ln \frac{R}{z_0}}$$

K – коэффициент фильтрации

$H_{ст}$ – напор в пласте на расстоянии R от оси колодца;

$H_{д}$ – уровень воды в колодце после откачки.

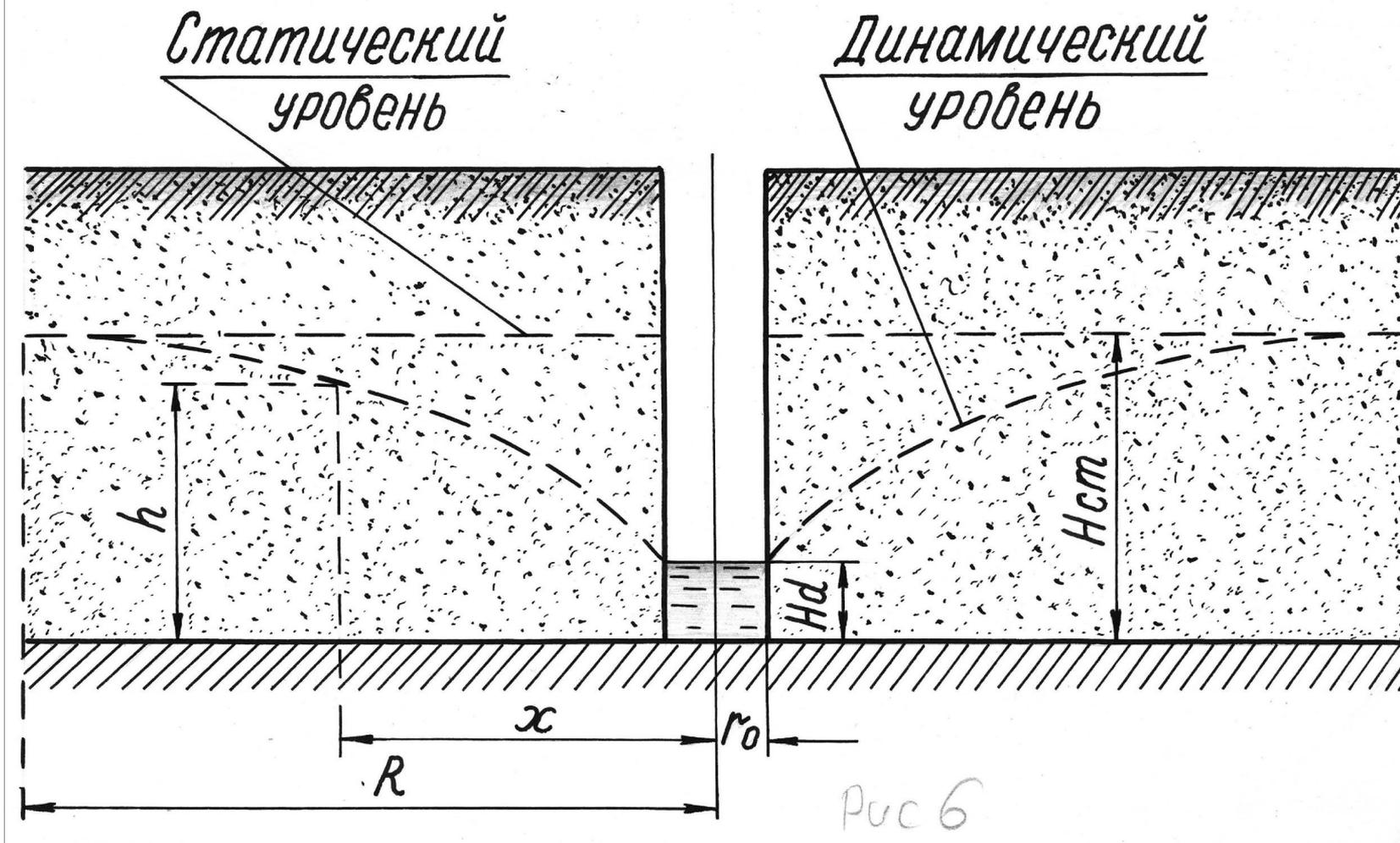


Рисунок 4- Безнапорное движение грунтовых вод при откачке воды из колодца.

Уровень стояния воды в колодце до начала откачки $H_{ст}$ одинаковый с уровнем во всем водоносном пласте, обычно называют статическим. Уровень H_d устанавливающийся в колодце в процессе откачки, носит название динамического, а сечение открытой поверхности уровня воды в пласте вертикальной плоскостью, проходящей через ось колодца, называется кривой падения уровня (схематически показана пунктиром на рисунке 5.).

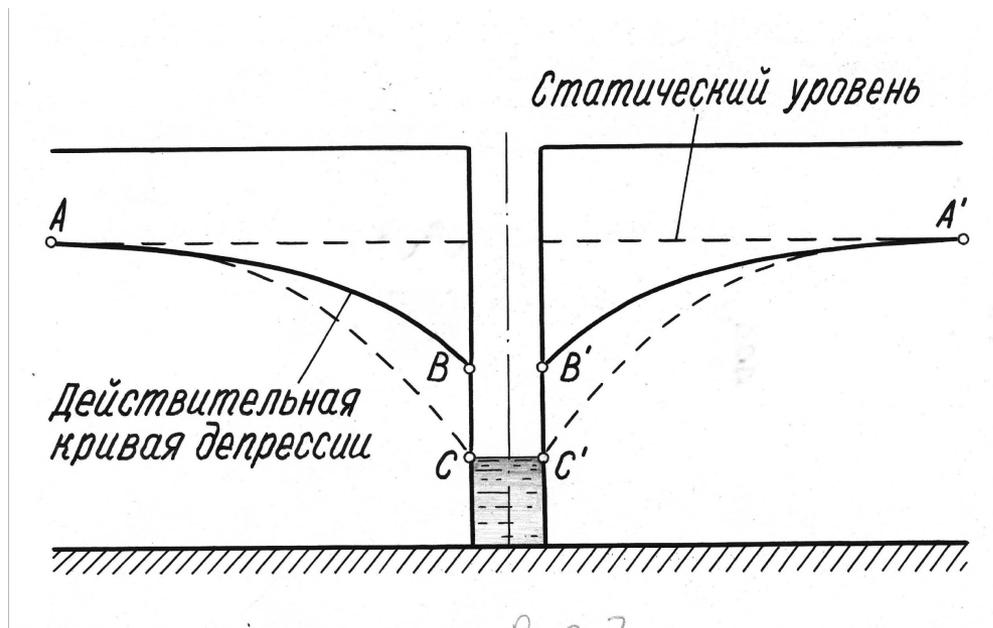


Рисунок 5- Действительная кривая депрессии.

5. НАПОРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

В качестве напорного движения можно рассматривать случай, когда водный пласт располагается между двумя водонепроницаемыми слоями и находится под избыточным давлением. Рассмотрим случай, когда водоносный пласт располагается между двумя водонепроницаемыми слоями и находится под избыточным давлением.

Если в таком пласте заложить колодец (скважину) и производить из него откачку воды, то толщина водоносного слоя, в отличие от случая, рассмотренного в предыдущем параграфе, изменяться не будет, а вместо этого будет изменяться давление в пласте, убывая по направлению к колодцу. Отметим, что в тех случаях, когда глубина колодца меньше напора, соответствующего давлению в пласте до начала откачки, колодец будет фонтанировать и вода самоизливаться на поверхность земли. Подобного рода колодцы (скважины) обычно называются артезианскими.

Расход в этом случае определяется:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot k \cdot A \frac{H_D - H_0}{\ln \frac{R}{r_0}}$$

A – толщина водоносного слоя.

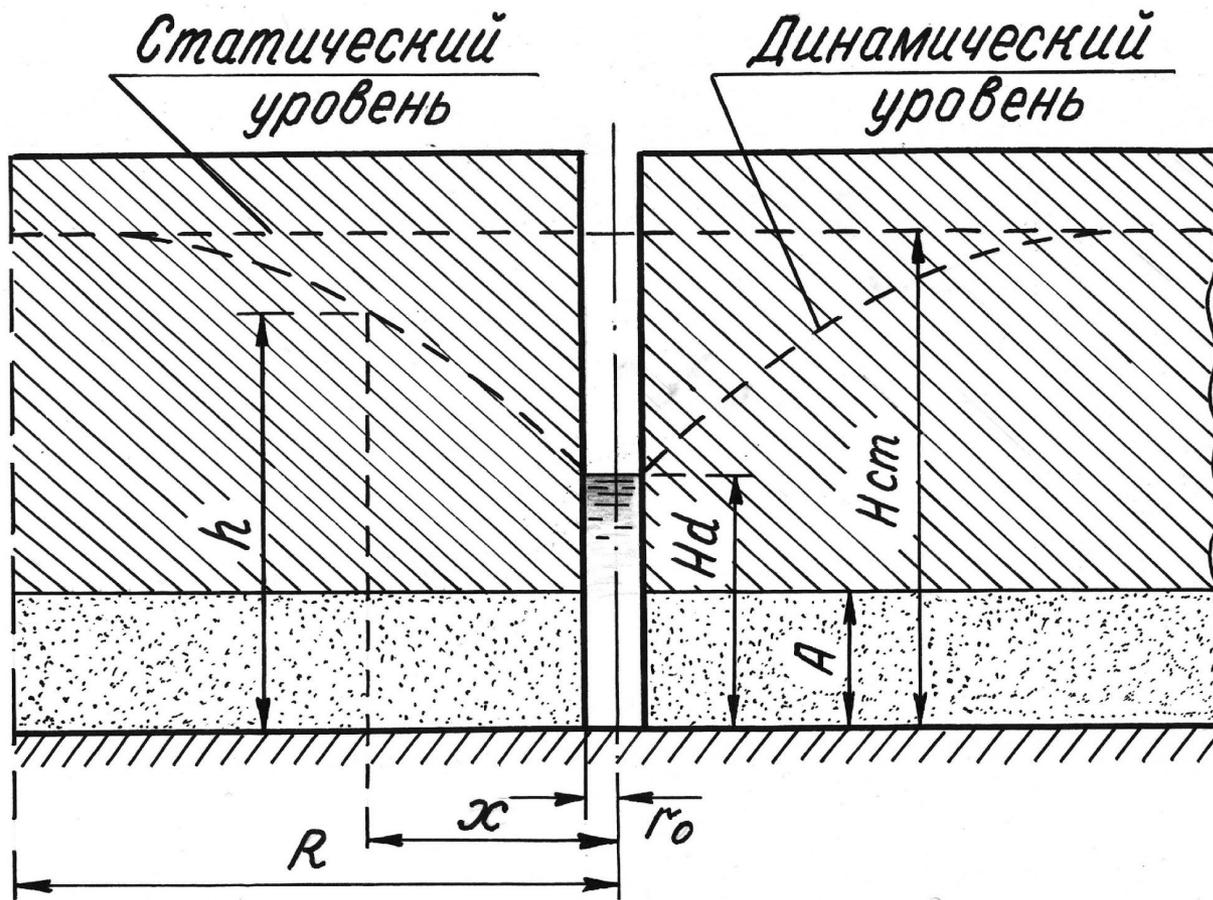


Рис 8

Рисунок 7- Напорное движение воды в колодце.

6. Особенности фильтрации неньютоновских жидкостей.

Одной из особенностей фильтрации неньютоновских жидкостей является сила трения, которая возникает при движении в пористой среде, так как соприкосновение между твёрдым скелетом и жидкостью происходит по огромной поверхности пустотного пространства и может достигать 10^4м^2 . Поэтому основным свойством является вязкость.

Другая особенность фильтрации состоит в том, что движение происходит с малыми скоростями, порядка микрометров в секунду. Поэтому процесс фильтрации с высокой степенью точности можно считать изотермическим.

Для изучения движения флюидов в пористых средах классический подход, т.е. теория, основанная на законах классической подземной гидромеханики, неэффективен. Нужен другой подход, который основан на теории термодинамики, т.е. с учётом давления, температуры, концентрации флюидов в породе.

Лекция 3. Математические модели однофазной фильтрации пластовых флюидов.

1. Моделирование основных процессов фильтрации пластовых флюидов.
2. Гидродинамические модели повышения нефте- газо- конденсатоотдачи.
2. Изотермическая фильтрация флюидов в нефтегазовых пластах.

Моделирование основных процессов фильтрации пластовых флюидов

Цели моделирования:

Первая – более научная – выявление общих закономерностей исследуемого процесса и получение в результате математической обработки полученных экспериментальных данных эмпирических физических (механических) законов.

Вторая – более практическая – прогнозирование результатов осуществления воздействия на реальные природные объекты. При моделировании могут быть использованы методы.

Метод физического моделирования

При этом методе могут использоваться не только искусственно создаваемые среды, но и образцы реальных пород. Он используется для достижения в основном первой цели, но может быть использован и для достижения второй.

Для достижения второй цели используются в основном *метод математического и аналогового моделирования*.

Математическое моделирование представляет собой постановку математической задачи, описывающей развитие данного процесса в пространстве и во времени и ее последующее решение. Задача может быть решена аналитически и числовое решение.

Аналоговое моделирование – является методом лабораторного физического моделирования, теоретическое обоснование которого лежит в сфере математического моделирования.

Гидродинамические моделирования, газоконденсатоотдачи пластов

Повышение эффективности разработки и эксплуатации нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений в значительной степени определяется уровнем фундаментальных исследований в этой области.

Как любая физико-математическая дисциплина, подземная гидродинамика оперирует не с реальными объектами, а с их моделями.

При создании моделей стремятся с одной стороны получить наиболее полное описание объекта, с другой – обеспечить простоту, обзримость и разрешимость уровней. Анализ модели и следствий из нее дает обобщенную информацию, позволяющую сделать выводы или построить гипотезы о поведении класса объектов. Так классическая модель кругового пласта с центральной скважиной приводит к формуле Дюпюи

$$Q = \frac{2\pi kh}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{l_n(R_k / r_c)}$$

где Q - дебит скважины; r_c – радиус скважины; K – проницаемость пласта
 h – толщина пласта; μ - вязкая флюида; ΔP - перепад давления
 R_k - радиус контура питания

Помимо своего прямого параметра расчета Q , формула отражает несколько принципиально важных факторов:

- роль комплекса kh/m как обобщенной характеристики проводимости пласта;
- линейность зависимости дебита от перепада давления ;
- очень слабую, но логарифмическую зависимость дебита от радиуса контура питания R_k .

В подземной гидромеханике в зависимости от масштабов и задач могут применяться 4 класса моделей.

Микромодели – в них пористая среда моделируется упрощенной геометрической схемой, причем внутри ее описывается течение жидкости уравнением обычной гидромеханики. На таких моделях детально исследуется механизм фильтрации течений, решаются задачи массопереноса, определяется физический смысл коэффициентов и функций, входящих в уравнение фильтрации на более масштабных уровнях.

Модели мезоуровня - это модели лабораторного масштаба. Их цель – качественное и частично количественное изучение новых физических процессов при фильтрации.

Модели микроуровня – они описывают течение жидкости вблизи одной скважины или небольшой группы скважин с учетом распределения проницаемости и пористости по толщине пласта. Цель этих моделей - анализ течения в произвольной зоне скважин или элементов системы скважин, оценка влияния различных геолого-физических факторов.

Модели мегауровня - гидродинамические схемы разработки крупных месторождений. На их применение возлагается большинство нереализованных на точное проектирование и планирование разработки.

Для каждого рассмотренного уровня можно указать удачные и неудачные модели.

В последнее время при построении и освоивании моделей подземной гидромеханики применяют новые математические модели. Новейшие, так называемые **перколяционные** модели достаточно полно отражают, например, процессы двухфазной фильтрации, включая теорию относительных проницаемостей, и позволяют описать такие более мелкие процессы – капиллярный гистерезис и неравновесность.

Методы подземной гидромеханики эффективны при изучении свойств фильтрационной системы, которые характерны для большой системы. Примером такой системы является нефтяной или газовый пласт, рассматриваемый совместно со скважинами.

Изотермическая фильтрация флюидов в нефтяных пластах

традиционный подход к расчету разработки и эксплуатации нефтяных и газовых залежей основывается на теории фильтрации. Система уравнений фильтрации включает в себя закон фильтрации, уравнения непрерывности (для простоты рассмотрим случай изотермической фильтрации), которые записываются в локальных переменных.

При рассмотрении изотермической фильтрации в принципе можно рассмотреть совместную работу пласта и скважин. При этом следует выписать уравнение фильтрации $(\rho_m Q_i \dots) = 0$

Проведя математическую обработку вышеуказанных уравнений можно получить уравнение для P и Q в виде

$$-\frac{M}{K} Q = \frac{\partial P}{\partial x} + T_1 \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t}$$

$$Q = \sqrt{\frac{K}{\mu T \gamma}} P$$

$$P = \frac{Q}{\sqrt{\frac{K}{\mu T \gamma}}}$$

Решая это уравнение можно получить выражение для P и Q

$$Q = \sqrt{\frac{K}{\mu T \gamma}} P$$

$$P = \frac{Q}{\sqrt{\frac{K}{\mu T \gamma}}}$$

где K - коэффициент фильтрации

μ - относительная вязкость

T - коэффициент релаксации

γ - удельный вес

Лекция 4. Установившееся и неуставившееся движение жидкости и газа в пористой среде.

Вопросы лекции

- 1. Установившееся движение жидкости и газа в пористой среде.**
- 2. Неуставившееся движение жидкости в пористой среде.**
- 3. Движение жидкости и газа в трещиноватых и трещиновато-пористых средах.**

1. Установившееся движение жидкости и газа в пористой среде

При установившемся движении каждая точка пространства характеризуется определенной не изменяющейся во времени скоростью

$$V = f(x, y, z)$$

При установившемся движении рассматриваются три типа фильтрационных потоков.

1 тип одномерный – в любой точке потока скорость фильтрации и напор являются функциями только одной координаты x .

2 тип двухмерный – частицы жидкости движутся параллельно одной и той же плоскости. Двухмерно-радиальное – движение траекторий частиц происходит по прямым линиям, сходящимися (расходящимися) радиально в одной точке.

3 тип пространственный или трёхмерный – частицы жидкости движутся в пористой среде так, что их скорости фильтрации не параллельны одной и той же плоскости.

Если все траектории прямолинейны и радиально сходятся в одной точке (или расходятся), то такое движение называется трёхмерным радиальным или сферическим радиальным.

Параллельно-прямолинейная фильтрация – линии тока жидкости параллельны друг другу, а поля скоростей и приведённых давлений для любого горизонтального тока сечения пласта будут одинаковыми. Рассмотрим случай фильтрации жидкости в прямолинейном пласте (рисунке 4.1.).

$$Q = \frac{\kappa}{\eta} \cdot \frac{P_K - P_I}{L} B h$$

Q – расход (дебет) галереи (правая граница пласта).

Пусть имеется пласт в форме параллелепипеда длиной L , шириною (в плане) B и толщиной h с непроницаемыми кровлей и подошвой (например, с расположенными выше и ниже него глинистыми пластами).

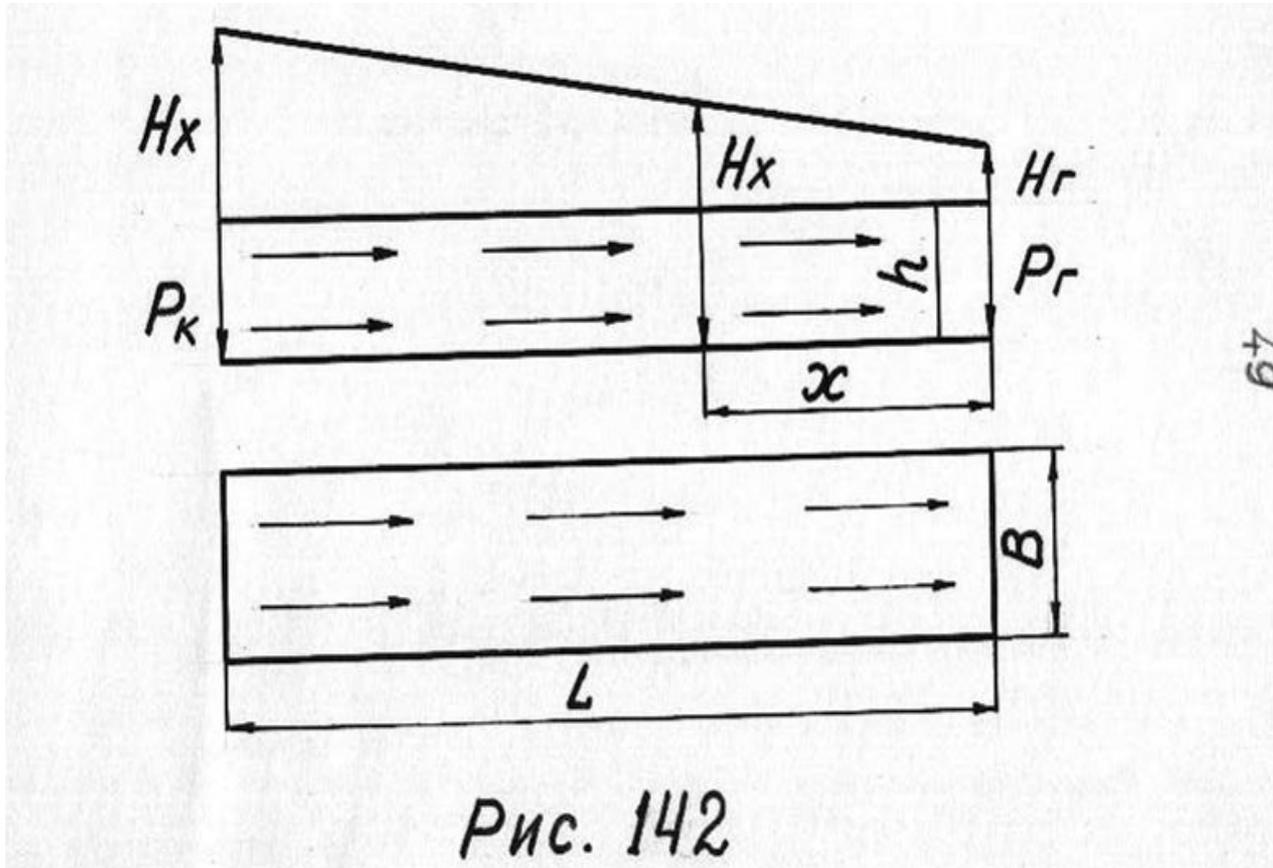


Рисунок 4.1. Прямолинейный пласт.

На левой границе пласта, принимаемой за *контур питания*, давление p_k , на правой, называемой *галереей*, - p_r .

Контуром питания называется изобарическая (с одинаковым в любой точке приведенным давлением, в данном случае p_n) поверхность, **галереей** - условный вертикальный срез пласта, нормальный к линиям тока. За контур питания может быть принято любое живое сечение пласта, где давление известно и при фильтрации считается постоянным.

Этим давлениям соответствуют напоры H_k и H_r . так как площадь фильтрации ($s = Bh$) постоянна по длине пласта, линии тока жидкости будут параллельны друг другу, а поля скоростей и приведенных давлений для любого горизонтального параллельного линиям тока сечения пласта будут одинаковыми (поперечных перетоков жидкости в нем нет). Такую фильтрацию называют *прямолинейно-параллельной*. Она происходила в опытах Дарси. (Напомним, что приведенные давления не зависят от положения пласта в пространстве).

$$Q = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{P_K - P_\Gamma}{L} B \cdot h.$$

Скорость фильтрации, одинаковая для любого живого сечения пласта, определяется по выражению

$$v = \frac{k}{\eta} \cdot \frac{P_K - P_\Gamma}{L}$$

Возьмем параллельное галерее произвольное живое сечение пласта, отстоящее от нее на расстоянии x , давление в котором равно p , а напор Hx . приняв его за контур питания, запишем закон Дарси и выразим из него p :

$$p = p_{\Gamma} + \frac{Q \cdot \eta \cdot x}{k B h}$$

Подставив в это выражение значение Q из закона Дарси, получим закон распределения давления по длине пласта:

$$p = p_{\Gamma} + \frac{p_{\kappa} - p_{\Gamma}}{L} \cdot x$$

Линия падения давлений, следовательно, и соответствующих им напоров $H = p / (\rho g)$ представляет собой прямую (рисунок 4.1).

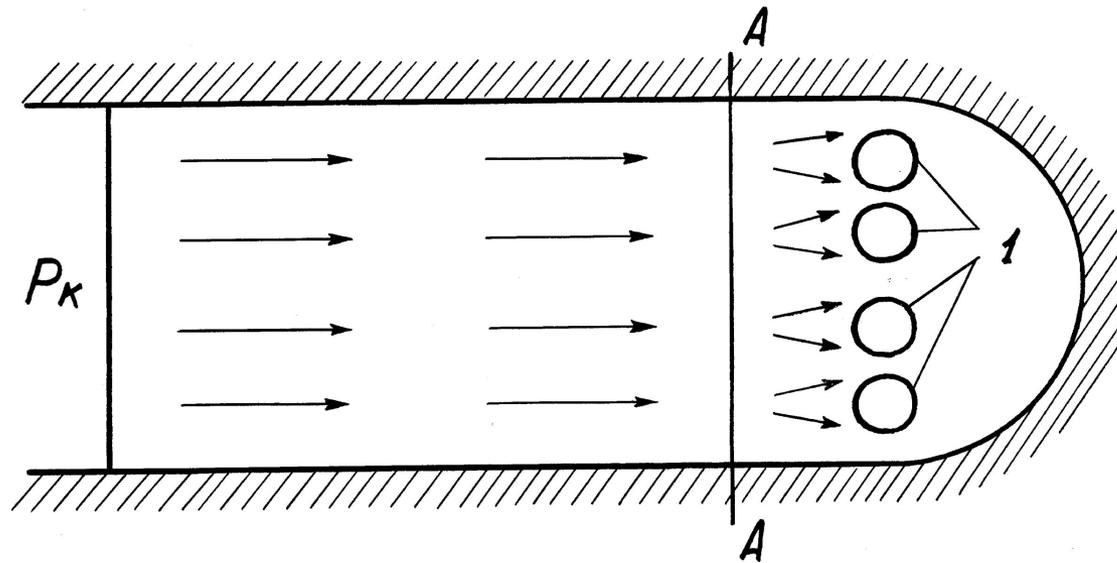


Рис. 143

Рисунок 4.2-Прямолинейный пласт.

При разработке нефтяных месторождений примером фильтрации, близкой к прямолинейно-параллельной, служит фильтрация в полосовой залежи, эксплуатирующейся прямолинейной цепочкой скважин (рисунок 4.2).

2. Неустановившееся движение жидкости и газа в пористой среде.

При неустановившемся движении скорость в каждой данной точке пространства изменяется с течением времени

$$V = f(x, y, z, t)$$

При отборе жидкости из галереи давление в ней будет меньше первоначального Рк. Вследствие этого в пласте начнётся первая фаза неустановившейся фильтрации жидкости.

Задача о первой фазе неустановившейся одномерной фильтрации рассматривается:

первый случай – это, когда дебет галереи является постоянным и равен

$$Q = \frac{KF}{\mu} \cdot \frac{P_K - P_\Gamma}{x_K}$$

x_K – расстояние от галереи до точки замера;

μ - абсолютная динамическая вязкость.

P_Γ – давление в галереи;

P_K – первоначальное давление;

F – площадь вертикального сечения пласта.

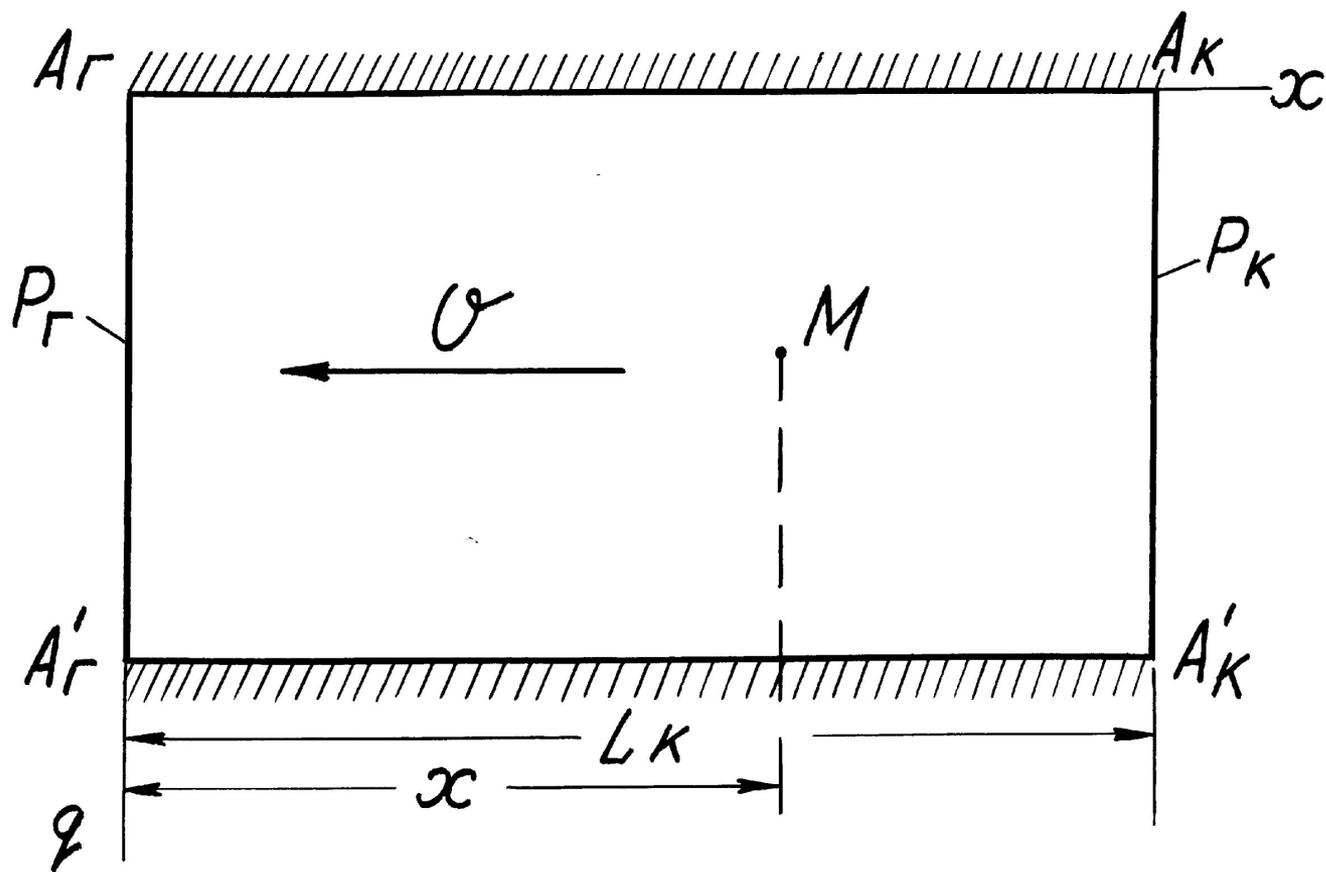


Рисунок 4.2а. Горизонтальное сечение элемента пласта в условиях одномерного потока.

второй случай – это случай, когда в галерее поддерживается постоянное противодействие.

Объём жидкости ($Q_{\text{доп}}$) извлечённый из пласта за время T будет равен:

$$Q_{\text{доп}} = \frac{1}{2} m F L_k \rho_k \beta (P_k - P_r)$$

β – коэффициент объёмного упругого расширения жидкости;

F – площадь вертикального сечения пласта;

K – коэффициент фильтрации;

P_k – давление на контуре питания;

P_r – давление галерее (правая граница пласта);

L_k – длина пласта;

B – ширина пласта;

m – пористость;

μ – динамическая вязкость.

$V_{\text{кп}}$ – объём порового пространства пласта

ρ_k – плотность жидкости на контуре

Плоско-радиальная фильтрация – линии тока жидкости направлены от контура питания к скважине по радиусу пласта, а поля скоростей фильтраций и давлений для любого его сечения одинаковы

$$Q = \frac{2\pi kh}{\eta} \cdot \frac{P_K - P_C}{\ln\left(\frac{R_K}{r_c}\right)}$$

P_C – давление в скважине;

r_c – радиус скважины;

R_K – радиус контура;

$P_K - P_C$ – депрессия.

$$P = P_C + \frac{P_K - P_C}{\ln\left(\frac{R_K}{r_c}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_c}\right)$$

r – произвольный радиус.

Из уравнения видно, что закон распределения давлений (напоров) логарифмический.

Поверхность, образуемая от вращения логарифмической пьезометрической линии, соединяющей динамические уровни, называют воронкой депрессии.

$V_{КП}$ – объём корового пространства пласта;

L_K – расстояние до контура питания;

m – масса жидкости.

Плоскорадиальная фильтрация. Рассмотрим другой простейший случай фильтрационного потока – *плоскорадиальную* фильтрацию несжимаемой жидкости. Пусть скважина расположена в центре кругового пласта толщиной h (рисунок 4.3.).

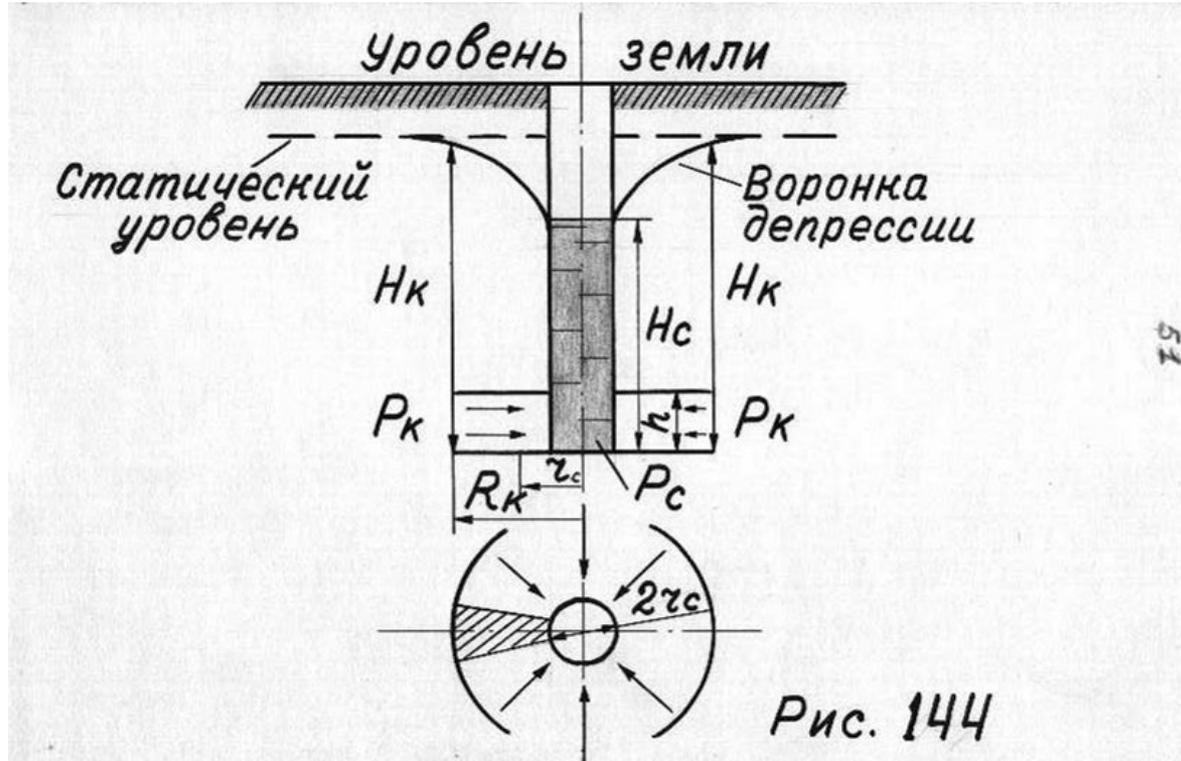


Рисунок 4.3. Плоскорадиальная фильтрация жидкости.

В этом случае дебит скважины определяется законом Дарси для плоскорадиальной фильтрации, её называют *формулой Дюпюи*, которая считается основной при расчетах, связанных с эксплуатацией нефтяных месторождений, а также водяных артезианских скважин.

разность давлений $p_k - p_c$ называют *депрессией*.

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot h}{\eta} \cdot \frac{p_k - p_c}{\ln(R_k / r_c)},$$

В формуле значение R_k находится под логарифмом, поэтому ошибка в его определении незначительно сказывается на дебете. Обычно за R_k (если скважина одна) принимают расстояние от скважины до границы водонефтяного контакта, а если пласт разрабатывается большим числом скважин, то за R_k принимают половину расстояния между ними.

Приняв за R_k произвольный радиус r , а за p_k соответствующее этому радиусу давление в пласте p , разрешим формулу Дюпюи относительно p :

$$p = p_c + \frac{Q \cdot \eta}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot h} l \cdot n \cdot (r / r_c)$$

Заменив в этом выражении Q на полученное из выражения , имеем:

$$p = p_c + \frac{p_k - p_c}{l \cdot n (R_k / r_c)} l \cdot n \cdot (r / r_c)$$

Из полученных уравнений видно, что закон **распределения давлений** (а, следовательно, и динамических напоров) при плоско-радиальной фильтрации **логарифмический**. Поверхность, образующуюся от вращения логарифмической пьезометрической линии, соединяющей динамические уровни, называют **воронкой депрессии** (рисунок 4.3.).

Из анализа формулы или рассмотрения воронки депрессии видно, что наибольшие потери давления (или соответствующие им потери напора) происходят вблизи от скважины (в **призабойной зоне**).

В промышленных условиях для повышения дебита скважин проницаемость призабойной зоны стремятся увеличить. Для этого проводят гидравлические разрывы пласта, обработку такой зоны кислотой (если пласт состоит из карбонатных пород) и другие технологические операции, облегчающие приток нефти или газа к скважинам.

По последней формуле можно определить давление p в любой точке пласта, отстоящей от скважины на произвольном расстоянии r .

3 Движение жидкостей и газов в трещиноватых и трещиновато-пористых средах

Если при движении жидкости в пористой среде число Re превышает $Re_{кр}$, то фильтрация не подчиняется линейному закону фильтрации. Для некоторых данных жидкости или газа большие значения параметра Re могут иметь место либо вследствие высоких скоростей фильтрации, когда $V > V_{кр}$ (при $V < V_{кр}$) либо из-за больших диаметров частиц, слагающих пористую среду.

При относительно небольших скоростях фильтрации нарушение линейного закона фильтрации может иметь место в крупнозернистых, трещиноватых и трещиновато-пористых породах, т.е. при больших поперечных размерах поровых каналов. Это подтверждается опытами по фильтрации жидкостей в трещиноватых и трещиновато-пористых средах.

Существует несколько эмпирических формул, предложенных различными авторами в качестве законов фильтрации, отличных от линейного закона фильтрации.

К числу таких формул можно отнести следующие.
Формула для скорости фильтрации А.Н. Пузыревского для
фильтрации в крупнообломочных материалах

$$V = 35 Vi$$

где V – скорость фильтрации;
 i - гидравлический уклон.

Формула А.А. Краснопольского для фильтрации воды в трещиноватых
породах

где K_k - коэффициент Краснопольского (определяется
экспериментально)

Поскольку в формуле между гидравлическим уклоном i (а следовательно и потерей напора в трещине) и скоростью фильтрации V существует квадратичная зависимость, фильтрацию по закону Краснопольского часто называют по аналогии с трубной гидравликой *турбулентной фильтрацией*.

На основании опытов с трещиноватых грунтах была выведена следующая формула

где V – скорость
фильтрации;

$$V = 173 \left(\frac{d}{90} i \right)^n$$

d - диаметр зерен
породы;

i - гидравлический
уклон;

n –показатель степени.

$$n = \frac{0,8+d}{0,8+2d} < 1$$

Из формул видно, что с увеличением размеров зерен величина показателя степени уменьшается и, следовательно, отклонение от линейного закона фильтрации увеличивается.

На основании данных опытных откачек был предложен закон фильтрации в виде

$$V = Kc i^n ,$$

где Kc - коэффициент фильтрации;

i -гидравлический уклон.

n = показатель степени Впоследствии стали считать, что величина показателя степени n изменяется в пределах $1 > n \geq 0,5$

Численные значения Kc и n в каждом случае определяются из опыта.

Рассматривая формулы легко видеть, что все они по существу совпадают с предыдущей формулой . Общей характерной особенностью для них является нелинейная зависимость между скоростью фильтрации V и гидравлическим уклоном i , а, следовательно, и градиентом давления , отличающимися от i на постоянный множитель удельный вес жидкости.

Показатель режима фильтрации n во всех указанных законах фильтрации определяется неравенством предыдущим, причём n принимается постоянной величиной.

Все приведённые законы фильтрации являются эмпирическими и содержат ряд постоянных коэффициентов, величина которых определяется экспериментально.

Лекция 5. Теория многофазной фильтрации несмешивающихся жидкостей.

1. Смешивающиеся и несмешивающиеся жидкости.

2. Теория двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей.

Основы теории фильтрации многофазных систем.

Теория двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей.

Движение смеси нефти и воды в пористых пластах имеет место при вытеснении нефти водой (когда вода продвигается в области, первоначально занятой нефтью).

Изучение фильтрации смеси нефти и воды производится лишь экспериментальным путём.

Вероятный механизм фильтрации нефте-водяной смеси может быть представлен в следующем виде. Большая часть нефти движется по более крупным порам, причём каждый такой поровый канал, по видимому, полностью заполнен нефтью (исключая случаи очень низкого насыщения нефтью, когда она может двигаться в виде отдельных пузырьков). Вода фильтруется по каналам, не занятым нефтью, и в виде непрерывных плёнок вокруг песчинок.

Полученные результаты экспериментальных исследований фильтрации смеси нефти и воды, дают основания сделать следующие выводы:

1. Фазовая проницаемость несцементированных песков для нефте-водяной смеси существенно не зависит от вязкости каждой фазы, зависит от размеров и формы поровых каналов/ Следовательно, при вытеснении нефти водой величина нефтеотдачи равна менее 80%.
2. Наличие в пласте до 20% неподвижной нефти снижает в 2 раза фазовую проницаемость для воды, что следует учитывать при решении задач о продвижении контуров водоносности в нефтяных месторождениях с водонапорным режимом.
3. При наличии в порах несцементированных песков до 30% воды скважины могут давать чистую нефть.
4. При поступлении из скважины водно-нефтяной смеси можно добиться повышения процента нефти в смеси путём обработки призабойной зоны пласта веществами, понижающими отношение вязкости и понижающими силы поверхности натяжения.
5. На основе экспериментальных работ считают крайне нежелательной эксплуатацию нефтяных залежей (содержащих, кроме нефти, воду) при градиентах давления в пласте больше 0,68 ат/м, так как в этом случае количество скважин велико.

Основы теории фильтрации многофазных систем можно рассмотреть на примере фильтрации смеси нефти, воды и газа. В настоящее время большинство исследователей полагает, что каждая песчинка слагающей пласт породы обычно окружена пленкой связанной воды а следовательно, при движении газированной нефти в пластах имеются три фазы компонента – нефть, газ и вода.

Механизм фильтрации трехфазной смеси. На основании проведенных экспериментальных исследований движение смеси нефти, воды и газа в несцементированных песках выдвигается следующая гипотеза о механизме фильтрации трехфазной смеси. Вода полностью окружает каждое звено песка и при очень малых водонасыщенностях существует в виде пленки вокруг зерен. При наличии больших количеств воды она образует водяные кольца вокруг точек общего контакта зерен. Эти кольца растут и при увеличении водонасыщенности в конечном счете соединяются.

Нефть при отсутствии газа и высокой нефтенасыщенности (в конечном счете) существует как непрерывная перепонка, заключенных в покрытых водой зернах песка. По мере этого как нефтенасыщенность уменьшается более узкие части «нефтяной перепонки» сжимаются и, наконец, разрываются, превращая нефть в рассеянные пузырьки.

В условиях движения система ведет себя так, как будто бы нефть и вода двигаются плавно, каждая через свою часть жидких перепонок, без разрыва или искажения т.е. течение кажется скорее струйным, чем капельным. При очень малых насыщениях движение напоминает пузырьчатое (капельное).

При наличии газа характер движения воды остается неизменным, но в то время, как газ стремится занять центральные части пространства между зернами, куда нефть также проталкивается капиллярными силами, вероятно имеет место взаимодействие между нефтью и газом при их движении.

Наблюдение под микроскопом показывает присутствие нефтяной пленки (в некоторых случаях вместе с очень малыми количествами распыленной воды). По этой пленке нефть движется вокруг каждого газового пузырька. Остается неясным, все ли газовые пузырьки соединяются друг с другом.

Газовые пузырьки двигаются отрывистыми толчками в отличие от плавного течения воды и нефти в условиях, когда газовые пузырьки отсутствуют или неподвижны. Это отрывистое движение газа обуславливает подобное движение по меньшей мере части нефти которая, видимо, движется быстрее, чем при отсутствии газа и при той же нефтенасыщенности.

Ровным образом присутствие нефти будет препятствовать как частичное препятствие для движения газа.

Наконец, увеличение нефтепроницаемости с повышением водонасыщенности при постоянном нефтенасыщении является результатом перемещения нефти в центральной части пространства между зернами, где она может течь более свободно.

Вводимая в пласт вода имеет тенденцию занимать узкие искривленные части пор вытесняя нефть в центральное пространство, покинутое газом. Так как движение в узких частях пор смеси затруднено, а движение в центральной части пор встречает меньшее сопротивление, то эффективная проницаемость для нефти увеличивается.

Однако, несмотря на многочисленность проведенных опытов по фильтрации неоднородных жидкостей многие вопросы, связанные с движением многофазных смесей в пористых пластах, остается еще невыясненными. Особенно смеси нефти, газа и воды в песках, песчаниках и карбонатных породах с учетом изменений свойств смесей .

Статический
уровень

Динамический
уровень

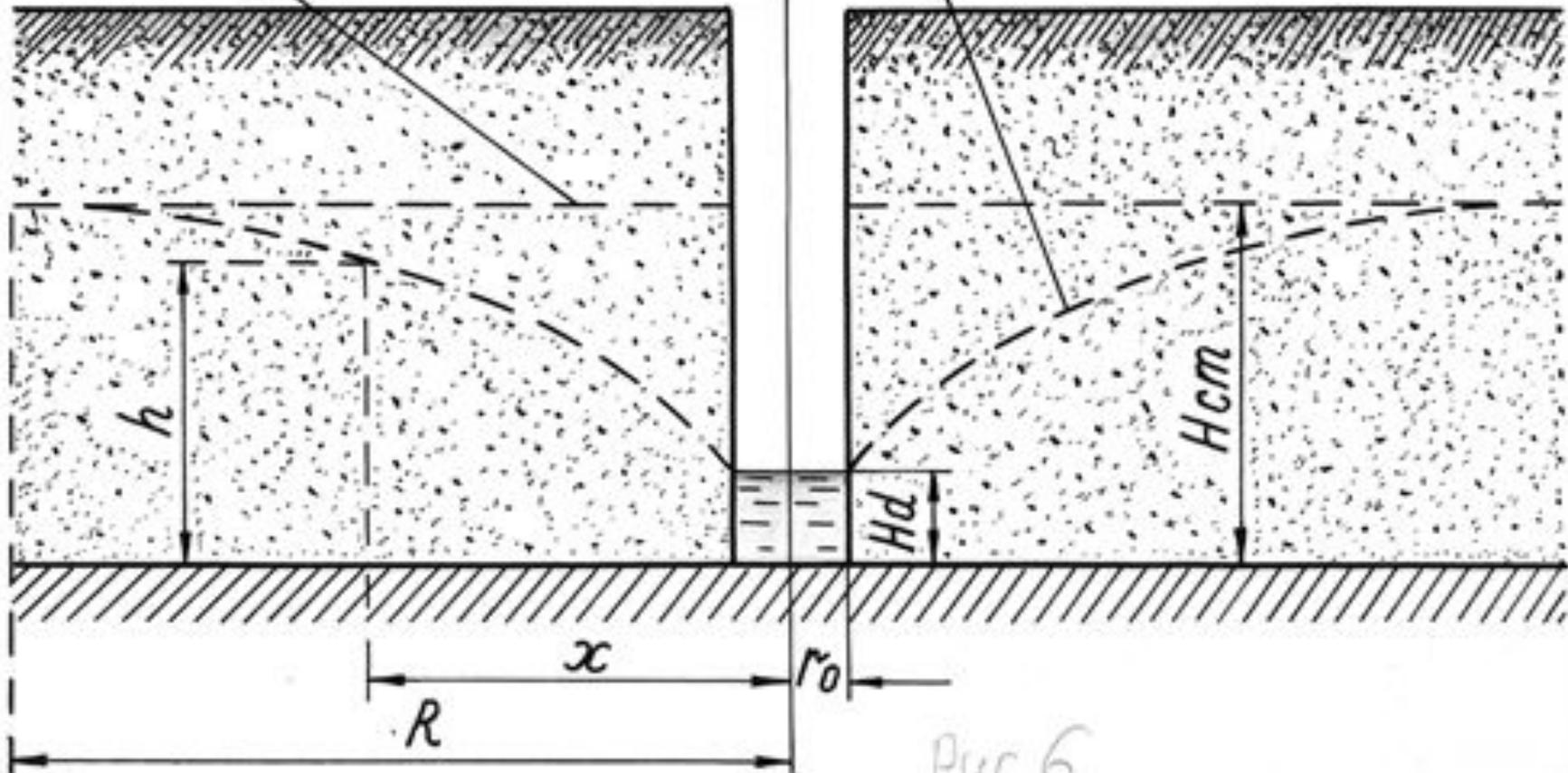


Рис 6

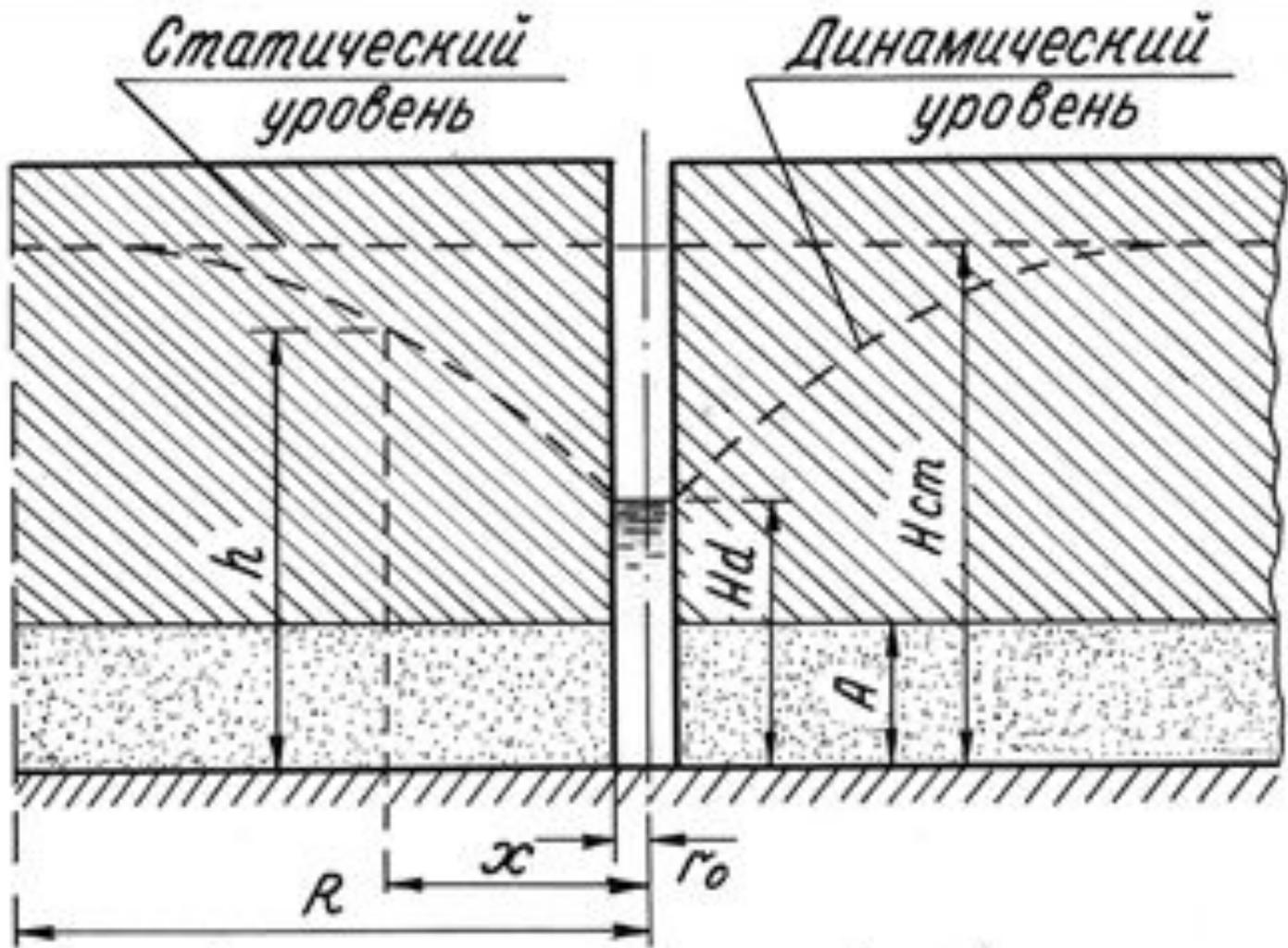
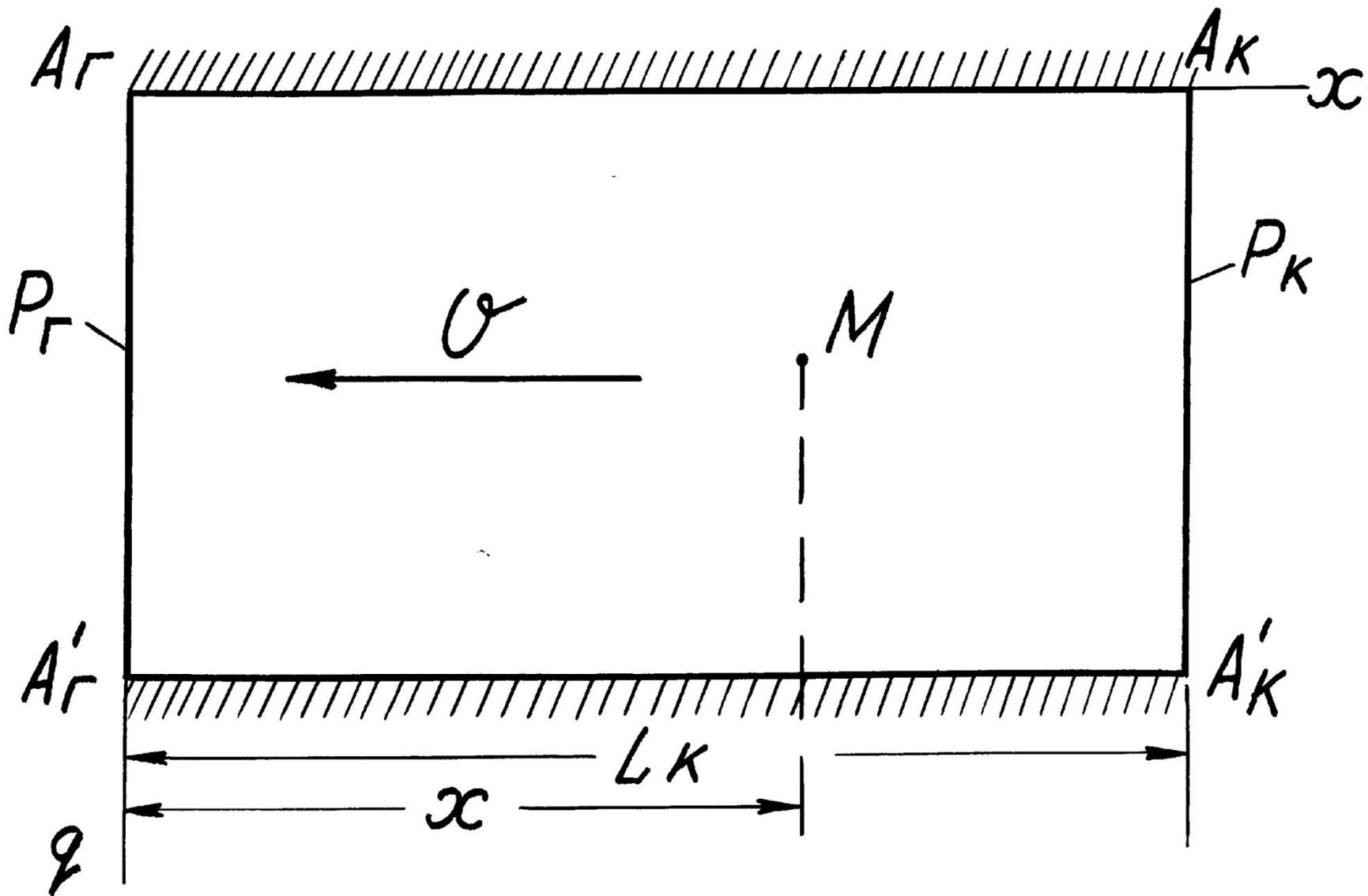
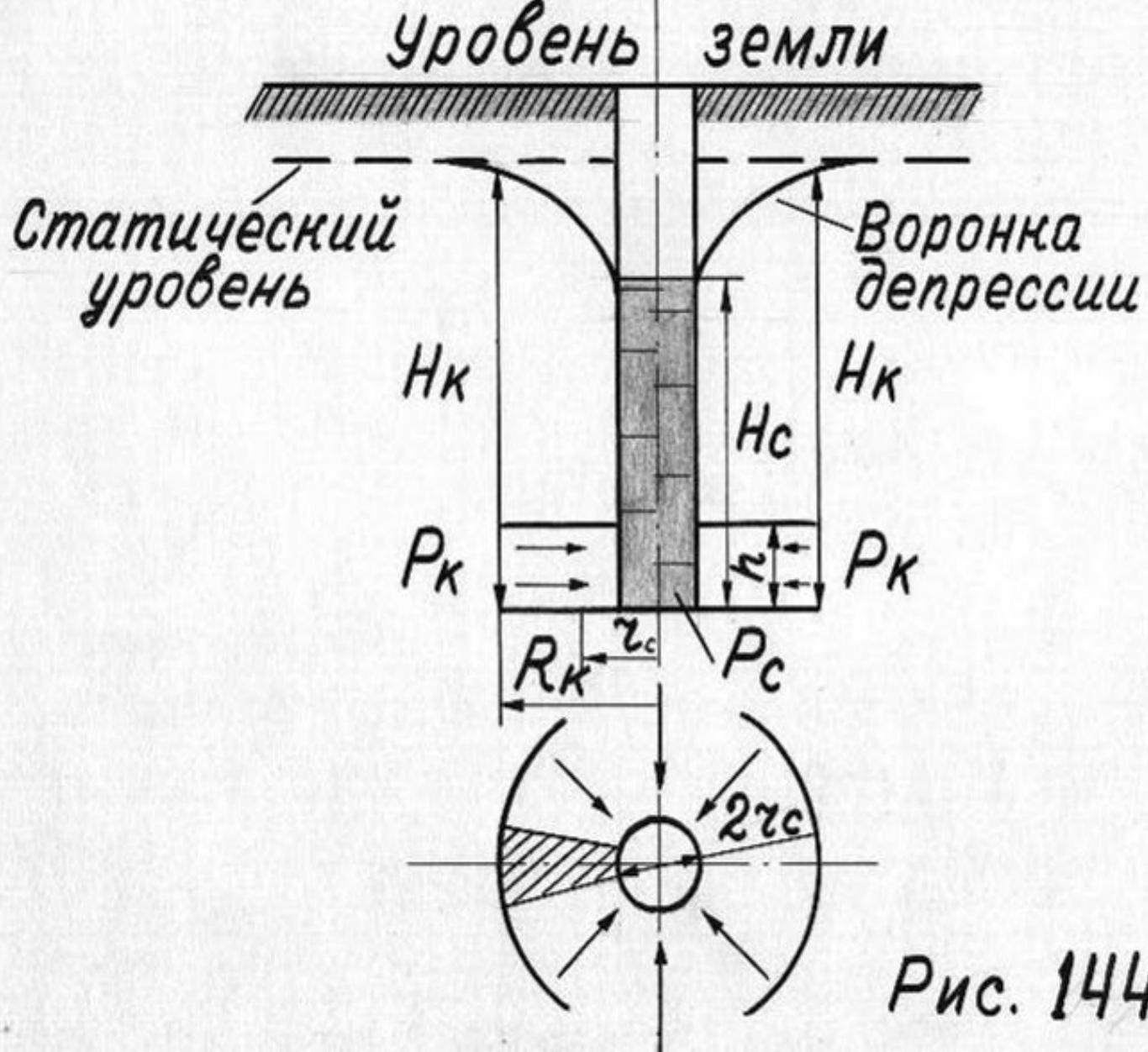


Рис. 8





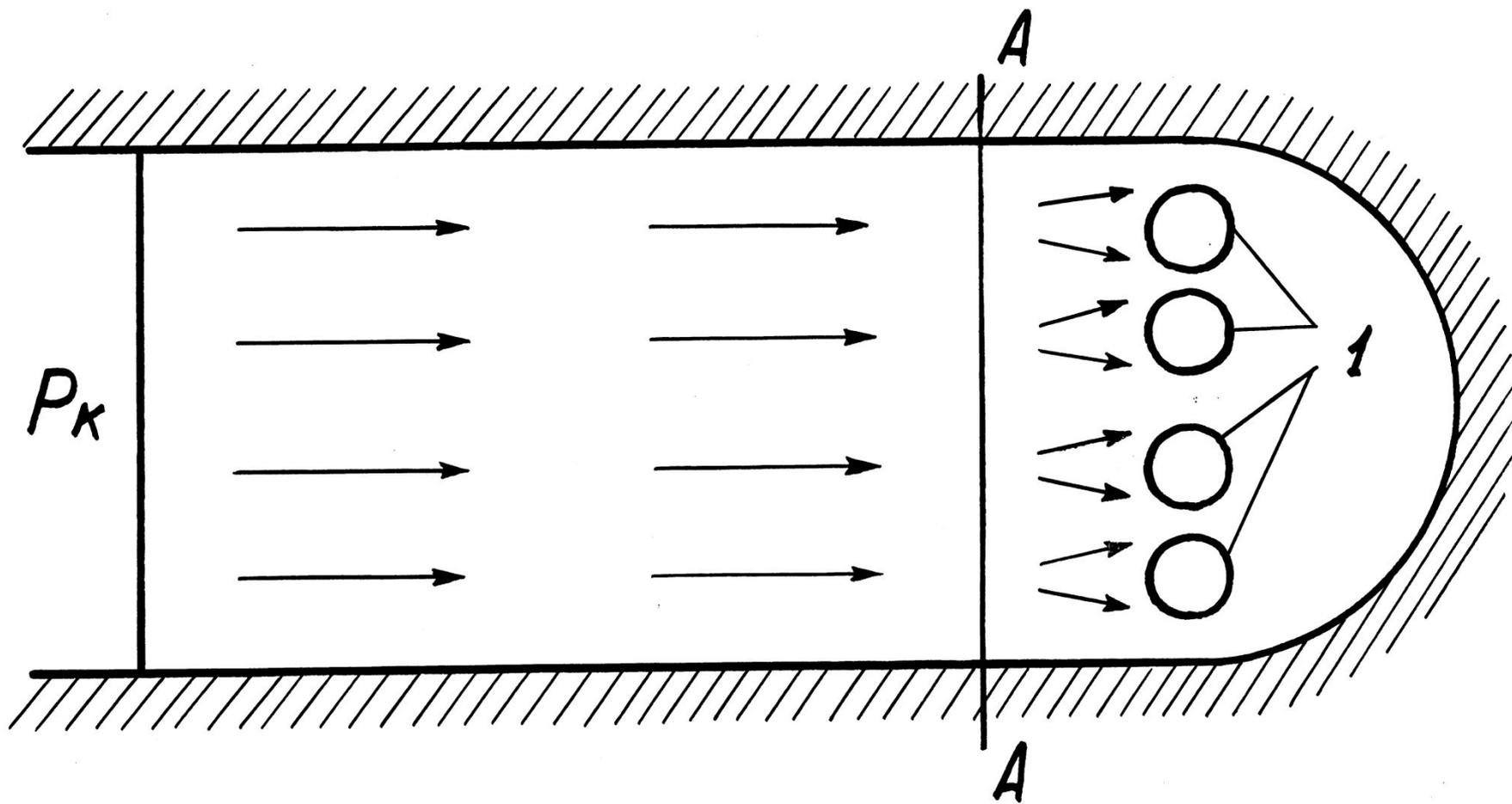
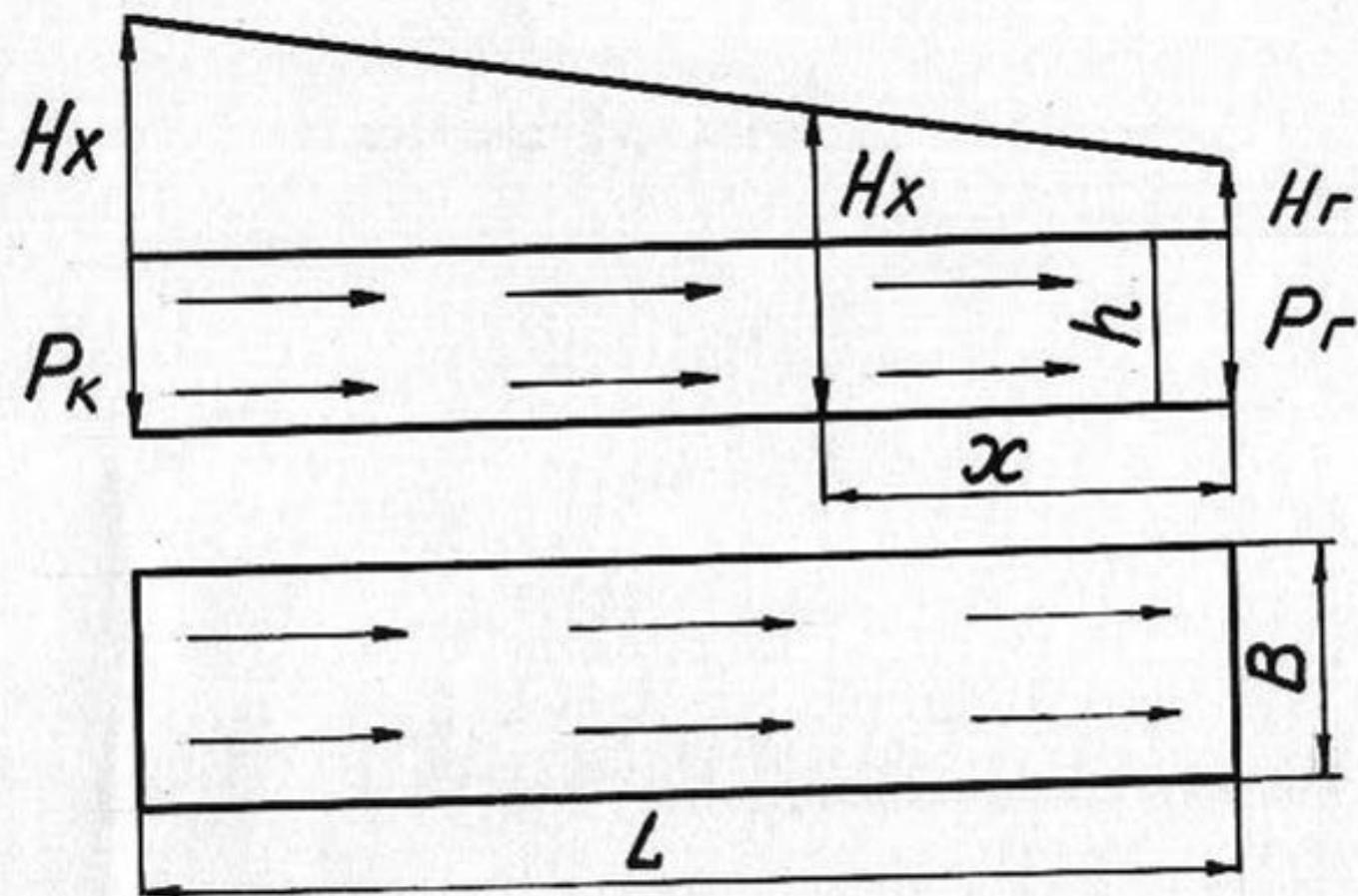


Рис. 143



67

Рис. 142

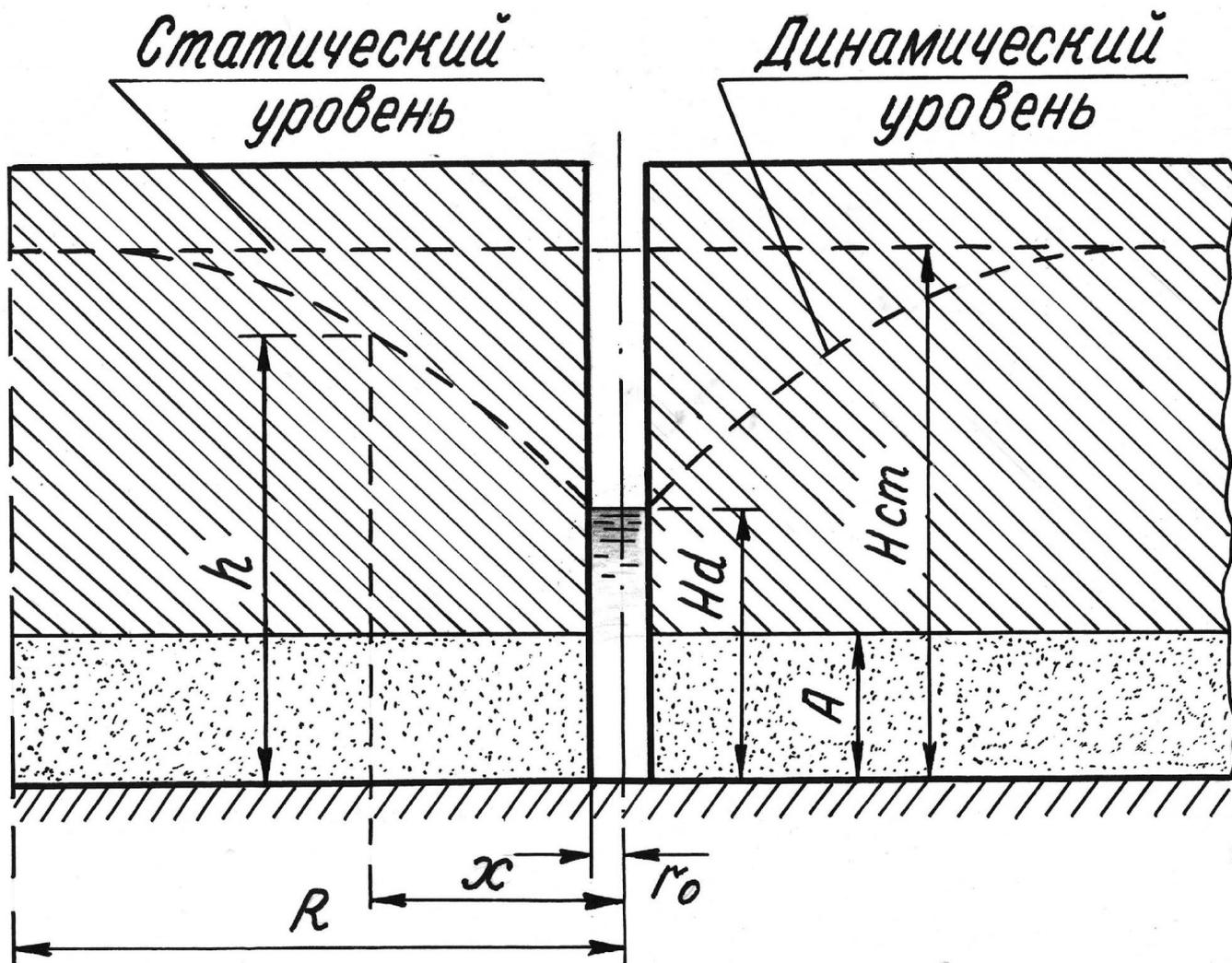


Рис 8

Статический
уровень

Динамический
уровень

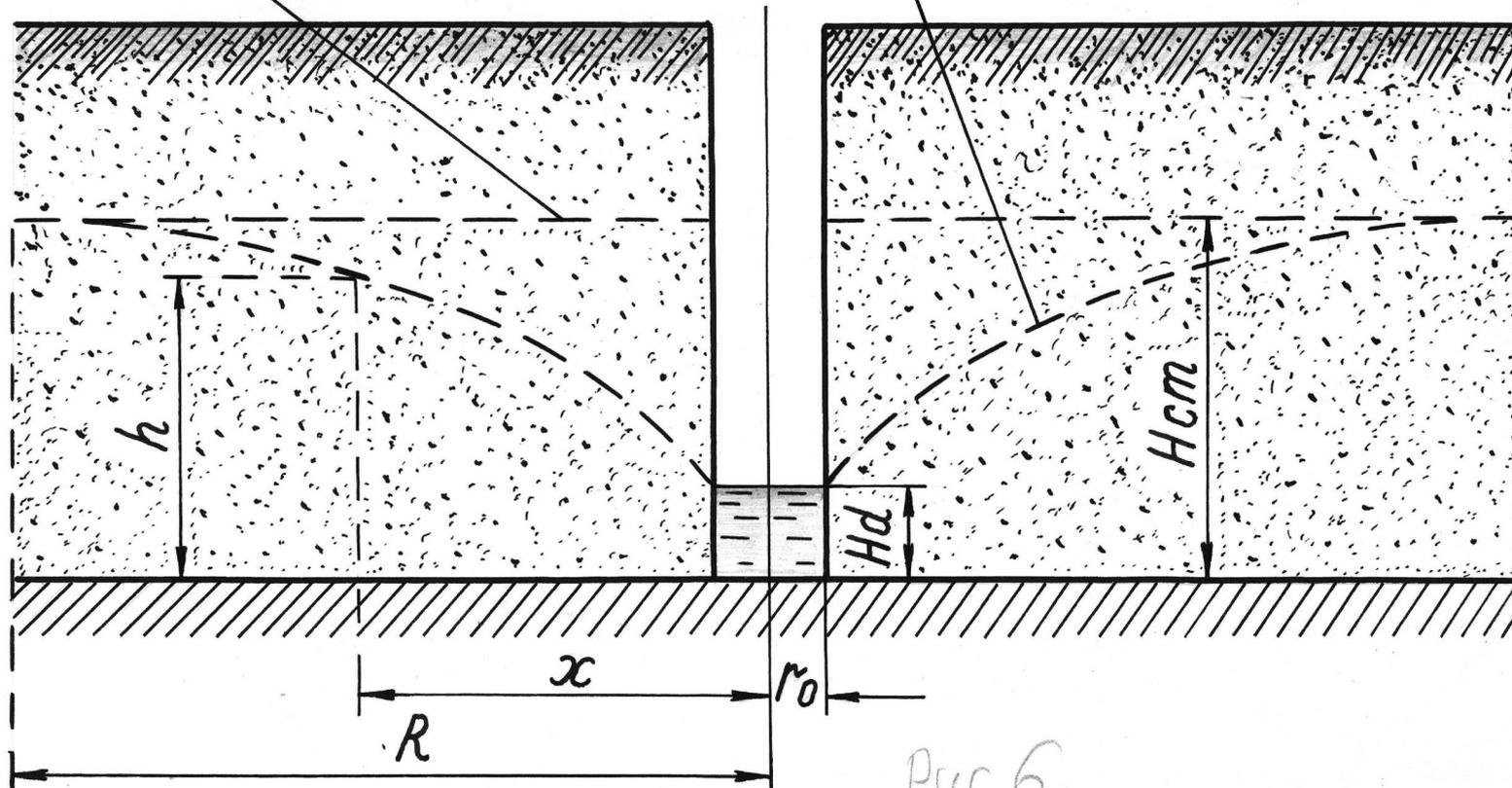


Рис 6