

ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ



Руководитель программы
аспирантуры
профессор С.М. Судариков

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ГИДРОГЕОЛОГИЯ

Подготовка научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

Область науки:	1. Естественные науки
Группа научных специальностей:	1.6. Науки о Земле и окружающей среде
Научная специальность:	1.6.6. Гидрогеология
Направленность (профиль):	Гидрогеология
Отрасли науки:	Геолого-минералогические, технические
Форма освоения программы аспирантуры:	Очная
Срок освоения программы аспирантуры:	3 года
Составители:	д.г-м.н., профессор С.М. Судариков

Санкт-Петербург

Содержание практических занятий по курсу «ГИДРОГЕОЛОГИЯ» в соответствии с программой

Основные определения

Водопроницаемые породы – горные породы, способные пропускать через себя воду и не удерживать ее в своих порах (трещинах). Примером водопроницаемых пород могут служить галечники, пески, слабосцементированные песчаники, трещиноватые кристаллические породы.

Водоупорные породы – породы, не способные пропускать через себя воду или весьма слабо ее отдающие (т.е. практически исключают фильтрацию воды). К водоупорным породам относятся глины, суглинки, иногда супеси, монолитные кристаллические породы.

Водоносные горизонты – горизонты (слои), поры и трещины которых заполнены водой, сложенные водопроницаемыми породами и характеризующиеся общностью условий формирования, движения и разгрузки подземных вод.

Грунтовые воды – подземные воды первого от поверхности земли постоянно действующего водоносного горизонта. Водовмещающие породы разделяются этим горизонтом на две части: нижнюю часть, в которой поры заполнены водой, т.е. собственно водоносный горизонт, и верхнюю, где в порах присутствует воздух, т.е. зону аэрации. Поверхность, отделяющую эти зоны друг от друга, называют зеркалом грунтовых вод (свободной поверхностью) (рисунок 1).

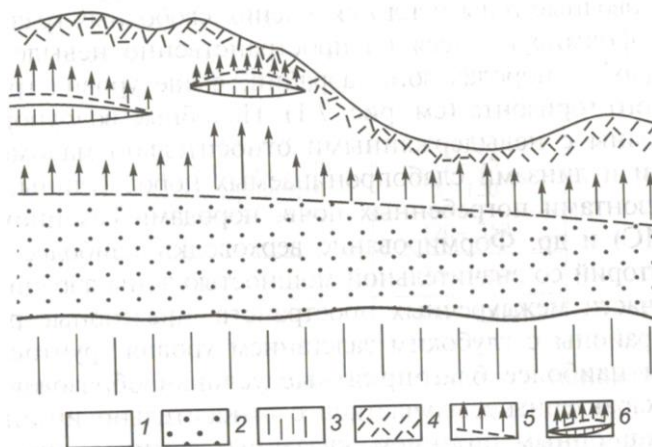


Рисунок 1 – Грунтовые воды: 1 – породы зоны аэрации; 2 - грунтового водоносного горизонта; 3 – слабопроницаемые породы; 4 - почвенный слой; 5 – уровень грунтовых вод и капиллярная кайма; 6 – верховодка [2]

Грунтовые воды имеют прямую связь с атмосферой. Область их распространения и питания (область, где происходит пополнение водоносного горизонта водой) обычно совпадают, причем основным источником питания грунтовых вод являются атмосферные осадки, реже поверхностные конденсационные воды.

Близкое залегание грунтовых вод к поверхности и тесная взаимосвязь с атмосферными осадками обуславливает значительное изменение их характеристик во времени: количества воды в горизонте, положения уровня, химического состава и т.д. Они имеют повсеместное распространение и приурочены в основном к отложениям четвертичного возраста. Грунтовые воды наиболее доступны для водоснабжения, но легко подвержены загрязнению. Особенности распространения грунтовых вод в пределах изучаемого участка характеризуют с помощью карт гидроизогипс.

Артезианские воды – напорные подземные воды, приуроченные к регионально выдержанному пласту-коллектору (водоносному горизонту), залегающему между водоупорными пластами. Артезианские воды залегают в пределах относительно крупных геологических структур (синклиналей, моноклиналей и др.), сложенных преимущественно породами дочетвертичного возраста. Эти структуры, включающие в себя один или несколько напорных водоносных горизонтов и комплексов и обладающие значительными размерами по площади, называются артезианскими бассейнами. В каждом артезианском бассейне выделяют области питания, напора и разгрузки (рисунок 2). Особенности залегания артезианских вод отражают на карте пьезоизогипс.

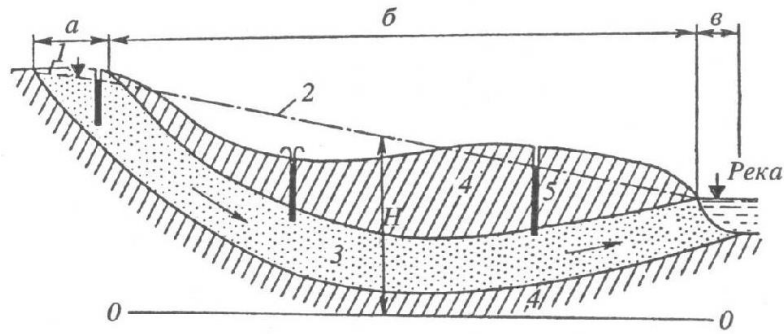


Рисунок 2 – Артезианский бассейн (в условиях синклинали залегания слоев пород). Области: а – питания напорных вод; б – напора; в – разгрузки; 1 – уровень грунтовых вод; 2 – пьезометрический уровень напорных вод; 3 – водоносный напорный пласт; 4 - водоупоры; 5 – скважины; Н – величина пьезометрического напора [1]

Область питания – площадь выхода пласта-коллектора на поверхность на наиболее высоких гипсометрических отметках. Однако, при определенных гидрогеологических условиях питание артезианских вод может осуществляться за счет перетока воды из смежных водоносных горизонтов.

Область напора – площадь распространения артезианского бассейна, в пределах которой уровень подземных вод залегает выше кровли водоносных горизонтов (вода в пласте находится под избыточным давлением). Этот уровень называют пьезометрическим, а высоту подъема воды в скважинах, вскрывающих артезианский водоносный горизонт, - избыточным напором. На участках, где пьезометрический уровень залегает выше поверхности земли, имеет место самоизлив (фонтанирование) скважин. Поверхность, соединяющая пьезометрические уровни, носит название пьезометрической.

Область разгрузки – область выхода напорных вод на поверхность. Разгрузка артезианских вод может осуществляться в виде восходящих источников или непосредственно в поверхностные водотоки, моря, озера.

Артезианские воды широко используются для водоснабжения городов, промышленных предприятий, а также для извлечения брома, йода, в лечебных целях.

Анализ карт гидро- и пьезоизогипс

Карты гидроизогипс строят для отображения рельефа поверхности грунтовых вод. По построению карты гидроизогипс аналогичны топографическим картам, а сами гидроизогипсы – горизонталям рельефа и представляют собой линии на карте, соединяющие точки с одинаковыми абсолютными отметками уровня грунтовых вод.

Карты пьезоизогипс строят для артезианских вод. Пьезоизогипсами называют линии (в плане) равных абсолютных отметок пьезометрической поверхности.

Карты гидро- и пьезоизогипс предназначены для решения различных инженерных задач, связанных с водоснабжением, охраной подземных вод, осушением месторождений полезных ископаемых, мелиорацией и др. анализ карт гидро- и пьезоизогипс позволяет получить следующие сведения:

1. Направление движения подземных вод в любой точке карты. Движение подземных вод подчиняется законам гравитации и происходит от участков с более высокими абсолютными отметками к участкам с меньшими отметками по линии, перпендикулярной основному направлению гидроизогипс (пьезоизогипс) (рисунок 3).

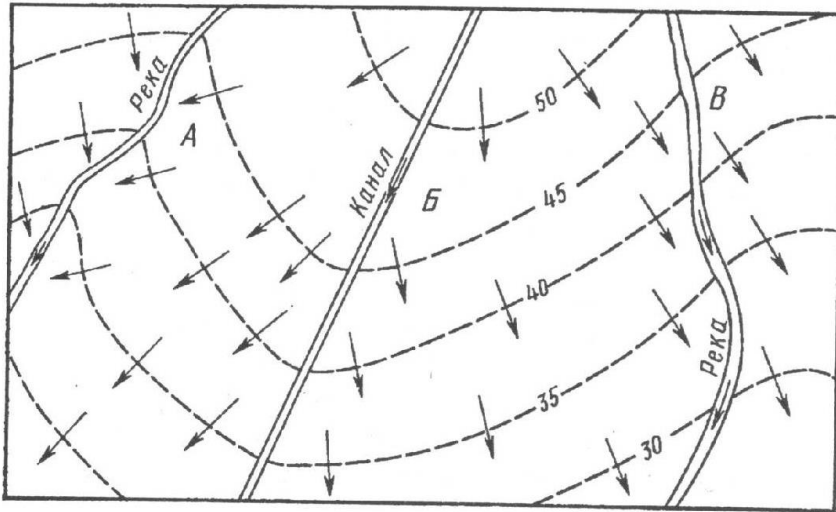


Рисунок 3 – Карта гидроизогипс: участок А – грунтовые воды питают реку; Б- канал питает грунтовые воды реки; В – грунтовые воды питают реку и выходят из нее [10]

2. Характер взаимосвязи подземных вод с поверхностными. Подземные воды, особенно грунтовые, могут иметь тесную гидравлическую связь с поверхностными водотоками. В одном случае подземные воды разгружаются в реку, в другом – питаются за счет поверхностных. Для выяснения характера взаимосвязи по картам гидро- и пьезоизогипс определяют направление грунтового потока. Если грунтовый поток направлен к реке, это означает, что подземные воды разгружаются (питают) в реку; в противном случае (оросительные каналы, паводок в реке и др.) поверхностные воды расходятся на питание подземных вод и их уровень поднят по отношению к последним. В природе также бывают ситуации, когда на одном берегу имеет место разгрузка грунтовых вод, на другом – их поглощение.

3. Глубину залегания подземных вод в любой точке участка. Параметр определяют по разности между абсолютными отметками поверхности земли и подземных вод.

4. Гидравлический уклон (градиент) подземного потока. Градиент равен разности абсолютных отметок уровневой поверхности в двух выбранных вдоль направления потоков точках, деленной на расстояние между этими точками (в масштабе карты).

5. Расход грунтового потока.

Карты гидро- и пьезоизогипс строят на детальной топографической основе (рисунок 4). В скважинах, колодцах, шурфах, часто пройденных специально для этих целей, проводят единовременный замер уровней подземных вод, фиксируя также выход подземных вод на поверхность (источники) с их высотной привязкой. Зная высотную привязку горных выработок и глубину залегания подземных вод, определяют по их разности абсолютных отметок установившихся уровней воды.

Задание

1. Построить карту гидроизогипс и пьезоизогипс с сечением изогипс через 1 м.
2. Показать направление движения подземных вод.
3. Определить для характерных участков гидравлический градиент подземных вод.
4. Установить глубину залегания подземных вод в заданных точках.

Ход работы

1. Вычислить и подписать у каждой горной выработки на топографической основе абсолютные отметки уровней подземных вод (таблица 1, 2).

2. Провести арифметическим или геометрическим методом интерполяцию абсолютных отметок уровня воды в скважинах и шурфах. Задача интерполяции – нахождение на отрезках между двумя горными выработками точек, в которых уровень подземных вод имеет абсолютные отметки, выраженные целыми числами (в метрах). Главные направления интерполяции выбираются по линиям, идущим от водораздельных участков к поверхностным водотокам, а так как последние являются дренами (границами потоков подземных вод), то интерполяция через реки, озера не проводится.

Таблица 1 - Данные для построения карт гидроизогипс

№ скв. или шурфа	Абс. от-метка устья, м	Глубина залегания статического уровня от устья по вариантам, м									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Скважины											
1	88,3	3,3	3,5	3,7	3,0	2,8	3,9	4,2	4,0	4,5	4,3
2	92,1	5,1	5,3	5,5	4,8	4,6	5,7	6,0	5,8	6,3	6,1
3	90,8	4,3	4,5	4,7	4,0	3,8	4,9	5,2	5,0	5,5	5,8
4	83,0	1,2	1,4	1,6	0,9	0,7	1,8	2,1	1,9	2,4	2,2
8	91,5	4,6	4,8	5,0	4,3	4,1	5,2	5,5	5,3	5,8	5,6
9	91,0	4,0	4,2	4,4	3,7	3,5	4,6	4,9	4,7	5,2	5,0
10	84,9	2,4	2,6	2,8	2,1	1,9	3,0	3,3	3,1	3,6	3,4
16	88,2	2,2	2,4	4,6	1,0	1,7	2,8	3,1	2,9	3,4	3,2
17	83,1	1,1	1,3	1,5	0,8	0,6	1,7	2,0	1,8	2,3	2,1
Шурфы											
1	87,3	2,8	3,0	3,2	2,5	2,3	3,4	3,7	3,5	4,0	3,8
2	92,4	5,0	5,2	5,4	4,7	4,5	5,6	5,9	5,7	6,2	6,0
3	87,0	4,0	1,2	4,4	3,7	3,5	4,6	4,9	4,7	5,2	5,0
4	91,6	4,6	4,8	5,0	4,3	4,1	5,2	5,5	5,6	5,8	5,6

Следует помнить, что в точке нисходящего источника абсолютная отметка земной поверхности совпадает с абсолютной отметкой зеркала грунтовых вод (пьезометрической поверхности). Этот факт дает дополнительную информацию при интерполяции.

3. Через точки с одинаковыми отметками (через 1 м) провести плавные линии – гидроизогипсы (пьезометрические), которые не должны пересекаться. Так как условия залегания грунтовых вод во много определяются геоморфологическими особенностями участка, то гидроизогипсы должны плавно повторять изолинии рельефа (горизонталы). Пьезоизогипсы такой специфичностью не обладают.

Гидро- и пьезоизогипсы так же, как и горизонталы рельефа могут пересекать реку, но в строго определенном положении: пьезоизогипса с большей абсолютной отметкой должна проходить выше по течению реки, чем пьезоизогипса с меньшей абсолютной отметкой. В противном случае истинное направление движения воды в реке не будет соответствовать направлению движения, полученному по карте.

Необходимо следить, чтобы в области гидравлического водораздела по обе стороны от него проходили две гидроизогипсы (пьезоизогипсы) с одинаковыми отметками.

Таблица 2 - Данные для построения карты пьезоизогипс

№ скв	Абс. отметка устья, м	Глубина залегания статического (пьезометрического) уровня по вариантам, м									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	88,3	11,3	11,5	11,7	11,0	10,8	11,9	12,2	12,2	12,3	12,3
2	92,1	12,1	12,3	12,5	11,8	11,6	12,7	13,0	12,8	13,3	13,1
3	90,8	11,6	11,8	12,0	11,3	11,1	12,2	12,5	12,3	12,8	12,6
4	83,0	7,5	7,7	7,9	7,2	7,0	8,1	8,4	8,2	8,7	8,5
5	76,1	4,9	5,1	6,3	4,6	4,4	5,5	5,8	5,6	6,1	5,9
6	70,0	1,9	2,0	1,8	2,1	2,3	1,7	1,5	2,5	2,0	1,6
7	68,5	3,5	3,4	3,3	3,7	3,9	4,0	4,1	3,2	3,5	8,1
8	91,5	17,9	18,1	10,6	17,6	17,4	18,5	18,8	18,6	19,1	19,9
9	91,0	15,8	16,0	16,2	15,6	15,3	16,4	16,7	16,5	17,0	16,8
10	84,9	10,6	10,8	11,0	10,3	10,1	11,2	11,5	11,3	11,8	11,6
11	74,6	4,1	4,3	4,5	3,8	3,6	4,7	5,0	4,8	5,3	5,1
12	67,8	1,8	1,9	2,1	1,7	1,5	2,0	2,3	2,5	1,8	2,3
13	65,0	1,0	1,1	2,2	1,4	1,3	1,5	1,0	0,9	1,6	0,8
14	68,0	3,8	3,9	4,2	4,3	3,6	4,5	4,4	3,6	3,7	4,6
15	90,8	16,4	16,5	16,8	16,1	15,9	17,0	17,3	17,1	17,6	17,4
16	88,2	12,2	12,4	12,6	11,9	11,7	12,8	13,1	12,9	13,4	13,2
17	83,1	9,4	9,6	9,8	9,1	8,9	10,0	10,3	10,1	10,6	10,4
18	74,7	3,7	3,3	4,0	3,9	4,3	4,5	4,4	3,6	3,8	5,1
19	68,0	1,0	1,2	1,1	1,3	1,5	0,9	1,2	1,0	1,6	1,7
20	67,3	2,8	3,0	3,2	2,5	2,3	3,4	3,7	3,5	1,0	3,8

4. Показать направление движения подземных вод в произвольных местах стрелками, проводимыми перпендикулярно к гидроизогипсам.

5. Определить для характерных участков, соответствующих максимальному в пределах карты уклону, гидравлический градиент (уклон) потока подземных вод.

6. Установить глубину залегания подземных вод в заданных точках А и Б, предварительно определив абсолютные отметки земной поверхности и зеркала грунтовых вод (пьезометрической поверхности) в этих точках. Данную процедуру следует проводить, интерполируя между двумя соседними горизонталями рельефа и гидроизогипсами (пьезоизогипсами) соответственно.

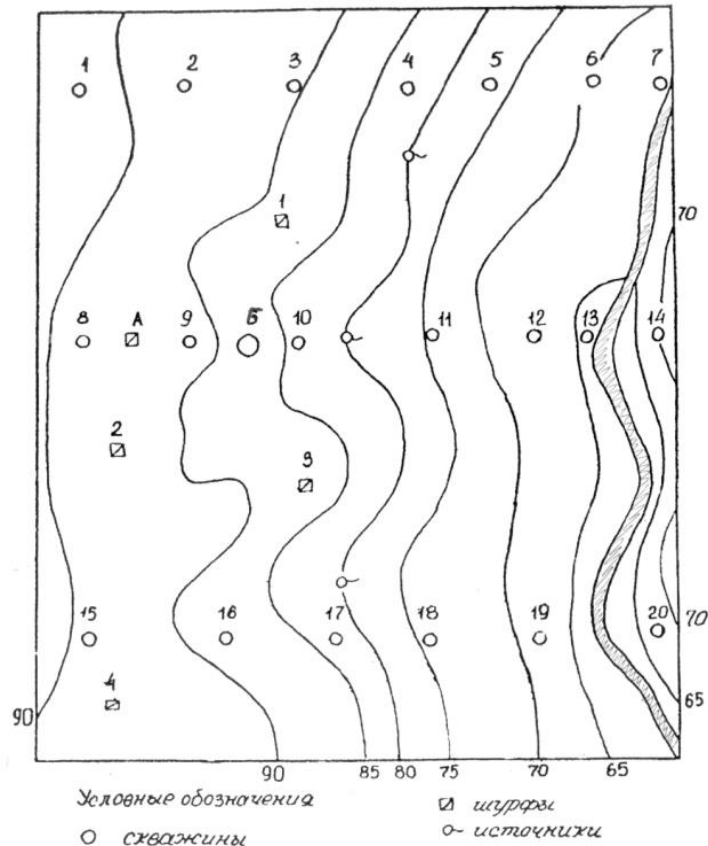


Рисунок 4 – Схема гидроизогипс и пьезоизогипс
 Масштаб 1:10 000. Сечение изогипс через 1 м.

Таблица 3 - Данные для построения гидрогеологического разреза по линии скважин 8-14

Породы	Мощность пород по скважинам, м						
	8	9	10	11	12	13	14
Песок мелкозернистый	11,7	10,5	4,7	-	-	-	-
Суглинок	19,3	21,8	16,5	17,1	8,2	-	7,5
Песок крупнозернистый	4,7	5,0	4,5	4,6	4,8	-	4,7
Разнозернистые пески с гравием и галькой	-	-	-	-	-	12,3	-
Глина (вскрытая мощность)	2,5	3,0	4,5	2,0	3,5	5,0	5,0

Построение гидрогеологического разреза. Написание пояснительной записки к карте

Гидрогеологический разрез отражает геологическое строение и гидрогеологические условия участка вдоль определенного направления (створа), на котором располагаются скважины.

Исходные данные для построения разреза: последовательность литологических разностей пород, их мощность, глубина установившихся уровней подземных вод, - получают при бурении скважин (таблица 3). Кроме того, необходимы сведения о высотной привязке каждой скважины и расстоянии между ними.

Задание

1. Построить гидрогеологический разрез и показать на нем линии уровня напорных и безнапорных вод.
2. Составить пояснительную записку к построенным картам и разрезу.

Ход работы

1. Начинать построение разреза следует с выбора масштабов (вертикального и горизонтального). Горизонтальный масштаб назначают в соответствии с масштабом карты, к которой будет приложен разрез, вертикальный должен обеспечивать четкое изображение условий залегания и

взаимосвязи водоносных горизонтов, рек. Для данных условий рекомендуется вертикальный масштаб 1:1000.

2. С учетом выбранного масштаба по абсолютным отметкам устьев скважин и топографической карте строят гипсометрический профиль, на котором показывают рельеф поверхности земли и местоположение скважин в виде вертикальных линий.

3. По данным бурения скважин строят геолого-литологические колонки, на основании которых проводят литологические и геологические границы. Используя данные замеров уровней воды в скважинах и построенные карты гидро- и пьезоизогипс, находят положение зеркала грунтовых вод и пьезометрической поверхности, выходы источников, показывают направление движения подземных вод. На основании гидрогеологических данных выделяют водоносные горизонты и разделяющие их водоупоры.

4. В пояснительной записке систематизируют данные о геолого-гидрогеологических условиях изучаемого участка. Она составляется на основе анализа построенных карт гидро- и пьезоизогипс гидрогеологического разреза.

Пояснительная записка включает, как правило, следующие разделы:

Геоморфология. Основные геоморфологические элементы участка (склон, обращенный к рек, долина реки, поверхностные водоразделы и т.д.) Максимальные и минимальные мощности гипсометрические отметки поверхности земли. Наличие балок, логов, выходы источников.

Геологическое строение. Общая характеристика литологии пород, принимающих участие в геологическом строении участка (песчано-глинистые, карбонатные, хемогенные и т.д.), с указанием их генезиса и возраста (например, аллювиальные отложения четвертичного возраста) на основе гидрогеологического разреза.

Последовательность литологических слоев, вскрываемых скважинами, и их описание ведется снизу-вверх (от более древних к более молодым): литология и распространение слоя в пределах участка (локальное или региональное); глубина залегания слоя; изменение его мощности по площади; места выхода слоя на поверхность; участки его выклинивания, размыва или литологического замещения; характер залегания и взаимосвязь с подстилающими и перекрывающими горизонтами.

Наличие и характер разрывных нарушений.

Гидрогеологические условия. Наличие водоносных горизонтов, вскрываемых буровыми скважинами и шурфами в пределах участка: водоносного горизонтов грунтовых вод и водоносного горизонта артезианских вод. Раздельное описание каждого водоносного горизонта, начиная с горизонта грунтовых вод, по следующей схеме:

- распространение горизонта в пределах участка (повсеместное или локальное);
- водовмещающие породы горизонта, подстилающие и перекрывающие водоупоры;
- изменение мощности горизонта по площади участка, глубины залегания уровней грунтовых и артезианских вод; глубина залегания грунтовых (в шурфе А и скважине Б) и артезианские (в скважине Б) вод по картам гидро- и пьезоизогипс;
- особенности фильтрации подземных вод и взаимосвязь их с поверхностными водами; гидравлический градиент в пределах характерных участков;
- особенности питания и разгрузки подземных вод (возможность перетекания грунтовых вод через суглинки в водоносный горизонт артезианских вод должна быть доказана и причинно обоснована);
- участки возможного самоизлива скважин – зоны, где поверхность земли располагается ниже пьезометрической поверхности горизонтов артезианских вод;
- возможность использования грунтовых и артезианских вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Основной закон фильтрации подземных вод и его приложения.

Решение задач на закон Дарси

Фильтрация – движение подземных вод под действием гидравлического уклона потока через систему полностью водонасыщенных и сообщающихся между собой пор и трещин горных пород.

Инфильтрация протекает в условиях неполного заполнения пор водой в породах зоны аэрации.

Фильтрация подземных вод описывается законом, который в 1856 г. был установлен французским гидравликом А. Дарси, на основании многолетних опытов по изучению движения воды через песчаные фильтры (рисунок 5).

$$Q = kF \frac{H_1 - H_2}{L} = kFI,$$

где: Q – количество воды, м³/сут
 k – коэффициент фильтрации, м/сут
 F – площадь сечения, м²
 H_1, H_2 – уровень воды, м
 ΔH – разность уровней воды, м
 L – длина пути фильтрации, м
 I – гидравлический градиент;

$$I = \frac{H_1 - H_2}{L} = \frac{\Delta H}{L}$$

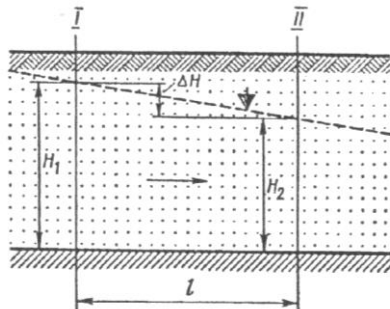


Рисунок 5- Схема движения (фильтрации) грунтовой воды [10]

Скорость фильтрации (v , м/сут) выражает так называемую фиктивную скорость фильтрации воды, так как площадь поперечного сечения принята равной площади поперечного сечения породы, тогда как на самом деле фильтрация воды происходит только по порам, т.е.

$$v = kI$$

Действительная скорость движения воды в порах породы (v_d) определяется как расход, деленный на площадь, занятую порами:

$$v_d = \frac{Q}{F \cdot n_a} = \frac{v}{n_a},$$

где n_a – активная пористость породы, включающая в себя активные в фильтрационном отношении поры.

Расчеты притока воды к скважинам

При откачке воды из скважины, оборудованной в однородном водоносном горизонте подземных вод, вокруг нее образуется депрессионная воронка с максимальным понижением уровня воды в скважине. По мере удаления от скважины по радиусу величина понижения уровня уменьшается и на некотором расстоянии, называемом радиусом влияния откачки R , становится равной нулю.

Координатные оси: ось x по подошве горизонтального водоупора, ось y – по стволу скважины. Формулы, описывающие водопритоки к совершенным скважинам, называются решениями Дюпюи.

$$Q = \frac{\pi k S (2h - S)}{\ln R - \ln r_c} \text{ - приток воды в скважину, вскрывающий водоносный горизонт грунто-}$$

вых вод

$$Q = 2\pi k m S / (\ln R - \ln r_c) \text{ - приток воды в скважину, вскрывающий водоносный горизонт артезианских вод}$$

k – коэффициент фильтрации, м/сут

$S = H - h$, м – понижение

H – статический уровень грунтовых вод, м
 h – динамический уровень грунтовых вод, м
 R – радиус влияния откачки, м
 r_c – радиус скважины, м
 m – мощность водоносного горизонта артезианских вод, м

Удельный дебит скважины: $q = Q/S$.

Для определения максимально возможного водоотбора из скважины, необходимо задаваться величиной допустимого понижения $S_{\text{доп}}$. При откачке из безнапорного водоносного горизонта $S_{\text{доп}} = (0,5 \div 0,75)h_{\text{ср}}$; для напорного водоносного горизонта $S_{\text{доп}} = \Delta H + 0,5m$, где ΔH – разница абсолютных отметок пьезометрической поверхности и кровли артезианского горизонта; m – мощность артезианского водоносного горизонта, м.

При неустановившемся режиме фильтрации, когда депрессионная воронка расширяется с течением времени, радиус влияния откачки для грунтовых и артезианских вод соответственно равны:

$$R = \sqrt{\pi a t}; R = \sqrt{\pi a^* t},$$

где a и a^* – коэффициенты уровнепроводности и пьезопроводности, м²/сут; t – время от начала откачки, сут. Физический смысл этих коэффициентов состоит в том, что они характеризуют скорость развития воронки депрессии при откачке воды из скважины (a и a^* определяются по результатам полевых опытно-фильтрационных работ).

Если откачка воды из скважин проводится вблизи реки, то не исключена ситуация, когда воронка депрессии достигает реки и формируется стационарный режим фильтрации воды к скважине. В этом случае вся вода, откачиваемая из скважины, поступит из реки, пройдя через водоносный горизонт транзитом. Так как оттока воды из самого пласта не происходит, то и депрессионная воронка не расширяется. Время наступления стационарного режима фильтрации при откачке из безнапорного горизонта

$$t_{cm} = \frac{L^2}{\pi \cdot a},$$

где L – расстояние от водозабора скважины до реки.

Определение расхода подземного потока по гидродинамической сетке движения (лентам тока)

Линия тока – траектория движения частиц, перпендикулярная гидроизогипсам.

Лента тока – пространство, ограниченное двумя линиями тока.

Расход подземных вод, протекающих по ленте тока в пределах некоторого i -го отсека по закону Дарси:

$$Q_i = k b_i h_i \frac{\Delta H_i}{l_i},$$

где b_i – ширина отсека; l_i – длина отсека; h_i – средняя мощность фильтрационного потока в пределах i -го отсека; $\Delta H_i = H_{i+1} - H_i$ – перепад напоров.

Суммарный расход фильтрационного потока в пределах всей ленты определяется как среднее арифметическое расходов всех отсеков ленты:

$$Q_{cp} = \sum_{i=1}^n Q_i / n, \text{ где } n \text{ – число отсеков ленты тока.}$$

По выделенной ленте тока можно, привлекая схему поршневого вытеснения, т.е. считая, что растворенные вещества движутся только вместе с частицами воды (не сорбируются и не подвержены диффузии) и со средней скоростью вод, оценить интенсивность распространения загрязнения в водоносном горизонте.

Время прихода загрязнения в точку наблюдения, расположенную на расстоянии l от источника загрязнения:

$$t = l / v_{\partial}.$$

Действительная скорость движения воды связана со скоростью фильтрации:

$$v_{\partial} = \frac{v}{n_a} = \frac{kI}{n_a} = \frac{k\Delta H}{n_a l}$$

Тогда применительно к ленте тока время прохождения поршневого вытеснения каждого отсека ленты: $\Delta t_i = n_a l_i^2 / k\Delta H_i$

l_i – длина отсека ленты тока; k – коэффициент фильтрации; n_a – активная пористость; ΔH – перепад напоров в пределах отсека ленты.

Суммарное время продвижения фронта поршневого вытеснения от источника загрязнения к области разгрузки фильтрационного потока:

$$t_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$$

n – число отсеков ленты тока.

Задача 1. Рассчитать максимально возможный водоотбор из скважины Б, вскрывающий водоносный горизонт грунтовых вод на полную мощность. Диаметр скважины 0,2 м. Фильтрационные параметры горизонта, полученные по данным опытно-фильтрационных работ, следующие: коэффициент фильтрации $k=5$ м/сут, коэффициент уводнепроводности $a=120$ м²/сут. Предполагается, что скважина будет работать для орошения полей в течение трех месяцев.

Задача 2. Буровой скважиной 11 вскрыт напорный артезианский горизонт. Фильтрационные параметры горизонта: коэффициент фильтрации $k=10$ м/сут, коэффициент пьезопроводности $a^*=10^3$ м²/сутки. Радиус скважины 0,1 м.

Определить максимально возможный водоотбор из скважины при работе ее в течение одного месяца, а также время, начиная с которого влияние откачки и скважины 11 достигнет реки, т.е. время наступления стационарного режима фильтрации. Определить время прихода загрязненных вод реки к водозаборной скважине, если активная пористость песков $n_a=0,3$.

Задача 3. На участке на расстоянии 15 м от скважины 9 вниз по потоку пройдена скважина 9_а. Обе скважины вскрывают горизонт грунтовых вод на полную мощность и оборудованы фильтрами. В скважине 9 1 июня осуществлен пакетный запуск индикатора (раствора NaCl). Фоновое содержание хлорид-ионов в воде горизонта 20 мг/дм³. После запуска индикатора в скважине 9_а начат цикл двухмесячных режимных наблюдений за изменением концентрации хлорид-иона. Пробы из скважины отбирались один раз в пять дней. Результаты режимных наблюдений следующие:

Дата наблюдений											
Месяц	Июнь			Июль					Август		
День	1	15	25	1	5	10	15	20	25	1	5
Концентрация хлорид-иона, мг/дм ³											
	20	20	20	29	44	64	57	40	30	27	20

Коэффициент фильтрации мелкозернистых песков, слагающих водоносный горизонт, 5 м/сутки.

Определить действительную скорость движения грунтовых вод и активную пористость песков.

Указание: градиент рассчитать между скважинами 9-10 по карте гидроизогипс.

Задача 4. На водораздельном участке скважины 9 введено в эксплуатацию хранилище жидких отходов химического производства. В плане хранилище вытянуто с севера на юг, размеры его 200*50 м. Данные гидрогеологических исследований свидетельствуют о том, что хранилище, несмотря на экранирование его основания, «течет», т.е. загрязнение поступает непосредственно в грунтовые воды.

Используя известные фильтрационные и миграционные параметры горизонта грунтовых вод, определить по выделенной ленте тока расход загрязненных вод, фильтрующихся от хранилища промстоков к источнику, и время прихода загрязненных вод к источнику (по схеме поршневого вытеснения) от момента начала эксплуатации хранилища.

Задача 5. Построить схему и определить единичный расход грунтового потока по результатам замеров, выполненных в двух скважинах, расположенных на расстоянии 200м по направле-

нию течения, если коэф. фильтрации однородных водовмещающих пород равен 5,2 м/сут. Определить действительную скорость потока.

Результаты замеров	№ скв		№ скв		№ скв	
	1	2	1	2	1	2
	Варианты					
	1		2		3	
Абсолютные отметки, м: устья скважины	32,1	30,3	22,4	20,7	56,1	55,3
УГВ	28,0	24,2				
кровли водоупора	17,8	18,3	8,6	8,8	48,6	44,3
Мощность h водоносного пласта, м					5,2	6,7
Глубина d залегания УГВ, м			3,2	6,6		
Пористость, %	40	40	42	42	38	38

Указание: Единичный расход потока рассчитать по преобразованной формуле Дарси при наклонном водоупоре.

Задача 6. Двумя буровыми скважинами, пройденными на расстоянии 280 м друг от друга по направлению потока, под водоупорными глинами (слой 1) вскрыт водоносный горизонт постоянной мощности, состоящий из галечников (слой 2), песков (слой 3), супесей (слой 4), подстилаемый плотными аргиллитами (слой 5). Используя ниже приведенные данные, построить схематический разрез и определить единичный расход потока.

Данные для расчета	№ скв		№ скв		№ скв	
	1	2	1	2	1	2
	Варианты					
	1		2		3	
Абсолютные отметки, м: устья скважины	91,6	95,2	63,1	59,7	72,3	70,5
пьезометрического уровня	87,1	90,4			62,7	
подошвы 1 слоя	74,7		37,4	34,8	47,4	
2 слоя					43	41,5
3 слоя					33,7	32,2
4 слоя	50,7	54,3	9,1			24,6
Мощности слоев, м второго, m ₂	7,9	7,9	7,2	7,2		
третьего, m ₃	6	6	8,6	8,6		
четвертого, m ₄			12,5	12,5	7,6	
Напор, считая от подошвы верхнего водоупора, м			21,8	20,6		21,3
Коэф. фильтрации, м/сут						
второго, k ₂	70,6	70,6	82,4	82,4	89,3	89,3
третьего, k ₃	16,0	16,0	21,1	21,1	18,9	18,9
четвертого, k ₄	1,2	1,2	2,4	2,4	0,8	0,8

Указание: коэф. фильтрации водоносного горизонта рассчитать как средневзвешенное значение:

$$K_{cp} = (m_2 k_2 + m_3 k_3 + m_4 k_4) / m;$$

$$m = m_2 + m_3 + m_4.$$

Задача 7. Двумя скважинами, расположенными на расстоянии 170 м по направлению потока напорных вод, под водоупорными глинами вскрыт слой водоносных песков постоянной мощности 8,3 м. Используя данные, построить гидрогеологический разрез (расчетную схему) и определить единичный расход потока.

Результаты замеров	№ скв		№ скв		№ скв	
	1	2	1	2	1	2
	Варианты					
	1		2		3	
Абсолютные отметки, м: устья скважины	66,2	64,9	27,1	27,8	53,6	56,2
подошвы верхнего водоупора	53,8	51,5				
кровли нижнего водоупора			7,0	10,6	33,7	31,0
пьезометрического уровня	64,7	62,3	26,4	28,5		
Напор H над подошвой верхнего водоупора, м					12,2	9,4
Коэф. фильтрации, k, м/сут	21,4	21,4	15,6	15,6	23,1	23,1

Указание: Единичный расход потока рассчитать по преобразованной формуле Дарси для случая потока постоянной мощности.

Задача 8. Двумя буровыми скважинами, расположенными на расстоянии 150 м друг от друга по направлению потока, пройден до водоупора водоносный пласт, состоящий из двух слоев.

Уровень грунтовых вод располагается в верхнем слое мелких песков; расположенный ниже слой галечников водонасыщен на полную мощность. Используя приведенные ниже данные, построить схематический разрез грунтового потока и определить его единичный расход.

Данные для расчета	№ скв		№ скв		№ скв	
	1	2	1	2	1	2
	Варианты					
	1		2		3	
Абсолютные отметки, м: устья скважины	40,4	38,7	28,3	29,2	80,7	81,4
УГВ					76,3	75,1
кровли галечников	30,7	30,2			67,5	66,7
кровли водоупора	25,6	25,3	8,2	9,5		
Глубина залегания УГВ, м			3,4	3,2		
Мощности m слоя галечника, м			9,3	8,8		
Общая мощность h водоносного пласта, м	12,3	11,2			14,6	13,4
Козф. фильтрации k_1 песков, м/сут	1,8	1,8	2,4	2,4	1,6	1,6
Козф. фильтрации k_2 галечников, м/сут	24,9	24,9	31,2	31,2	33,5	33,5

Указание: Общій единичный расход определить как сумму единичных расходов двух потоков.

Задача 9. По данным, приведенным ниже, построить схему и определите приток воды в совершенную скважину, вскрывшую напорные воды.

Данные для расчета	Вариант		
	1	2	3
Абсолютные отметки, м: устья скважины	42,5	73,4	65,1
подшвы верхнего водоупора		46,3	
кровли нижнего водоупора	13,4		
пьезометрического уровня	39,6		67,8
динамического уровня при откачке	36,1	63,8	
Мощность m водоносного слоя, м		15,9	
Напор над подошвой верхнего водоупора, м	14,2	22,8	34,9
Напор над кровлей нижнего водоупора, м			43,7
Понижение уровня S, м			4,0
Козф. фильтрации k, м/сут	9,6	4,5	11,5
Диаметр 2r скважины, мм	305	254	152

Обработка результатов химического анализа воды. Оценка пригодности воды для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Оценка агрессивности подземных вод

Для гидрогеологических исследований данные о химическом составе подземных вод чрезвычайно важны. Химический анализ является основой для изучения генезиса подземных вод, оценки пригодности их для бытовых и промышленных нужд, лечебных целей, агрессивности по отношению к бетонным и металлическим конструкциям. Выбор типа анализа подземных вод (полевые сокращенные и полные общие, специальные) зависит от задач и целей исследований. Они могут проводиться как в полевых, так и в стационарных условиях.

Результаты химических анализов воды выражают в весовой, эквивалентной и процент - эквивалентной формах.

Весовая форма представляет собой отражение ионно-солевого состава воды как содержания в ней определенных количеств отдельных ионов в миллиграммах на 1 л (дм^3) раствора или 1 кг воды.

Эквивалентная форма записи состава вод позволяет выполнить соотношение между ионами с точки зрения их участия в химических реакциях, оценить качество анализа и вычислить содержание некоторых макрокомпонентов без непосредственного их определения. На основе эквивалентной формы часто устанавливают генезис природных вод.

Расчет эквивалентной формы основан на понятии химического эквивалента. Химическим эквивалентом \mathcal{E} называется такое количество вещества, которое вступает в химические реакции взаимодействия с 1 частью ионов H^+ или 8 частями ионов O^{2-} по массе. Вычисляется \mathcal{E} как отношение атомного веса иона, выраженного в граммах, к абсолютной величине его заряда. Химический эквивалент, выраженный в граммах, представляет собой количество вещества, обладающее таким же суммарным зарядом, как и $6,2 \cdot 10^{23}$ (число Авагадро) частиц однозарядного иона.

В гидрогеологических и гидрологических исследованиях в качестве эквивалентной формы используется миллиграмм - эквивалентная, т.е. количество миллиграмм-эквивалентов иона в 1 л (дм³) раствора:

$$[\text{мг-экв/дм}^3] = [\text{мг/дм}^3 \cdot 1/\mathcal{E}] = [\text{мг/дм}^3 \cdot K],$$

где \mathcal{E} – химический эквивалент иона; K – переводной коэффициент, $K=1/\mathcal{E}$ (таблица 4).

Таблица 4 - Эквиваленты и переводные коэффициенты наиболее распространенных ионов природных вод

Ион	\mathcal{E}	K	Ион	\mathcal{E}	K
Na ⁺	23,0	0,0435	Cl ⁻	35,5	0,0282
K ⁺	39,1	0,0256	SO ₄ ²⁻	48,0	0,0208
Mg ²⁺	12,2	0,0822	HCO ₃ ⁻	61,0	0,0184
Ca ²⁺	20,0	0,0499	Br ⁻	79,6	0,0125
NH ₄ ⁺	18,0	0,0556	I ⁻	126,9	0,0079
H ⁺	1,0	1,0	CO ₃ ²⁻	30,0	0,0328
Fe ²⁺	18,6	0,0538	NO ₃ ⁻	62,1	0,0161
Fe ³⁺	27,9	0,0358			

На основе эквивалентной формы выражения концентрации ионов можно оценить погрешность химического анализа воды. Основана эта оценка на принципе электронейтральности раствора, исходя из которого сумма концентраций катионов (положительно заряженных ионов), выраженных в миллиграмм - эквивалентах на литр, должна быть равна сумме содержания анионов (отрицательно заряженных ионов), представленных также в эквивалентной форме: $\sum r_k = \sum r_a$.

Однако реальный химический анализ не всегда обеспечивает достаточную точность и поэтому равенство не выполняется. Ошибка анализа

$$E = \frac{\sum r_k - \sum r_a}{\sum r_k + \sum r_a}.$$

Анализ воды считается кондиционным (выполненным качественно), если погрешность $E < 5\%$. Контроль по формуле возможен только в тех случаях, когда проведено раздельное определение каждого основного иона (макрокомпонента).

Часто, особенно в полевых условиях, невозможно провести определение таких макрокомпонентов, как Na⁺ и K⁺. Тогда сумму этих ионов, основываясь на принципе электронейтральности, вычисляют как разность:

$$r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) = \sum r_a - \sum r_k,$$

где $\sum r_a$ - сумма концентраций основных анионов; $\sum r_k$ - сумма концентраций всех основных катионов, определенных в ходе анализа (обычно Ca²⁺, Mg²⁺).

Процент - эквивалентная форма показывает относительную долю участия того или иного иона в формировании ионно-солевого состава воды. Ее получают из эквивалентной. Для вычисления процентного содержания анионов их сумму принимают за 100% и рассчитывают процент содержания каждого аниона по отношению к их сумме. Для катионов проводят аналогичные вычисления.

Процент - эквивалентная форма наглядно представляет ионно-солевой состав воды, соотношения между ионами, а также позволяет устанавливать черты сходства вод, различающихся по минерализации. Кроме того, она является основной для систематизации химических анализов в виде формул и графиков.

Определение общей минерализации воды

Минерализация воды M – это сумма минеральных веществ в граммах или миллиграммах, содержащихся в 1 л (дм³) воды. Для определения M суммируют содержание всех ионов, определенных химическим анализом и выраженных в весовой форме.

По минерализации воды подразделяются на следующие группы [6]:

Воды	Минерализация, М, г/дм ³
Пресные	<1
Солоноватые	1-10
Соленые	10-35
Рассолы	>35

Определение видов жесткости

Жесткость воды определяется присутствием в ней солей Ca^{2+} и Mg^{2+} . Для вод, используемых в хозяйственных и технических целях, жесткость имеет большое значение. Различают общую, карбонатную, устранимую (временную), некарбонатную, неустраняемую (постоянную) жесткости.

Общая жесткость J_0 определяется как сумма миллиграмм-эквивалентов ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в 1 л (дм^3) воды и складывается она из карбонатной (J_k) и некарбонатной ($J_{нк}$):

$$J_0 = J_k + J_{нк}; J_0 = r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+}.$$

Устраняемая (временная) и карбонатная жесткости вызываются наличием в воде одних тех же гидрокарбонатных и карбонатных солей кальция и магния. Разница между ними заключается в том, что устраняемая жесткость есть величина экспериментальная, показывающая, насколько уменьшилась общей жесткостью после длительного кипячения пробы, в карбонатная жесткость является величиной расчетной. Устраняемая жесткость всегда меньше карбонатной.

Для определения карбонатной жесткости необходимо учитывать два возможных соотношения между суммами миллиграмм – эквивалент

1) если $[r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+}] \leq [r\text{HCO}_3^- + r\text{CO}_3^{2-}]$, то карбонатная жесткость равна общей жесткости, поскольку больше общей жесткости она не может быть

$$J_0 = J_k = r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+};$$

2) если $[r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+}] > [r\text{HCO}_3^- + r\text{CO}_3^{2-}]$, то карбонатная жесткость воды меньше общей жесткости и эквивалентна содержанию $r\text{HCO}_3^- + r\text{CO}_3^{2-}$, т.е. $J_k = r\text{HCO}_3^- + r\text{CO}_3^{2-}$.

Неустраняемая (постоянная) жесткость равна разности между общей жесткостью и устранимой. Некарбонатная жесткость равна разности между общей жесткостью и карбонатной.

Подземные воды по общей жесткости подразделяются на пять групп (по О.А. Алекину) [6]:

Вода	J_0 , мг-экв/ дм^3
Очень мягкая	< 1,5
Мягкая	1,5 – 3,0
Умеренно жесткая	3,0 – 6,0
Жесткая	6,0-9,0
Очень жесткая	>9,0

Формула Курлова

Для наглядного изображения химического состава подземных вод используется формула Курлова, которая представляет собой псевдробь, в числителе которой слева направо записывают анионы в процент - эквивалентах в порядке их убывания, а в знаменателе в том же порядке – катионы. Количество анионов и катионов округляется до целых чисел. Слева от дроби записывают минерализацию в граммах на литр, а также содержание в миллиграммах на литре некоторых специфических компонентов и газовый состав. Справа от дроби указывается величина рН воды и ее температура. Формула Курлова для воды Мирового океана, например, имеет вид

$$M_{35} \frac{\text{Cl}9\text{SO}_4 9}{\text{Na}7\text{Mg}17\text{Ca}4} \text{pH}$$

По формуле Курлова дается название воды. В него включают все ионы (сначала анионы, затем катионы), содержание которых превышает 25%. Согласно Е.В. Посохову «... при составлении химического названия воды необходимо соблюдать элементарные правила русского языка, согласно которым основное прилагательное пишется полностью, а прилагательное, указывающее на второстепенное свойство предмета, пишется сокращенно» [9]. Если в химическом составе воды преобладают хлоридные и сульфатные анионы, причем сульфатного больше, то воду следует называть хлоридно-сульфатной. Так, если химический состав воды записан в виде формулы Курлова следующим образом:

$$M_{0.51} \frac{\text{HCO}_3 65\text{SO}_4 20\text{Cl}15}{\text{Ca}60\text{Mg}30\text{Na}10} \text{pH}7.9, \text{T}12^0\text{C},$$

то данная вода будет называться гидрокарбонатной магниево-кальциевой, пресной, с щелочной реакцией.

Оценка пригодности воды для хозяйственно-питьевого водоснабжения

Оценка пригодности вод, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения, производится по органолептическим, токсикологическим и микробиологическим показателям. Согласно требованиям к качеству таких вод регламентируется СанПиНом 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества».

Органолептические показатели, могущие вызвать неприятные (нежелательные) ощущения (запах, привкус, цвет, мутность), нормированы следующим образом: запах при 20 °С и нагревании до 60 °С не должен превышать 2 баллов; цветность по платиново-кобальтовой шкале должна быть не более 20°; мутность по стандартной шкале не более 1,5 мг/дм³.

Концентрации химических веществ, влияющих на органолептические свойства воды, не должны превышать следующих нормативов [11]:

Компоненты воды	Норматив
Железо Fe, мг/дм ³	0,3 (1,0)*
Марганец Mn, мг/дм ³	0,1 (0,5)*
Медь Cu, мг/дм ³	1,0
Сульфаты SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	500
Хлориды Cl ⁻ , мг/дм ³	350
Цинк Zn, мг/дм ³	5,0
Жесткость общая, мг-экв/дм ³	7,0
Водородный показатель pH	6 - 9

*- Величина, указанная в скобках, может быть установлена на постановлению главного санитарного врача по соответствующей территории для конкретной системы водоснабжения на основании санитарно-эпидемиологической обстановки в населенном пункте и применяемой технологии водоподготовки.

Токсикологические показатели качества воды характеризуют безвредность ее химического состава для человеческого организма. Концентрации в воде токсичных химических веществ определяются следующими нормативами [11]:

Показатели	Норматив, мг/дм ³
Алюминий Al	0,5
Бериллий Be	0,0002
Молибден Mo	0,25
Мышьяк As	0,05
Нитраты NO ₃ ⁻	45
Свинец Pb	0,03
Селен Se	0,01
Стронций Sr	7,0
Ртуть Hg	0,0005
Фтор F для климатических районов: I и II III	1,5 1,2

Микробиологические показатели, характеризующие бактериальный биоценоз воды, должен соответствовать следующим нормам [9]:

- 1) общее количество бактерий в 1 мл неразбавленной воды не более 100;
- 2) коли-титр (количество воды, в котором встречается одна бактерия кишечной палочки типа Coli) не менее 300 г;
- 3) коли-индекс (количество бактерий группы кишечной палочки типа Coli в 1 л (дм³) воды) – не более 3.

Если питьевая вода не отвечает требованиям, то соответствующей обработкой (осветление, обесцвечивание, опреснение, фторирование, умягчение и т.д.) ее доводят до необходимых кондиций.

Оценка агрессивности подземных вод

Воды определенного химического состава могут оказывать разрушающее действие на бетонные и металлические конструкции, фильтры скважин, обсадные трубы, насосы и т.д.

Агрессивное действие вод на бетон проявляется в растворении его основного компонента – карбоната кальция, а также в образовании солей CaSO₄*2H₂O; MgSO₄*2H₂O и сульфалоюмината кальция («цементной бациллы»), вызывающего вспучивание и крошение бетона. Это явление характерно для подземных вод с повышенным содержанием иона SO₄²⁻.

В зависимости от присутствия в воде тех или иных компонентов различают несколько видов агрессивности подземных вод к бетону (таблица 5).

Таблица 5 - Виды агрессивности подземных вод по отношению к бетону [10]

Виды агрессивности	Признаки агрессивности
Сульфатная	Повышенное содержание иона SO ₄ ²⁻
Магнезиальная	То же, Mg ²⁺
Общекислотная	Низкие значения pH (pH<5 для бетона марки W ₄)
Углекислотная	Наличие агрессивной углекислоты CO ₂ более 10 мг/дм ³
Выщелачивающая	Низкое содержание иона HCO ₃ ⁻

Степень агрессивного воздействия подземных вод на арматуру железобетонных конструкций оценивается по суммарному содержанию в них сульфатов и хлоридов.

Количественные критерии оценки вида и степени агрессивности подземных вод к бетону и железобетону приводятся в СНиП 2.03.11-85 «Защита строительных конструкций от коррозии» и ГОСТ 9.602-2005 «Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии».

Задание

Обработать химический анализ воды (таблица 6), выраженные в весовой форме.

Методические указания

1. Перевести анализ воды из весовой в эквивалентную и процент – эквивалентную формы (таблица 7);
2. Вычислить погрешность анализа;
3. Определить минерализацию воды и классифицировать воду по минерализации;
4. Вычислить все виды жесткости воды и классифицировать воду по общей жесткости;
5. Написать формулу Курлова и дать название воды;
6. Оценить пригодность воды для питья и степень ее агрессивности к свинцовым и алюминиевым оболочкам.

Таблица 6 - Результаты химического и спектрального анализа природных вод, мг/дм³

Показатель	Вариант						
	1	2	3	4	5	6	7
Содержание макрокомпонентов							
K	2	1	20	11	9	1	1,5
Na	32	7	29	18	78	12	32
Ca	75	59	106	87	89	42	32
Mg	35	16	25	46	24	33	8
HCO ₃	281	163	117	315	276	296	164
SO ₄	134	63	207	75	83	2	53
Cl	23	19,5	73	119	125	31	33,5
Содержание микрокомпонентов							
As	0,03	0,02	0,01	0,07	0,01	0,1	0,02
Fe	0,1	0,2	0,1	0,2	0,5	0,1	0,2
Pb	0,05	0,7	0,05	0,02	0,02	0,02	0,05
Zn	0,2	0,1	1	2	0,05	0,5	7
Hg	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Cu	2	1	0,5	0,5	2	0,2	0,1
F	0,5	0,5	1,5	2,0	0,5	9,0	1,5
NO ₃	5	10	15	5	10	15	5
Mn	0,05	0,07	0,2	0,3	0,05	0,05	0,07
Другие показатели							
pH	7,4	7,7	5,7	7,2	5,7	8,0	5,2
Содержание CO ₂ св	8,2	0,9	3,2	2,6	17,4	1,9	21,4
T, °C	9	8	10	11	12	8	8
Коли-индекс	2,0	2,5	2,6	3,8	1,7	1,9	2,0

Таблица 7 - Пересчет химических анализов воды из весовой формы в эквивалентную и процент – эквивалентную

Катион/анион	Содержание иона		
	мг/дм ³	мг-экв/дм ³	%-экв
K ⁺			
Na ⁺			
Mg ²⁺			
Ca ²⁺			
Сумма катионов			
Cl ⁻			
SO ₄ ²⁻			
HCO ₃ ⁻			
NO ₃ ⁻			
Сумма анионов			
Сумма катионов и анионов			

Пересчет в мг-экв/дм³ проводится до второго знака после запятой, в %-экв – до целых процентов.

Определение фильтрационных параметров по данным кустовых откачек

Кустовые откачки являются наиболее надежным полевым методом определения фильтрационных параметров. Опытный куст состоит из центральной (опытной) и ряда наблюдательных скважин, располагающихся по одному или двум лучам. При проведении опытной кустовой откачки последовательно проводятся замеры расходов воды и понижений уровней во всех скважинах куста, которые являются основой для последующей интерполяции результатов опыта с целью определения фильтрационных параметров продуктивного пласта.

Основными фильтрационными параметрами, определяемые по результатам кустовой откачки, являются коэффициенты фильтрации (k), водопродности (T), уровнепродности (a) и пьезопродности (a^*), гравитационной (μ) и упругой водоотдачи (μ^*) и др.

Наиболее точные результаты расчета фильтрационных параметров при интерпретации кустовой откачки получают графоаналитическими методами; при этом используют способы временного, площадного и комбинированного прослеживания изменения уровней.

Определение фильтрационных параметров по графикам временного прослеживания

При интерпретации кустовой откачки воды из напорного неограниченного в плане, изолированного водоносного горизонта привлекается аналитическая зависимость Тейса:

$$S = \frac{Q_c}{4\pi T} \ln \left(\frac{2,25a^* t}{r_c^2} \right)$$

где S – понижение в i -ой скважине, отстоящей от центральной скважины на расстоянии r_i на момент времени t ; T и a^* – коэффициенты водопродности и пьезопродности водоносного горизонта.

Формулу можно представить в виде

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25a^*}{r^2} + \frac{Q}{4\pi T} \ln t$$

Обозначив $\frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25a^*}{r^2} = A$, а $\frac{Q}{4\pi T} = B$, получим:

$$S = A + B \ln t$$

Уравнение представляет собой уравнение прямой линии на графике $S = f(\ln t)$. На этом графике величина B определяется как угловой коэффициент прямой:

$$B = \frac{S_2 - S_1}{\ln t_2 - \ln t_1},$$

где S_2 и S_1 – два любых значения понижения на оси ординат, которым на графике соответствуют значения абсцисс $\ln t_2$ и $\ln t_1$. Численное значение A определяется из отрезка, отсекаемого прямой на оси ординат при $\ln t = 0$.

При известном значении B определяется величина водопродности

$$T = \frac{Q}{4\pi B},$$

и коэффициента фильтрации:

$$k = \frac{T}{m},$$

где m – мощность водоносного горизонта.

Определив по графику значения B и A , рассчитывается коэффициент пьезопродности

$$\ln a^* = \frac{A}{B} - \ln 2,25 + 2 \ln r$$

и коэффициент упругой водоотдачи

$$\mu^* = \frac{T}{a^*}$$

Задача. Определение фильтрационных параметров по данным кустовых откачек

Из напорного неограниченного в плане, изолированного водоносного горизонта сложенно-го закарстованными известняками мощностью m проведена кустовая откачка с расходом Q (таблица 8). Помимо центральной скважины (ЦС) опытный куст включает две наблюдательные скважины (НС1 и НС2), располагающиеся по одному лучу и отстоящие от ЦС на расстоянии r_1 и r_2 . Данные о понижении уровней в скважинах опытного куста сведены в таблице 9.

Таблица 8 - Варианты заданий

№	Q, м ³ /сут	r1	r2	m
1	2000	30	70	25
2	1100	15	40	18
3	1200	25	60	25
4	1400	30	65	30
5	1800	20	35	20
6	1500	25	40	20
7	2000	22	38	25
8	1500	25	40	20
9	1000	30	50	30
10	2000	20	40	25
11	800	18	28	20
12	1000	20	35	25
13	1200	16	40	17

Таблица 9 – Данные о понижении уровней в скважинах опытного куста

Время от начала откачки t , ч	Понижения уровня воды в скважинах, м		
	ЦС	НС1	НС2
2	5,81	2,40	1,10
4	6,38	2,69	1,35
6	6,49	2,73	1,44
8	6,70	2,90	1,55
12	6,81	3,00	1,62
16	6,95	3,09	1,71
24	7,38	3,45	1,92
36	7,70	-	2,10
48	-	3,71	2,15
72	8,05	4,10	2,50
120	8,35	4,35	2,74
144	8,60	4,50	2,80

Выполнить интерпретацию результатов кустовой откачки и рассчитать фильтрационные параметры напорного водоносного горизонта (коэффициенты фильтрации (k), водопроницаемости (T), пьезопроводности (a^*) и упругой водоотдачи (μ^*)).

Особенности подсчета запасов подземных вод

Способность подземных вод к самовосполнению предопределяет специфические особенности подсчета их эксплуатационных запасов, весьма отличных от подобных расчетов для других полезных ископаемых.

Сущность подсчета эксплуатационных запасов подземных вод состоит в определении их количества, которое может быть получено на месторождении с помощью рациональных в технико-экономическом отношении водозаборных сооружений при заданном режиме их эксплуатации и качестве воды, удовлетворяющем потребителя.

Расчеты водозаборных сооружений при оценке эксплуатационных запасов подземных вод заключается либо в определении возможной производительности этих сооружений при заданной величине понижения уровня воды, либо в определении понижения уровня при заданном значении производительности водозабора. Если проектируемый водозабор будет работать в режиме постоянного водоотбора, то оценка эксплуатационных запасов будет заключаться в доказательстве того, что максимальное понижение в наиболее нагруженной скважине водозабора (S_p) не превысит допустимой величины ($S_{дон}$) в течение всего срока работы сооружения (t_p), т.е. $S_p \leq S_{дон}$. Величина допустимого понижения принимается равной $S_{дон} = (0,5 \div 0,75)h_{cp}$ для безнапорных водоносных горизонтов и $S_{дон} = \Delta H + 0,5m$ для напорных (h_{cp} и m - средняя мощность грунтового горизонта и напорного пласта, соответственно; ΔH - относительный напор). Расчетный период работы водозабора t_p либо оговаривается заказчиком, либо в качестве расчетного периода выби-

рают промежуток времени, превышающий срок амортизационных исчислений с водозабора (20-30 лет). Для облегчения расчетов принимают $t_p = 10^4 \text{ суток} = 27,4 \text{ года}$ [9].

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод осуществляется гидродинамическим, гидравлическим и балансовым методами; в ряде случаев для подобной оценки привлекаются методы математического моделирования и гидрогеологических аналогий.

Оценка эксплуатационных запасов гидродинамическим методом. Гидродинамический метод оценки эксплуатационных запасов подземных вод базируется на использовании теории притока подземных вод к водозаборным сооружениям. Расчет может быть проведен на основе аналитических зависимостей, являющихся решениями конкретных схематизированных моделей, а также с использованием численного моделирования.

В зависимости от потребности в воде, водообильности горизонта скважинные водозаборы могут быть одиночными или групповыми.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод одиночных водозаборов заключается в доказательстве того, что расчетные понижения в самой водозаборной скважине на конец расчетного периода не превысят допустимой величины.

При работе небольших групповых водозаборов оценка эксплуатационных запасов подземных вод сводится к определению величины понижения в наиболее нагруженной скважине водозабора. При этом расчетное понижение определяется как сумма понижений, вызванных работой самой наиболее нагруженной скважины и соседних, взаимодействующих с ней скважин. Если расчетная величина понижения окажется меньше допустимой, то эксплуатационные запасы считаются обеспеченными.

Так, при работе водозаборной скважины для схемы изолированного и неограниченного в плане однородного изолированного пласта (схема Тейса) понижение в скважине на конец расчетного срока эксплуатации водозабора S_p может быть определено по формуле:

$$S_p = \frac{Q_c}{4\pi T} E_i \left(-\frac{r_c}{4at} \right)$$

При $r_c/(4a\tau) < 0,05$ интегральную экспоненциальную функцию в формуле заменим логарифмической:

$$S_p = \frac{Q_c}{4\pi T} \ln \left(\frac{2,25at}{r_c^2} \right)$$

Для группы скважин (например, группового линейного водозабора из трех скважин) расчетное понижение, как отмечалось, определяется для наиболее нагруженной скважины, находящейся в центре водозабора. Тогда, понижение в самой нагруженной скважине, вызванное ее собственной работой, определяется согласно вышеприведенной формуле, а дополнительное в ней – за счет работы двух соседних скважин:

$$\Delta S_p = \frac{Q_c}{4\pi T} \ln \left(\frac{2,25at}{r_1^2} \right) + \frac{Q_c}{4\pi T} \ln \left(\frac{2,25at}{r_2^2} \right),$$

где r_1 и r_2 – расстояние от центральной скважины до соседних скважин.

Оценка эксплуатационных запасов гидравлическим методом. Гидравлический метод подсчета эксплуатационных запасов основан на использовании эмпирических зависимостей, полученных по результатам опытных испытаний водоносных горизонтов. Применяется он на месторождениях с особо сложными гидрогеологическими условиями, когда имеет место значительная фильтрационная неоднородность водовмещающих пород продуктивного горизонта, не выяснены источники формирования эксплуатационных запасов, а выбор достоверной фильтрационной схемы для гидродинамического расчета заведомо невозможен. Этот метод привлекается для подсчета запасов подземных вод на месторождениях трещинно-жильных вод зон тектонических нарушений, трещинно-карстовых вод и др. Для подсчета эксплуатационных запасов подземных вод гидравлическим методом при разведке месторождения проводится опытно-эксплуатационное опробование с целью установления зависимости между расходами водозаборных скважин и понижениями уровней в них. Для определения этой зависимости опытные откачки проводят минимум с двумя дебитами. По данным откачек строится эмпирический график $Q = f(S)$, который используется для графического определения понижения уровня воды в скважине при запроектированном эксплуатационном дебите путем экстраполяции полученной зависимости от проектного

расхода. Экстраполяция может быть выполнена также по аналитическим зависимостям дебита от понижения, установленным эмпирически для различных условий.

Оценка эксплуатационных запасов балансовым методом. Метод основан на определении расхода подземных вод на водозаборном сооружении в пределах месторождения (на заданный срок эксплуатации) за счет привлечения различных источников их формирования. Подобная оценка эксплуатационных запасов (Q_3) проводится по балансовому уравнению:

$$Q_3 = \alpha_1 Q_e + \alpha_2 \frac{V_e}{t_p} + \alpha_3 Q_{np}$$

где Q_e и Q_{np} - естественные и привлекаемые ресурсы подземных вод; V_e - естественные запасы подземных вод; t_p - время эксплуатации водозаборного сооружения; α_1, α_2 и α_3 - коэффициенты извлечения естественных ресурсов, естественных запасов и привлекаемых ресурсов, соответственно.

Задача. Особенности подсчета запасов подземных вод

Оценить эксплуатационные запасы подземных вод для водоснабжения поселка городского типа. Водозабор планируется оборудовать на напорный водоносный горизонт, сложенный крупнозернистыми песками мощностью $m = 20$ м. Горизонт неограниченный в плане, сверху и снизу перекрыт мощными толщами слабопроницаемых глин. Избыточный напор горизонта составляет $\Delta H = 25$ м, статический пьезометрический уровень залегает на глубине $h_{cm} = 35$ м от поверхности земли. По данным опытно-фильтрационных работ получены следующие значения фильтрационных параметров горизонта: коэффициент фильтрации - $k = 10$ м/сут, коэффициент пьезопроводности - $a^* = 10^4$ м²/сут. Предполагается, что фильтр водозаборной скважины будет оборудован на эксплуатационной колонне радиусом $r_c = 0,25$ м. Потребное количество воды для организации централизованного водоснабжения поселка составляет $Q_{общ} = 5760$ м³/сут.

Требуется:

1. Провести гидродинамическую схематизацию и выбрать аналитическую зависимость для определения расчетного понижения в водозаборной скважине (S_p).
2. Оценить эксплуатационные запасы подземных вод при работе одиночного водозабора.
3. Определить максимально возможный расход водозаборной скважины.
4. Для случая, если заявленная водопотребность поселка не может быть обеспечена одной скважиной, определить необходимое количество скважин группового линейного водозабора.
5. Рассчитать эксплуатационные запасы подземных вод при работе группового линейного водозабора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ананьев В.П.* Инженерная геология: Учебник / В.П. Ананьев, А.Д. Потапов. М.: Высш. шк., 2009, 575 с.
2. *Всеволожский В.А.* Основы гидрогеологии: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 2007, 448 с.
3. ГОСТ 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2007, 54 с.
4. *Кирюхин В.А.* Общая гидрогеология: Учебник. СПб: СПГГИ(ТУ), 2008, 439 с.
5. *Кирюхин В.А.* Региональная гидрогеология: Учебник. СПб: СПГГИ(ТУ), 2005, 344 с.
6. *Кирюхин В.А.* Общая гидрогеология: Учебник / В.А. Кирюхин, А.И. Коротков, А.Н. Павлов. Л.: Недра, 1988, 359 с.
7. *Кирюхин В.А.* Гидрогеохимия: Учебник / В.А. Кирюхин, А.И. Коротков, С.Л. Шварцев. М.: Недра, 1993, 384 с.
8. *Коробкин В.И.* Инженерная геология и охрана окружающей среды: Учебник для ВУЗов / В.И. Коробкин, Л.В. Передельский. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 2011, 348 с.
9. *Петров Н.С.* Общая гидрогеология: Практикум / Н.С. Петров, А.А. Потапов. СПб: СПГГИ (ТУ), 1993, 65 с.

10. *Предельский Л.В.* Инженерная геология: Учебник / Л.В. Предельский, О.Е. Приходченко. Ростов-на-Дону: Феникс, 2009, 465 с.
11. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Минздрав России, 2002.
12. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии. М., 1985.
13. *Чернышев С.Н.* Задачи и упражнения по инженерной геологии: Учебн. пособие / Чернышев С.Н., Чумаченко А.Н., Ревелис И.Л. М.: Высшая школа, 2001, 254 с.
14. *Шварцев С.Л.* Общая гидрогеология: Учебник. М: Недра, 1996, 324 с.

Доцент



Устюгов Д.Л.