КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ ГЕОЛОГИИ ПРИ СНК СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГИДРОГЕОЛОГИИ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ (ВСЕГИНГЕО)

Н. А. ПЛОТНИКОВ

При участии Г. В. БОГОМОЛОВА и Г. Н. КАМЕНСКОГО

# КЛАССИФИКАЦИЯ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И МЕТОДИКА ИХ ПОДСЧЕТА




ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
КОМИТЕТА ПО ДЕЛАМ ГЕОЛОГИИ ПРИ СНК СССР

МОСКВА 1946 ЛЕНИНГРАД

Работа состоит из двух частей: классификации ресурсов подземных вод для целей водоснабжения с инструкцией по ее применению и методики подсчета этих ресурсов.

Классификация ресурсов подземных вод определяет степень их изученности для целей проектирования водоснабжения и устройства каптажей; методы подсчета ресурсов этих вод даются как для естественных условий, так и для периода эксплоатации.

Данная работа является первым (притом оригинальным) опытом по методике подсчета ресурсов подземных вод.

Книга предназначена служить методическим пособием для работы гидрогеологов и специалистов по водоснабжению.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Часть первая

Предисловие . . . . . 6

**Классификация ресурсов подземных вод для целей водоснабжения**

Глава I. Общие положения классификации ресурсов подземных вод для целей водоснабжения . . . . . 7
1. Основы классификации . . . . . 7
2. Принципы оценки ресурсов . . . . . 7
3. Таблица классификации ресурсов подземных вод для целей водоснабжения . . . . . 8

Глава II. Инструкция по применению классификации ресурсов подземных вод для целей водоснабжения . . . . . 10
4. Данные исследований, необходимые при применения классификации ресурсов, и содержание отчета-записки, представляемой по вопросу оценки ресурсов подземных вод для целей водоснабжения. 10
5. О методах определения ресурсов . . . . . 14
Проект инструкции о порядке внесения на рассмотрение и утверждение материалов по подсчету ресурсов подземных вод для целей водоснабжения . . . . . 17

Часть вторая

**Методика подсчета ресурсов подземных вод для целей водоснабжения**

Введение . . . . . 19

Глава I. **Общие положения** . . . . . 20
1. Виды ресурсов подземных вод . . . . . 20
2. Схемы гидрогеологических условий . . . . . 22
3. Схемы определения ресурсов подземных вод . . . . . 25

Глава II. **Методы определения естественного расхода подземного потока в поперечном сечении** . . . . . 26
4. Расчет расхода по простым и уточненным формулам Дарси, Шези и Смрекера . . . . . 26
5. Расчет расхода по действительной скорости . . . . . 30
6. Расчет расхода по радиусу влияния колодца . . . . . 31
7. Расчет расхода по способу проф. Малишевского . . . . . 31
8. Расчет расхода по полосе питания колодца путем построения гидроизогипс . . . . . 32
9. Расчет расхода подземного потока по методу пьезометрии . . . . 33
10. Оценка производительности подземного потока по способу удельного дебита . . . . . 35
11. Изменение расхода подземного потока во времени . . . . . 36
12. Сравнительная оценка методов определения естественного расхода подземного потока в поперечном сечении . . . . . 36

Стр.

Глава III. **Методы определения естественных ресурсов водоносных горизонтов по балансовым подсчетам** . . . . . 37
13. Определение ресурсов по детальным балансовым подсчетам . . 37
Баланс грунтовых вод в рыхлых отложениях замкнутой междугорной котловины Овенс (Owens), США Калифорния, по Г. М. Чарльзу. . . . . 40
Баланс подземных вод в одной из равнин юга СССР, по данным Н. К. Игнатовича . . . . . 41
Баланс подземных вод в районе конуса выноса, Узбекская ССР, по данным М. А. Шмидта . . . . . 42
14. Определение ресурсов по инфильтрации . . . . . 43
15. Определение ресурсов по дебиту ключей и по поверхностному стоку . . . . . 44
16. Определение ресурсов по коэфициенту и модулю подземного стока 44
17. Сравнительная оценка методов определения естественных ресурсов водоносных горизонтов по балансовым подсчетам . . . . . 46

Глава IV. **О вековых запасах** . . . . . 46
18. Определение вековых запасов . . . . . 46

Глава V. **Определение регулировочных ресурсов** . . . . . 48
19. Подсчет регулировочных ресурсов по коэфициенту водоотдачи . 48
20. Интегральный метод определения регулировочных ресурсов . . 49

Глава VI. **Методы определения эксплоатационных ресурсов подземных вод** . . . . . 51
21. Влияние размещения конструкции водосборов на величину эксплоатационных ресурсов и допустимое понижение уровней подземных вод при эксплоатации . . . . . 51
22. Использование методов подсчета эксплоатационных ресурсов по расходу подземного потока в поперечном сечении . . . . . 53
23. Расчет эксплоатационных ресурсов с учетом береговой инфильтрации . . . . . 57
24. Расчет эксплоатационных ресурсов по методу пьезометрии . . . 58
25. Оценка эксплоатационных ресурсов с учетом регулировочной емкости водоносного горизонта . . . . . 59
26. Оценка эксплоатационных ресурсов по методу депрессионных воронок . . . . . 60
27. Оценка эксплоатационных ресурсов подземных вод по методу изучения статических и динамических уровней по данным опытных откачек и стационарных наблюдений . . . . . 68
28. Оценка эксплоатационных ресурсов по методу аналогии . . . . . 68
29. Оценка эксплоатационных ресурсов по расчету взаимодействующих скважин . . . . . 69
30. Использование метода балансовых подсчетов при оценке эксплоатационных ресурсов . . . . . 71
31. Оценка эксплоатационных ресурсов с учетом использования вековых запасов . . . . . 74
32. Учет влияния изменения условий питания на величину эксплоатационных ресурсов . . . . . 74
33. Выбор методов определения эксплоатационных ресурсов для различных условий . . . . . 75

Глава VII. **Определение ресурсов нисходящих ключей** . . . . . 80
34. Учет гидрогеологических условий при оценке дебитов ключей . 80
35. Неравномерность расхода ключей, их характеристики и составление хронологического графика . . . . . 82
36. Обеспеченность дебита ключей. Кривые распределения и обеспеченности . . . . . 83
37. Анализ дебита ключей по теории вероятностей и построение теоретической кривой обеспеченности . . . . . 85

Стр.

38. Исследование связи дебита ключей с метеорологическими и гидрологическими факторами по методу корреляций . . . . . 93
39. Определение характеристики ключей по методу аналогий . . . . 98
40. Расширение периода наблюдений . . . . . 99
41. Определение минимального расхода ключа по методу Майэ и Губера . . . . . 100
42. Оценка методов по определению ресурсов нисходящих ключей 101

Глава VIII. **Определение ресурсов восходящих ключей** . . . . . 102
43. Зависимость дебита от понижения . . . . . 102
44. Обеспеченность дебита восходящих ключей . . . . . 104

Глава IX. **О точности подсчета ресурсов подземных вод и ключей** 104
45. Изученность гидрогеологических условий . . . . . 104
46. Ошибки, случайность наблюдений и определение их количества 106
47. Точность определения гидравлического уклона . . . . . 108

Глава X. **О вечной мерзлоте** . . . . . 109
48. Особенности определения ресурсов подземных вод и ключей в условиях вечной мерзлоты . . . . . 109

Глава XI. **О качестве подземных вод** . . . . . 111
49. Оценка качества подземных вод для водоснабжения. Оценка возможности изменения состава воды . . . . . 111

Литература . . . . . 115

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая работа состоит из двух частей:

1. Классификации ресурсов подземных вод для целей водоснабжения с инструкцией по ее применению.

2. Методики подсчета ресурсов подземных вод для целей водоснабжения.

Указанные классификация и методика подсчета ресурсов подземных вод для целей водоснабжения были доложены в марте 1944 г. на Всесоюзном гидрогеологическом совещании в Москве, причем были этим совещанием одобрены и рекомендованы к практическому использованию. Эти решения совещания были утверждены коллегией Комитета по делам геологии при СНК СССР на заседании от 17 марта 1944 г.

Таблица классификации ресурсов подземных вод для целей водоснабжения разработана комиссией в составе: проф. Г. В. Богомолова, Г. Н. Каменского и доктора техн. наук Н. А. Плотникова. Остальные разделы классификации и методика подсчета ресурсов подземных вод составлены Н. А. Плотниковым.

Данная работа является первым опытом по методике оценки ресурсов подземных вод. Поэтому Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО) будет признателен за все замечания, которые будут учтены, в случае если будет признано необходимым переиздать настоящую работу.

Замечания просим направлять по адресу: Москва 17, Пыжевский пер. д. 7, ВСЕГИНГЕО.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

# КЛАССИФИКАЦИЯ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

## ГЛАВА I

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КЛАССИФИКАЦИИ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

### 1. Основы классификации

1) Классификация определяет степень изученности подземных вод (и ключей) для производства изысканий, для проектирования водоснабжения и для устройства каптажей.

2) Ресурсы подземных вод по степени изученности подразделяются на три категории — A, B и C, с подразделением категории A на $A_1$ и $A_2$ и категории C на $C_1$ и $C_2$. Категория B подразделений не имеет.

3) Классификация является обязательной при определении ресурсов подземных вод и устанавливает значение категорий ресурсов при разрешении вопросов использования подземных вод для водоснабжения.

4) Каждая категория ресурсов определяется комплексом характерных признаков; несоответствие одному из них не позволяет относить к той категории, которой удовлетворяют остальные его признаки.

5) Применение классификации ресурсов подземных вод определяется соответствующей инструкцией.

### 2. Принципы оценки ресурсов

1) Классификация ресурсов подземных вод (включая выходы их — источники) устанавливает единые принципы оценки ресурсов.

2) Классификация предусматривает ресурсы подземных вод, которые могут быть получены из каптажных сооружений при современных технико-экономических условиях.

3) Ресурсы определяются по каждому водоносному горизонту в отдельности и для высоких категорий, с учетом изменения

их во времени (например сезонного колебания, многолетнего), а также с учетом изменения их режима под влиянием эксплоатации. Ресурсы могут определяться не только для всего водоносного горизонта, но и для отдельного его участка.

4) При оценке ресурсов подземных вод необходимо учитывать положение уровней, условия каптажа подземных вод и бесперебойность притока их к каптажным сооружениям.

Для категорий В, $A_2$ и $A_1$ определяется степень достоверности гидрогеологических элементов, необходимых для проектирования или эксплоатации каптажных сооружений.

5) Количественная оценка ресурсов подземных вод дается в *м³/сутки.*

Примечание. Производительность каптажных сооружений определяется в *л/сек* или в *м³/час.*

6) Качественная оценка ресурсов подземных вод дается по данным анализов воды с учетом гидрогеологических и санитарных условий и определяется целевым использованием.

## 3. Таблица классификации ресурсов подземных вод для целей водоснабжения

| Категория ресурсов | Разведанность и изученность | Практическое назначение и применение данной категории ресурсов |
|---|---|---|
| Категория $C_2$ | Ресурсы подземных вод оцениваются в отношении как количества, так и качества по геологическим и гидрогеологическим предпосылкам. | Для планирования гидрогеологических исследований. Для обоснования бурения разведочных скважин на воду. |
| Категория $C_1$ | а) Ресурсы определяются по общим гидрогеологическим исследованиям в районе водосборов на основании изучения естественных обнажений и редких выходов подземных вод (источники, колодцы, скважины).<br>б) Предполагаемые ресурсы подземных вод в районе намечаемых водосборов оцениваются по аналогии с такими участками того же водоносного горизонта, в которых ресурсы разведаны по более высоким категориям.<br>в) Ресурсы слабо разведаны на участке водосборов, в условиях сложного и пестрого распределения подземных вод как по количеству, так и по степени минерализации, а также при неустойчивом режиме. | Для планирования и составления программ гидрогеологических исследований.<br>Для обоснования бурения опытно-разведочных и в отдельных случаях разведочно-эксплоатационных скважин на воду.<br>Для обоснования перспективных планов размещения промпредприятий и населенных пунктов.<br>Для обоснования гипотезы использования подземных вод для водоснабжения. |

*Продолжение*

| Категория ресурсов | Разведанность и изученность | Практическое назначение и применение данной категории ресурсов |
|---|---|---|
| Категория В | Качество воды определяется по аналогии с соседними районами по единичным анализам или путем опробования на вкус. В условиях сложного и пестрого распределения подземных вод анализы воды на участке водосборов обязательны.<br>а) Ресурсы подземных вод определяются приближенно на основании общих гидрогеологических исследований с единичными опытно-разведочными выработками и кратковременными откачками в районе намечаемых водосборов.<br>б) Ресурсы подземных вод определяются в случае простого гидрогеологического строения (например в условиях хорошо выдержанного и изученного артезианского горизонта) по аналогии с находящимися за пределами данного района участками, где хорошо изучены ресурсы более высокой категории ($A_1$ и $A_2$). | Для сравнения и выбора источника водоснабжения.<br>Для выбора участков водосборов и составления проектного задания.<br>Для обоснования технического проекта, если ресурсы подземных вод явно превышают потребность. Для проектирования детальных изысканий. Для обоснования заложения разведочно-эксплоатационных и отдельных эксплоатационных скважин. |
| Категория $A_2$ | Режим подземных вод выявлен недостаточно: колебание уровней подземных вод и расходов источников определено приближенно по единичным замерам и гидрогеологическим соображениям.<br>Ресурсы подземных вод охарактеризованы с точки зрения сравнения между собой различных горизонтов (зон) в районе, а также путем сравнения с поверхностными водами.<br>Качество воды определяется по сокращенным анализам или по единичным полным анализам, а также с учетом гидрогеологических и санитарных условий для мест намечаемых водосборов.<br>Ресурсы подземных вод установлены на основании детальных гидрогеологических исследований с производством опытных работ (в частности для неглубоких вод — заложение опытных систем) на участке проектируемых водосборов. | Для обоснования и составления технических проектов водоснабжения и заложения эксплоатационных каптажей и групп взаимодействующих скважин и колодцев |

*Продолжение*

| Категория ресурсов | Разведанность и изученность | Практическое назначение и применение данной категории ресурсов |
|---|---|---|
| Категория $A_1$ | Уровни подземных вод на участке водосборов и расходы источников определены по данным годичных наблюдений.<br>Качество воды определено по полным химическим и бактериологическим анализам проб, взятых на участке водосборов, а также на основании санитарного обследования.<br>а) Ресурсы подземных вод вполне изучены и проверены путем детальных исследований с производством длительных опытных или эксплоатационных откачек на участке водосборов и с постановкой стационарных наблюдений продолжительностью не менее трех лет.<br>б) В отдельных случаях сюда же относятся ресурсы, установленные путем анализа эксплоатационных данных в целях возможного расширения использования водоносного горизонта.<br>Оценка качества воды и изменения ее состава установлены путем систематических наблюдений в течение двух-трех лет с производством повторных химических и бактериологических анализов. | Для обоснования и планирования текущей эксплоатации водосборов.<br>Для обоснования составления проекта расширения водосборов. |

Примечание. Высокая категория должна включать данные по разведанности и изученности более низкой категории.

ГЛАВА II

## ИНСТРУКЦИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ КЛАССИФИКАЦИИ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

### 4. Данные исследований, необходимые при применении классификации ресурсов, и содержание отчета-записки, представляемой по вопросу оценки ресурсов подземных вод для целей водоснабжения

Для обоснования оценки и подсчета ресурсов подземных вод представляется записка, в которой должны быть освещены гидрогеологические условия, качество воды и ресурсы подземных вод, а также обоснование и расчетные гидрогеологические данные для проектирования водозаборов.

Изложение записки должно быть краткое. Геологические и гидрогеологические описания, расчетные данные и т. д. приводятся в сжатой форме. Данные полевых наблюдений и лабораторных исследований сводятся в записке в виде итоговых данных.

Материалы полевых наблюдений и лабораторных исследований к записке не прикладываются, но должно быть указано, в какой организации они хранятся.

При наличии опубликованных материалов гидрогеологических исследований в записке приводятся данные в виде резюме со ссылкой на эти материалы.

В записке излагаются лишь те материалы, которые используются для практических выводов, например, при составлении записки по ресурсам артезианского юрского водоносного горизонта в районе г. Харькова приводить метеорологические и гидрологические данные не нужно (на данном этапе наших знаний). Для единичных каптажей текст максимально сокращается, в особенности для водоносных горизонтов, освещенных в опубликованной литературе.

Состав данных должен удовлетворять принятой методике оценки ресурсов.

Детальность данных определяется категорией изученности в соответствии с классификацией ресурсов.

Детальностью изученности, т. е. категорией ресурсов, определяется также состав и объем записки.

Ниже приводятся основные данные, которые должны быть в записке для отдельных категорий.

Для категории $C_2$ необходимо описать исследованность района, его геологическое строение, гидрогеологические условия и дать прогноз водоносности.

К записке должна быть приложена имеющаяся геологическая карта района и схема водоносных горизонтов (зон).

Для категории $C_1$ в записке должны быть следующие данные:

1) Исследованность района.

2) Орогидрография района.

3) Климатические данные о среднемесячных максимальных и минимальных осадках и температуре воздуха.

4) Геологическое строение (стратиграфия, литология и тектоника), геоморфологическое описание района.

5) Гидрогеологические условия — строение и распространение водоносных горизонтов (зон), мощность и глубина залегания кровли и подошвы их, питание и дренаж, положение уровней воды, дебиты источников, дебиты колодцев и скважин (если они есть).

6) Данные о составе подземных вод по аналогии, по анализам или на основании определения на вкус.

7) Оценка ресурсов подземных вод.

К записке должны быть приложены:

1) Список литературы и архивных материалов, используемых в записке.

2) Геологическая карта района в масштабе для глубоких подземных вод не мельче 1 : 500 000 и для неглубоких подземных вод и ключей 1 : 500 000 — 1 : 200 000.

3) Гидрогеологический разрез.

Для категории В в записке должны быть следующие данные:

1) Исследованность района.

2) Орогидрография района.

3) Климатические данные о среднемесячных, максимальных и минимальных осадках и температуре воздуха.

4) Гидрометрические данные об уровнях и расходах поверхностных вод, а также данные о составе этих вод (необходимо для случая, когда анализируется связь подземных вод с поверхностными водами).

5) Геологическое строение (стратиграфия, литология и тектоника). Для неглубоких подземных вод — подробное геоморфологическое описание.

6) Гидрогеологические условия — строение и распространение водоносных горизонтов (зон), мощность и глубина залегания кровли и подошвы их, питание и дренаж, положение уровней воды, дебиты ключей, дебиты колодцев и скважин (данные опытных откачек и эксплоатационные данные аналогов).

7) Оценка качества воды по данным анализов с учетом гидрогеологических и санитарных условий для мест намечаемых водосборов.

Для суждения о качестве анализов должны быть приведены условия и способ взятия проб воды, а также методика анализов. Для подземных вод, имеющих близкую и тесную связь с поверхностными водами, должны быть приложены анализы последних.

В составе полных анализов воды должны быть: дата взятия пробы, номер выработки соответствующий карте и описанию этих выработок (для скважин, шурфов и шахтных колодцев указывается глубина), температура воды при взятии пробы, температура воздуха при взятии пробы, цвет, прозрачность, запах, вкус, pH, жесткость в немецких градусах — общая, карбонатная и постоянная, взвешенные вещества, изменение при стоянии, сухой остаток, прокаленный остаток, окисляемость ($O_2$), свободная углекислота ($CO_2$), сероводород ($H_2S$), $Al_2O_3$ (по разности), $Fe_2O_3$, $SiO_2$, $Ca^{\cdot\cdot}$, $Mg^{\cdot\cdot}$, $K^{\cdot} + Na^{\cdot}$, $NH_4$, $Fe^{\cdot\cdot}$, $Mn^{\cdot\cdot}$, $Cl'$, $SO_4''$, $HCO_3'$, $NO_3'$, $NO_2'$, бактериологический анализ (число колоний в 1 *см*$^3$ и коли — индекс).

В составе сокращенных анализов должны быть: дата взятия пробы, номер выработки, соответствующий карте и описанию этих выработок (для скважин, шурфов и шахтных колодцев указывается глубина), температура воды при взятии пробы, температура воздуха при взятии пробы, цвет, прозрачность, запах, вкус, сухой остаток, жесткость в немецких градусах — общая, карбонатная и постоянная, железо общее, $Ca^{\cdot\cdot}$, $Mg^{\cdot\cdot}$, $NH_4^{\cdot}$ $Cl'$, $SO_4''$, $HCO_3'$, $NO_2'$ окисляемость ($O_2$).

Выражение химического анализа дается в ионной, миллиграмм-эквивалентной и процент-эквивалентной формах.

8) Гидрогеологические расчетные элементы для захвата подземных вод:

а) для источников — дебиты и предполагаемое изменение их. Для напорных каптированных источников — изменение дебита при понижении отметки излива;

б) для подземных вод — дебиты колодцев (и скважин), удельные дебиты;

в) соображения о взаимодействии колодцев.

9) Выбор участка для захвата подземных вод.

10) Определение ресурсов подземных вод.

К записке должны быть приложены:

1) Список литературных и архивных материалов, используемых в записке.

2) Геологическая карта района в масштабе для глубоких подземных вод не мельче 1 : 500 000 и для неглубоких подземных вод не мельче 1 : 200 000.

3) Гидрогеологическая карта района.

4) Гидрогеологические разрезы.

5) План участка водосборов в масштабе для подземных вод не мельче 1 : 10 000 и для источников не мельче 1 : 1000.

Для категории $A_2$ в записке, кроме сведений, указанных для категории В, должны быть приведены:

1) Данные опытных работ на участке водосборов.

2) Данные годичных стационарных наблюдений.

3) Климатические и гидрометрические (по поверхностным водам) данные, соответствующие времени наблюдений за подземными водами и источниками (в случае когда анализируется связь подземных вод с поверхностными).

4) Соображения об установлении зон санитарной охраны.

Для категории $A_1$ записка составляется как для категории В и $A_2$, но особое внимание должно быть обращено на данные длительных или эксплоатационных откачек, а также на данные длительных стационарных наблюдений. Поэтому в записке должны быть выделены следующие разделы:

а) данные опытных (или эксплоатационных) откачек на участке водосборов;

б) данные длительных стационарных наблюдений за режимом подземных вод (и источников) и в случае необходимости метеорологические и гидрометрические данные по поверхностным водам за тот же период.

Для отдельных типов подземных вод и источников следует получить более детальные данные, соответствующие специфическим особенностям данного типа вод. Ниже приводятся указания о данных исследований, необходимых при оценке ресурсов по категориям В, $A_2$ и $A_1$ для указанных типов подземных вод:

1) Для неглубоких подземных вод должно быть подробное геоморфологическое описание.

2) Для источников, выходящих из трещиноватых и закарстованных пород с близкой областью питания (несколько километров), — оценка неравномерности дебита и изменения состава воды, в особенности ее физических свойств и бактериального состава при максимумах и минимумах расхода.

3) Для подземных вод в трещиноватых и карстовых породах — соображения о величине трещиноватости и закарстованности и об их изменении по глубине и площади.

4) Для подрусловых вод — данные о размываемости и кальматации русла, изменении уровней и расходов рек, имеющих гидравлическую связь с подрусловыми водами.

5) Для водоносных горизонтов (зон трещиноватости) в тектонически нарушенных районах (например для дизъюнктивных мульд, зон тектонических разломов, горноскладчатых областей) — тектонические карты в масштабе 1:200 000 для категории В и 1:100 000 — 1:50 000 для категорий $A_1$ и $A_2$. При значительном распространении водоносных горизонтов (зон) карты могут ограничиваться районом водозаборов.

6) Для подземных вод в условиях вечной мерзлоты должны быть приведены данные о глубине вечной мерзлоты, соображения об изменении температуры породы по вертикали для скважин и особо тщательные данные об изменении температуры воды в течение года; при температуре, близкой к 0°, точность измерения должна быть не меньше 0,1°.

Для источников в условиях вечной мерзлоты должны быть данные о промерзании выходов источников, изменении мест их выходов, режима этих источников (в особенности в зимнее время), а также сведения о наледях.

7) Для грунтовых вод засушливых областей с пестрой минерализацией и в местах, где грунтовые воды имеют связь с минерализованными водами, должны быть данные об изменении минерализации по вертикали и по площади распространения; при подсчете ресурсов должны быть приложены соображения о возможном засолении воды из эксплоатационных водосборов.

8) Для грунтовых вод, имеющих связь с болотами — соображения о возможности повышения жесткости в связи с процессами окисления в осушенных болотах.

## 5. О методах определения ресурсов

Выбор метода для оценки ресурсов подземных вод определяется гидрогеологическими условиями и изученностью их (категория изученности), а также потребностью в воде.

Рекомендуется оценки и подсчет ресурсов производить по нескольким методам. Методы оценки и подсчета ресурсов изложены в специальной инструкции по подсчету ресурсов подземных вод.

Ниже даются основные руководящие указания по вопросу выбора методов для определения ресурсов.

Для категории изученности $C_2$ ресурсы оцениваются по геологическим и гидрогеологическим предпосылкам. В связи с этим необходимо дать анализ геологических условий в разрезе вероятной водоносности и провести сравнение с изученными районами, находящимися в подобных геологических условиях, т. е. следует применить метод аналогии.

Для категории изученности $C_1$ оценка ресурсов делается при наличии небольшого числа данных в районе, при слабой разведанности участка водозаборов в условиях сложного и пестрого распределения подземных вод и по аналогии с другими разведанными по более высокой категории участками того же водоносного горизонта. Поэтому оценку ресурсов подземных вод по категории $C_1$ следует делать путем анализа полученных геологических и гидрогеологических (хотя бы небольших) данных о дебитах источников и колодцев, причем также следует применить метод аналогии путем сравнения с данными более изученных районов.

Для категории В можно пользоваться следующими методами:

Для источников, дебит которых определен по единичным замерам, оценка ресурсов делается с учетом общих гидрогеологических условий по методу аналогий. Для каптированных восходящих источников в некоторых случаях следует, кроме этого, показать зависимость изменения дебита от понижения.

Для подземных вод, при наличии данных общих гидрогеологических исследований с единичными опытно-разведочными выработками и кратковременными откачками в районе водозаборов, определение ресурсов делается:

а) для неглубоких подземных вод — в результате приближенного подсчета расхода подземного потока в поперечном сечении, например по формуле Дарси при определении коэфициента фильтрации лабораторным методом, или по данным откачек;

б) для подрусловых вод, имеющих тесную связь с поверхностными водами на участке водосборов, — путем приближенного расчета водосборов с учетом береговой инфильтрации;

в) для случаев выявленных условий питания и стока — по методу приближенных балансовых подсчетов, например по коэфициенту подземного стока и модуля стока;

г) для всех случаев — путем анализа дебитов, а также статических и динамических уровней по данным опытных откачек.

Для подземных вод при простом гидрогеологическом строении и при наличии аналогичного по гидрогеологическим условиям участка (или нескольких аналогичных участков), где ресурсы изучены по категориям $A_2$ или $A_1$, оценка ресурсов делается по методу аналогии.

Для категории $A_2$ можно пользоваться следующими методами:

Для источников оценка ресурсов производится по данным одногодичных наблюдений с применением также метода ана-

логии и расчета минимального расхода по методу Майе и Губера.

Для восходящих каптированных источников, кроме того, определяется зависимость дебита от понижения.

Для подземных вод, при наличии данных детальных гидрогеологических исследований с производством опытных работ на участке водозаборов, определение ресурсов делается:

а) для неглубоких подземных вод — в результате подсчета расхода подземного потока в поперечном сечении по данным опытных откачек, путем определения действительной скорости индикаторами и по расчету взаимодействующих колодцев;

б) для подрусловых вод, имеющих тесную связь с поверхностными водами на участке водозаборов, — путем расчета водозаборов с учетом береговой инфильтрации.

в) во всех случаях — путем анализа дебитов, а также статических и динамических уровней по данным опытных откачек;

г) для глубоких напорных горизонтов — путем расчета взаимодействующих колодцев, применяя также аналогию с хорошо изученными районными депрессиями близких по гидрогеологическим условиям участков (районов) водосборов;

д) для участков, имеющих данные по стоку и питанию, — по методу балансовых подсчетов;

е) для неглубоких напорных горизонтов при подземном потоке небольшой ширины (подрусловые потоки) — по методу пьезометрии;

ж) при наличии данных об изменении уровней в области питания неглубоких подземных вод можно ресурсы оценивать по регулирующей емкости водоносного горизонта;

з) для случаев, когда естественный расход потока не удовлетворяет потребности, следует рассчитывать использование вековых запасов;

и) при подсчетах ресурсов должно быть учтено годичное их изменение, которое следует оценивать по данным наблюдений за режимом.

Для категории $A_1$ можно пользоваться следующими методами:

Для источников, когда наблюдения за их режимом проводились не менее трех лет, следует кроме методов, рекомендованных для категории $A_2$, пользоваться также:

а) исследованием дебита ключей по теории вероятности и построением теоретической кривой обеспеченности;

б) исследованием связи дебита ключей с метеорологическими и гидрологическими факторами по методу корреляций.

Для подземных вод, при наличии данных детальных гидрогеологических исследований с производством длительных опытных или эксплоатационных откачек, следует пользоваться теми же методами, что и для категории $A_2$; достоверность выводов, конечно, получается более высокая.

При наличии длительных, не менее трех лет, стационарных наблюдений за эксплоатацией, расчетные элементы, используемые

при подсчетах, берутся по данным указанных наблюдений, например для глубоких напорных вод при подсчете районной депрессии.

На основе стационарных наблюдений делаются выводы об изменчивости дебита каптажей, уровней воды и ее состава.

### Проект инструкции о порядке внесения на рассмотрение и утверждение материалов по подсчету ресурсов подземных вод для целей водоснабжения

1. Утверждению ВКЗ и ТКЗ подлежат ресурсы подземных вод, подсчитанные по категориям В, $A_2$ и $A_1$ и намеченные к использованию для целей водоснабжения.

Примечание. Если ресурсы подземных вод определены по категории не выше $C_1$, то они могут утверждаться начальником учреждения, выполняющего работу.

2. Проектирование и строительство новых, а также реконструкция и расширение действующих водопроводов, для которых в качестве источников водоснабжения принимаются подземные воды, без утверждения ресурсов ВКЗ и ТКЗ запрещаются.

3. Утверждению ВКЗ подлежат ресурсы подземных вод, принимаемых в качестве источников водоснабжения всех предприятий союзного значения и прочих при потребности в подземной воде более 2000 *м³/сутки*, а также городов с населением более 20 000 жителей и всех столиц республик и областных городов.

4. Утверждению ТКЗ подлежат ресурсы подземных вод, принимаемых в качестве источников водоснабжения предприятий, но не подлежащих утверждению ВКЗ, при суммарной потребности в подземной воде в одном районе более 1000 *м³/сутки*, а также городов с населением менее 20 000 жителей и всех рабочих поселков.

5. На утверждение в ВКЗ и ТКЗ материалы представляются Наркоматами, отраслевыми главками или входящими в их систему объединениями, трестами и промышленными предприятиями.

6. Объем материалов, представляемых для утверждения ресурсов, должен соответствовать требованиям, указанным в инструкции по применению классификации ресурсов подземных вод для целей водоснабжения.

7. В случае неудовлетворительного качества представляемых в ВКЗ и ТКЗ материалов, ВКЗ и ТКЗ вправе возратить их для переделки, указав на недостатки работы.

8. Результаты рассмотрения запасов оформляются протокольным постановлением ВКЗ или ТКЗ.

9. Вносимые в ВКЗ материалы представляются при описи и должны быть надлежащим образом оформлены. Отчеты и графи-

ческие материалы должны быть подписаны авторами с указанием должностей и скреплены печатью соответствующей организации. На всех документах должна быть поставлена дата.

10. Материалы представляются в трех экземплярах, из которых один, по рассмотрении его в ВКЗ, или ТКЗ, возвращается с внесенными поправками или изменениями организации, внесшей материалы, второй передается Всесоюзному геологическому фонду и третий передается в Территориальный геологический фонд при местном Управлении Комитета по делам геологии при СНК СССР.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

# МЕТОДИКА ПОДСЧЕТА РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе даются руководящие указания по подсчету ресурсов подземных вод для целей водоснабжения, т. е. практически рассматриваются такие ресурсы, которые могут быть получены каптажными сооружениями.

Вопросы практического подсчета и оценки ресурсов подземных вод в литературе освещены мало, по вопросу же о самом понимании термина „ресурсы" имеются разноречивые мнения. Поэтому в данной работе, наряду с инструктивными указаниями, излагается и обоснование принятых положений.

Так как методика оценки и подсчета ресурсов освещена в литературе весьма недостаточно, то нередко при экспертизе гидрогеологических отчетов приходится встречаться с недостаточным, а иногда и неверным, анализом этого вопроса. Особенно часто не учитывается изменение режима подземных вод при эксплоатации.

Ресурсы подземных вод, которые могут быть получены при эксплоатации каптажных сооружений, нередко смешивают с естественным расходом подземного потока. Наблюдаются еще и другие ошибочные представления.

В настоящей работе рассматриваются сначала виды ресурсов подземных вод, схемы гидрогеологических условий, схемы определения ресурсов подземных вод, а также гидрогеологические и прочие данные, необходимые при определении ресурсов подземных вод. Затем разбираются методы определения естественного расхода подземного потока в поперечном сечении, оценки ресурсов по балансовым подсчетам, а также определения вековых запасов и регулировочных ресурсов. Дальше разбираются методы определения эксплоатационных ресурсов и ресурсов ключей. И, наконец, даются указания по точности подсчета ресурсов, по особенностям определения ресурсов в условиях вечной мерзлоты и по оценке качества подземных вод.

ГЛАВА I

# ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## 1. Виды ресурсов подземных вод

Одним из важнейших показателей для оценки ресурсов подземных вод является естественный расход подземного потока. Этот расход меняется во времени; следовательно, по естественному расходу должны быть получены данные за различные периоды года и, в первую очередь, для максимума и минимума этого расхода.

Для неглубоких подземных потоков, имеющих сравнительно ограниченную ширину (до нескольких сотен метров и нескольких километров), определение расхода по всему поперечному сечению обычно не вызывает больших затруднений. Если же подземные потоки имеют поперечное сечение большой длины, то ограничиваются определением расхода не по всей ширине потока, а на отдельном участке его.

Естественный расход подземного потока всего или только на части его ширины можно назвать естественными ресурсами всего потока в поперечном сечении или соответственно в части его. Для практических целей естественный расход подземного потока на отдельном его участке является нередко достаточной характеристикой; это бывает, например, для случаев, когда потребный расход водосбора меньше естественного расхода подземного потока на исследуемой ширине участка.

Однако, в ряде случаев (например глубокие подземные воды) определение естественного расхода может быть практически невозможно по своей дороговизне или по техническим условиям. Кроме того, для расчета обеспеченности бесперебойного притока воды к каптажным сооружениям знания естественного расхода нередко бывают недостаточны.

При использовании подземных вод необходимо, как правило, рассчитывать на такое питание данного водоносного горизонта, которое обеспечивает бесперебойную его эксплоатацию. Но обычно питание водоносных горизонтов происходит периодически и нередко в условиях (например в Европейской части СССР) только весной. Интервалы между периодами питания водоносных горизонтов за год часто значительно больше, чем эти периоды питания. В это время совершенно естественно рассчитывать на использование накопленных количеств воды, которые целесообразно назвать регулировочными ресурсами, или регулировочной емкостью.

В особенности это важно учитывать в водоносных горизонтах со свободным зеркалом и имеющих небольшое распространение. Периодическое использование таких ресурсов подземных вод в подавляющем большинстве случаев является совершенно необходимым и реальным. В этом случае можно провести аналогию с водохранилищем, которое регулирует неравномерный, недоста-

точный для удовлетворения потребностей расход реки. Для подземных вод водоносная толща является таким подземным водохранилищем, которое позволяет без всяких затрат регулировать и накапливать ресурсы подземных вод. При подземных водах объем регулировочной емкости определяется мощностью и распространением водоносной толщи выше отметок самых низких уровней, а также коэфициентом водоотдачи, который соответствует содержанию гравитационной[1] воды в породе.

При подсчете количества воды, обеспечивающего непрерывное действие водозаборов, необходимо иметь в виду два следующих весьма важных обстоятельства:

1. При эксплоатации естественный режим подземных вод нарушается, так как в районе водосборов уровни воды понижаются и гидравлические уклоны там изменяются — увеличиваются по направлению к водосборам. Вследствие этого расход подземного потока в районе водосборов обычно увеличивается. Нередко это вызывает заметный приток поверхностных вод в водоносный горизонт. Во всяком случае совершенно очевидно, что при эксплоатации получается новый нарушенный режим подземного потока, при котором расход на отдельных участках его, а нередко и для всего потока, увеличивается.

2. Отбор подземных вод определяется также техническими и экономическими условиями. Например понижение уровня в водоносном горизонте со свободным зеркалом, путем откачки из трубчатых или шахтных колодцев, ограничивается лишь частью мощности водоносного слоя.

Таким образом, при расчете ресурсов подземных вод, обеспечивающих действие водосборов, необходимо не только рассматривать естественный расход подземного потока или его части и регулировочную емкость, сопоставляя их с потребностью в воде, но также учитывать изменение режима подземных вод при эксплоатации и технико-экономические возможности отбора воды. Ресурсы, которые определяются для всего водоносного горизонта или отдельного его участка с учетом использования регулировочной емкости водоносного слоя, изменения режима при эксплоатации и технико-экономических возможностей, мы будем называть эксплоатационными ресурсами.

Эксплоатационные ресурсы могут быть больше или меньше естественного расхода. Однако во всяком случае эксплоатационные ресурсы следует рассматривать, как правило, с учетом их возобновления в течение года или нескольких лет.

В отдельных случаях можно допустить эксплоатацию водоносного горизонта с таким расходом, который не обеспечивается питанием. При подобных условиях расчет притока к водосборам

[1] Под гравитационной водой понимается вода, которая подчиняется законам силы тяжести, имеет возможность свободно стекать из породы и может быть, следовательно, извлечена при эксплоатации водоносных горизонтов. Остальные виды воды практически для водоснабжения не могут быть использованы.

следует вести с учетом использования емкости водоносного слоя, заполненного гравитационной водой, за счет уменьшения количества этой воды.

Такая емкость водоносного слоя могла быть заполнена в отдаленные времена. Поэтому количество такой воды можно назвать вековыми запасами.

При использовании вековых запасов подземных вод необходимо иметь в виду непрерывное снижение уровня воды при постоянных или даже уменьшающихся отборах воды.

При прекращении отбора воды вековые запасы могут постепенно восстанавливаться.

Таким образом, мы выделяем следующие виды ресурсов подземных вод: естественные ресурсы (естественный расход подземного потока), регулировочные ресурсы, вековые запасы и эксплоатационные ресурсы.

Затем мы выделяем выходы подземных вод — ключи, дебиты которых будем называть их ресурсами. Имея в виду, что при понижении уровня восходящие ключи обычно увеличивают дебит, ресурсы ключей мы разделяем на ресурсы нисходящих ключей и ресурсы восходящих ключей.

## 2. Схемы гидрогеологических условий

Гидрогеологические условия залегания подземных вод в отношении практики использования их для водоснабжения довольно разнообразны, но по роду общих признаков их можно объединить по группам. Такое объединение мы даем с целью более удобного анализа ресурсов и применения того или иного метода их оценки.

Подземную воду вместе со вмещающей ее породой, которые имеют распространение в пространстве, будем называть водоносным горизонтом.

Самым важным элементом при определении ресурсов подземных вод являются геологические условия залегания водоносного горизонта и его строение. В отдельных случаях циркуляция подземных вод может быть приурочена к нескольким (и даже к одной) трещинам. В этом случае водоносный горизонт, как совокупность подземной воды и водовмещающей породы, ограничивается незначительным распространением.

Глубина залегания водоносного горизонта определяет доступность и стоимость его изучения. Поэтому метод определения ресурсов, практически пригодный для неглубоких подземных вод, может оказаться непригодным для глубоко залегающих вод.

Определение ресурсов выходов подземных вод — ключей — по методике отличается от таковой для подземных вод.

Поэтому целесообразно выделить в отдельные группы глубокие подземные воды, неглубокие и их выходы — ключи.

При изучении водоносного горизонта, приуроченного к пласту рыхлых пород, имеется возможность выяснить ряд важнейших гидрогеологических элементов (распространение пласта, мощность

и ее изменение, пористость, коэфициент фильтрации и проч.). Если водоносный горизонт приурочен к пласту трещиноватых пород, то для такого водоносного горизонта также возможно выяснить отмеченные гидрогеологические элементы, правда, с большими затруднениями. Указанные водоносные горизонты можно было бы отнести к пластовым водам.

Для трещиноватых и закарстованных пород с редким и сложным распределением коллекторов и в особенности из глубоко залегающих пород, изучение указанных гидрогеологических элементов и условий питания часто практически представляется невозможным.

По этим признакам целесообразно подземные воды разделить на пластовые и жильные.

Участки водоносных горизонтов, удаленных от области питания и имеющих большое распространение (например, юрский водоносный горизонт Северо-Украинской мульды с площадью распространения в 300 000 $км^2$), существенно отличаются от подземных вод, имеющих близкую область питания (и дренирование) и небольшое распространение (например подрусловые воды Инкерманской долины р. Черной в Крыму с площадью распространения 5 $км^2$).

Это различие особенно выявляется в изменении режима при эксплоатации. Методы расчета ресурсов для указанных двух случаев также различны. Поэтому целесообразно выделить обширные водоносные горизонты и водоносные горизонты, имеющие небольшое распространение.

Изучение водоносного горизонта в районах резких тектонических нарушений значительно осложняется определением условий залегания водоносной толщи и гидравлической связи с другими горизонтами. Поэтому целесообразно выделить водоносные горизонты в условиях спокойного и слабо нарушенного залегания пород и в условиях значительных тектонических нарушений.

Подземные воды бывают приурочены к зернистым (обломочным, рыхлым) или трещиноватым и карстовым породам. Условия движения подземных вод в них будут различны: для зернистых пород подсчет пористости подробно разработан, в трещиноватых же и карстовых — весьма затруднителен; несколько различно и применение отдельных методов подсчета ресурсов.

Поэтому по характеру пустот в водоносной толще подземные воды следует разделить на две группы; приуроченные к зернистым породам и приуроченные к трещиноватым и закарстованным породам.

По генетическим типам водоносных пород целесообразно выделить подземные воды в аллювиальных отложениях (подрусловые воды), в предгорных образованиях (конусы выноса, наклонные равнины), во флювиогляциальных отложениях, в коренных осадочных отложениях, в коренных метаморфических и в изверженных породах.

В зависимости от климатических условий обычно изменяется как режим подземных вод, так и ряд других их особенностей; по этим признакам следует выделить подземные воды в вечной

мерзлоте с разделением их по отношению к слою вечной мерзлоты на надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные; затем надо отличать грунтовые воды засушливых областей с пестрой минерализацией от грунтовых вод, областей избыточного и умеренного увлажнения.

Условия движения подземных вод со свободным зеркалом и напорных вод резко между собой отличаются. Поэтому целесообразно также разделение подземных вод на напорные и со свободным зеркалом.

Учитывая все изложенное выше, мы будем пользоваться следующими схемами или типами подземных вод (и источников):

1) По глубине залегания:

а) выходы подземных вод — ключи;

б) неглубокие подземные воды (в среднем не глубже 50 *м*);

в) глубокие подземные воды (в среднем глубже 50 *м*).

2) По условиям выхода источников:

а) нисходящие;

б) восходящие.

3) По условиям залегания водоносного горизонта и путям движения воды в нем:

а) пластовые воды;

б) жильные воды (в трещинах и карстах).

4) По площади распространения:

а) водоносные горизонты с небольшой площадью распространения;

б) водоносные горизонты, имеющие обширное распространение.

5) По тектоническим условиям:

а) водоносные горизонты в условиях спокойного и слабо нарушенного залегания (преимущественно платформенные области и предгорья);

б) водоносные горизонты в условиях значительных тектонических нарушений (преимущественно горноскладчатые области).

6) По характеру пустот водоносных пород:

а) подземные воды, приуроченные к зернистым породам;

б) подземные воды, приуроченные к трещиноватым и карстовым породам.

7) По гидравлическим свойствам:

а) подземные воды со свободным зеркалом или безнапорные;

б) напорные подземные воды.

8) По генетическим типам водоносных пород:

а) подземные воды в аллювиальных отложениях (подрусловые воды);

б) „ „ в предгорных образованиях (конусы выноса, наклонные равнины);

в) „ „ во флювиогляциальных отложениях;

г) „ „ в коренных осадочных породах;

д) „ „ в коренных метаморфических и изверженных породах.

9) По климатическим признакам:

а) грунтовые воды областей избыточного и умеренного увлажнения;

б) грунтовые воды засушливых областей с пестрой минерализацией;

в) подземные воды вечной мерзлоты с делением их на надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные.

Приведенные подразделения подземных вод являются основными для наиболее часто встречающихся случаев использования подземных вод при водоснабжении.

Между выделенными группами подземных вод могут быть, конечно, и промежуточные. Кроме того, в отдельных случаях мы будем выделять самостоятельные группы подземных вод и по другим признакам.

### 3. Схемы определения ресурсов подземных вод

В соответствии с выделенными выше видами ресурсов подземных вод оценка их дается в основном для естественных условий и для условий режима, нарушенного при эксплоатации. Определение ресурсов подземных вод для естественных условий дается различными методами по расходу в поперечном сечении и по балансовым подсчетам.

Оценка эксплоатационных ресурсов подземных вод дается не только по методам определения естественных ресурсов, но также и по методам, основанным на косвенных показателях обеспеченности ресурсов, и по расчету водосборов.

Последние из этих методов позволяют с достаточной практической точностью оценивать эксплоатационные ресурсы для глубоких водоносных горизонтов, жильных подземных вод, водоносных горизонтов в трещиноватых и карстовых породах, а также в условиях значительных тектонических нарушений, т. е. в таких условиях, когда методика, применяемая при определении расхода в поперечном сечении и при балансовых подсчетах является обычно практически непригодной.

В качестве дополнительных методов к оценке эксплоатационных ресурсов дается методика определения вековых запасов и регулировочных ресурсов.

Для выходов подземных вод дается методика определения ресурсов нисходящих и восходящих ключей. При этом в основу методики оценки ресурсов нисходящих ключей кладется анализ изменчивости дебита по данным наблюдений за расходом ключа и сравнение с фактором, определяющим эту изменчивость. Оценка ресурсов восходящих ключей дается в основном по методу связи изменений дебита и понижения уровня с учетом, конечно, гидрогеологических условий. Для специфических условий вечной мерзлоты даются отдельные указания.

В настоящей работе рассматриваются ресурсы подземных вод для целей водоснабжения. Поэтому, кроме количественных

подсчетов ресурсов, дается оценка качества подземых вод. Следует иметь в виду, что гидрогеологические условия не только определяют выбор метода для указанной оценки, но по существу являются основой для оценки ресурсов.

## ГЛАВА II

# МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО РАСХОДА ПОДЗЕМНОГО ПОТОКА В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ

### 4. Расчет расхода по простым и уточненным формулам Дарси, Шези и Смрекера[1]

При равномерном движении в однородном водоносном пласте для определения расхода подземного потока следует применять формулы Дарси:

$$Q = KIF, \tag{1}$$

$$q = KIh, \tag{2}$$

где $Q$ — расход подземного потока;
$q$ — единичный расход подземного потока (на единицу ширины);
$K$ — коэфициент фильтрации;
$I$ — гидравлический уклон;
$F$ — площадь поперечного сечения подземного потока;
$h$ — мощность водоносного слоя.

Приведенные формулы справедливы для ламинарного движения. Если строение водоносного пласта несколько и неоднородно, то все же для расхода подземного потока можно применять формулы (1) и (2), когда коэфициент фильтрации определяется полевым методом по данным откачек из опытного гидрогеологического куста (опытная скважина с наблюдательными).

По данным проф. Г. Н. Каменского закон Дарси справедлив для действительных скоростей движения подземных вод в песчаных и обломочных породах приблизительно до 1 000 *м/сутки*. Скорости более нескольких метров в сутки в таких породах встречаются редко, а более десятков метров в сутки исключительно редко.

Кривые дебита при откачке из скважин в трещиноватых породах показывают прямолинейную зависимость дебита от понижения, т. е. в трещиноватых породах наблюдается часто

---

[1] Расчеты расхода подземного потока по формулам Дарси и Смрекера приводятся для схематизированных случаев; так как методы расчета расхода подземного потока для более сложных случаев в практике водоснабжения используются очень редко, то в инструкции такие случаи не излагаются. Ознакомиться с этими методами можно в книге проф. Г. Н. Каменского *[7]*.

также ламинарное движение. Это положение подтверждается и лабораторными исследованиями И. Ф. Володько (ВСЕГИНГЕО).

Таким образом для расчета расхода подземного потока формула Дарси может быть применена в большинстве случаев как для песчаных и обломочных пород, так и для трещиноватых.

Для турбулентного движения, по Краснопольскому, формула для расчета единичного расхода потока имеет (по Шези) следующий вид:

$$q = KJ^{n}h. \tag{3}$$

Для смешанного типа движения единичный расход потока по Смрекеру определяется уравнением

$$q = \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{1}{m}} I^{\frac{1}{m}} h, \tag{4}$$

где $m$ — величина, зависящая от скорости движения воды и свойств грунта, изменяющаяся от 1 до 2;

$C$ — коэфициент, зависящий от свойств грунта.

При наклонном водоносном пласте формула Дарси для единичного расхода подземного потока получит вид:

$$q = KIh\cos\alpha, \tag{5}$$

где $\alpha$ — угол наклона водоносного пласта к горизонту.

Формулу (5) следует применять при сравнительно крутом уклоне пласта, т. е. при $\alpha > 10°$, так как при меньших наклонах водоносного пласта к горизонту, ошибка по формулам (1) и (2) получается не больше 2%.

Для неравномерного движения подземных вод, при переменной мощности водоносного слоя, единичный расход подземного потока можно определить по формуле.

$$q = KI\frac{h_1 + h_2}{2}, \tag{6}$$

где $h_1$ и $h_2$ — мощности водоносного слоя, между которыми взят гидравлический уклон.

Более точно для неравномерного движения в наклонных пластах расход грунтового потока можно определить по уравнению акад. Н. Н. Павловского

$$q = KIh_0, \tag{7}$$

где $h_0$ — по Н. Н. Павловскому нормальная или по Г. Н. Каменскому приведенная глубина (мощность) [1].

---

[1] Таблицы для подсчета по формуле (8) приведены в книгах акад. Н. Н. Павловского *[11]* и проф. Г. Н. Каменского *[7]*.

При неоднородном слоистом строении водоносного слоя в формулы вводится средневзвешенный коэфициент фильтрации.

Для встречающегося часто случая изменения коэфициента фильтрации по глубине средневзвешенная величина его $K_0$ определяется по формуле

$$K_0 = \frac{K_1 h_1 + K_2 h_2 + K_3 h_3 + \cdots\cdots\cdots}{h_1 + h_2 + h_3 + \cdots\cdots}, \qquad (8)$$

где $K_1$, $K_2$ $K_3 \cdots$ коэфициенты фильтрации на соответствующих глубинах $h_1$, $h_2$, $h_3 \cdots$ [1]

Для определения расхода подземного потока в его поперечном сечении по формуле Дарси-Дюпюи необходимо получить элементы, входящие в состав этой формулы $K_1$, $I_1$, $h$ и $B$ (ширина подземного потока).

Для этого по выбранному створу поперечного сечения потока (по гидроизогипсе) распределяются опытно-разведочные узлы. По методу Тима эти узлы состоят из трех скважин (или шурфов), расположенных по вершинам треугольника. По наиболее распространенному у нас способу распределения скважин опытные узлы состоят из центральной скважины и нескольких наблюдательных, расположенных по двум — четырем лучам; определение коэфициента фильтрации делается в этих случаях по данным опытных откачек.

Расчет коэфициента фильтрации, по данным откачек, в методе Тима производится по двум скважинам, в которые входит и центральная; это часто влечет за собой ошибки в определении $K$ (преуменьшение его величины); несколько улучшает положение применение метода Люмерта для наблюдений уровня воды в затрубной части центральной скважины.

Устройство опытных узлов при глубоких водоносных горизонтах стоит дорого, и поэтому в таких случаях ограничиваются одной центральной скважиной, по которой определяются $h$ и $K$ ($K$ — лабораторным методом); определение уклона производится в последнем случае не для каждого узла, а для нескольких или даже для всего поперечного сечения; с этой целью выше или ниже створа закладывается одна или несколько скважин, которые совместно со скважинами в створе и дают возможность определять гидравлический уклон.

Определение коэфициента фильтрации, по данным лабораторных исследований, часто дает значительную ошибку, которая зависит в основном от изменения состава и структуры породы при взятии пробы, а также и от известной случайности места взятия пробы.

Однако при тщательном послойном определении лабораторным методом коэфициента фильтрации песков и гравелистых отложений (бесструктурных) результаты получаются достаточно точные. Особенно целесообразно использование ряда лабораторных определений коэфициентов фильтрации при небольшом ко-

личестве данных по методу откачек; в этом случае можно сопоставлять лабораторные определения с данными, полученными по методу откачек.

Подсчет расхода подземного потока на ширине B по опытным узлам можно производить, пользуясь методами, применяемыми в гидрологии и, в частности, аналитическим (упрощенным) методом.

Схема элементов для определения расхода подземного потока приведена на рис. 1.

Сначала в каждом узле мы определяем скорость фильтрации $v_i$ по формуле

$$v_i = KI. \tag{9}$$

Затем определяем средние скорости $v_{i\,cp}$ между опытными разведочными узлами по формуле

$$v_{i\,cp} = \frac{v_{i-1} + v_i}{2}. \tag{10}$$

Для крайних сечений $\omega_1$ и $\omega_{n+1}$ примем, что $v_{i\,cp} = v_1$ и $v_{n+i\,cp} = v_n$. Далее определим площади поперечного сечения между

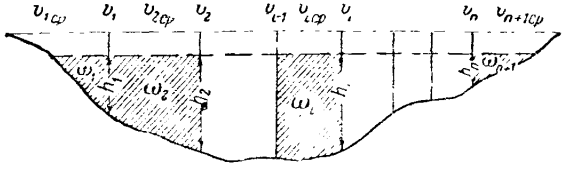



Рис. 1. Схема элементов для определения расхода подземного потока по формуле Дарси.

$v$ — скорости фильтрации; $h$ — мощности водоносного слоя; $\omega$ — площади поперечных сечений.

узлами $\omega_i$ и расходы между ними; последние будем называть элементарными расходами $Q_i$

$$Q_i = v_{i\,cp}\omega_i. \tag{11}$$

Тогда расход потока может быть определен по формуле

$$Q = \Sigma Q_i. \tag{12}$$

При выборе поперечного створа следует учитывать влияние участков инфильтрации в водоносный горизонт и дренирования, так как на этих участках обычно наблюдаются наибольшие изменения гидравлического уклона и мощности водоносного горизонта.

Необходимо отметить, что надежный подсчет расхода подземного потока по формуле Дарси-Дюпюи требует определения коэфициента фильтрации способом откачки и сравнительно частого распределения опытных узлов, например, для аллювиальных и флювиогляциальных отложений в среднем через 50—500 *м*.

## 5. Расчет расхода по действительной скорости

Определение расхода подземного потока по действительной скорости можно делать по формулам

$$Q = v_{\partial} \varphi F \tag{13}$$

и

$$q = v_{\partial} \varphi h, \tag{14}$$

где $Q$ — расход потока;
$v_{\partial}$ — действительная скорость движения подземных вод;
$F$ — площадь поперечного сечения подземного потока;
$q$ — единичный расход (на 1 *м* ширины потока);
$h$ — мощность водоносного слоя, и
$\varphi$ — коэфициент фильтрующего сечения.

По данным Г. Н. Каменского [7], для получения средней скорости коэфициент фильтрующего сечения следует принимать равным пористости, а время прохождения индикатора при полевых опытах — соответствующим максимуму концентрации в контрольной выработке.

Определение действительной скорости подземного потока дает надежные результаты в однородной толще, при тщательном выполнении опыта без изменения гидравлических уклонов (во время опыта) и при не очень малых скоростях — не меньше 0,2—0,5 *м/сутки*.

Подсчет расхода подземного потока в поперечном его сечении можно делать аналогично подсчету, приведенному для формулы Дарси-Дюпюи.

Получив скорости в каждом опытном узле, определяем средние действительные скорости между опытно-разведочными узлами

$$v_{\partial cp} = \frac{v_{\partial\,(i-1)} + v_{\partial i}}{2}. \tag{15}$$

Средние коэфициенты фильтрующего сечения определяются по формуле

$$\varphi = \frac{\varphi_{i-1} + \varphi_i}{2}. \tag{16}$$

Для крайних сечений $\omega$ и $\omega_{n+1}$ примем, что средние действительные скорости

$$v_{1cp} = v_1 \quad \text{и} \quad v_{(n+1)\,cp} = v_n$$

и средние коэфициенты фильтрующего слоя

$$\varphi_{1cp} = \varphi_1 \quad \text{и} \quad \varphi_{(n+1)\,cp} = \varphi_n.$$

Далее определяются площади поперечного сечения между опытно-разведочными узлами. Затем по формуле

$$Q_i = v_{\partial i\,cp} \cdot \varphi_i \cdot \omega_i \tag{17}$$

определяются расходы между узлами; эти расходы будем называть элементарными расходами.

Расход потока определяется по формуле

$$Q = \Sigma Q_i. \qquad (12)$$

Определение расхода подземного потока по действительной скорости можно рекомендовать для неглубоких подземных вод при однородном строении водоносной толщи по высоте.

### 6. Расчет расхода по радиусу влияния колодца

Для определения расхода подземного потока по радиусу влияния колодца предлагается формула

$$Q = Be\frac{Q_k}{2R}, \qquad (18)$$

где $Q$ — расход потока;
$B$ — ширина поперечного сечения;
$Q_k$ — дебит колодца;
$R$ — радиус влияния колодца при дебите $Q_k$;
$e$ — поправочный коэфициент, который по эмпирическим данным Н. А. Плотникова следует принимать равным от двух до четырех, в среднем трем [1].

Формулу (18) можно применять для ориентировочных подсчетов.

### 7. Расчет расхода по способу проф. Малишевского

Единичный расход подземного потока по способу Малишевского определяется по формуле.

$$q = \frac{Q_1 + Q_2}{2L}, \qquad (19)$$

где $q$ — единичный расход потока;
$Q_1$ — расход первого колодца;
$Q_2$ — расход второго колодца;
$L$ — расстояние между первым и вторым колодцем.

Этот способ основывается на наблюдениях за изменением дебита по кривой дебита при одиночных откачках и одновременной откачке из двух скважин.

„Пока полосы питания, — пишет Малишевский — не захватывают одна другую, дебиты колодцев будут соответствовать кривым дебита, составленным для каждого колодца порознь. Когда же их подача начнет отставать от понижения, это значит, что полосы питания вошли одна в другую и, таким образом, взаимно уменьшают подачу воды колодцами" *[10]*.

Подсчет расхода подземного потока по способу проф. Малишевского в ряде случаев давал значительные ошибки.

---

[1] Плотников Н. А. Методика подсчета ресурсов подземных вод ВСЕГИНГЕО, 1940.

В способе проф. Малишевского не учитывается развитие местных депрессионных воронок, которые в ряде мест имеют значительную величину — до 20 *м* и больше. Затем трудно себе представить, чтобы влияние при первых откачках не сказывалось на уменьшении дебита скважин до момента пересечения зон питания. При своих опытах с парными откачками из юрских скважин УССР проф. Н. Г. Малишевский не получил уменьшения дебита. Расстояние между скважинами было 157 *м*; дебит из одной скважины был 1436 *м*³/*сутки* при понижении уровня $S = 3{,}66$ *м* и из другой скважины — до 1610 *м*³/*сутки* при $S \sim 9$ *м*.

Способ проф. Малишевского является теоретически не обоснованным, с чем согласен и проф. Шелкачев. Таким образом этот способ применять не рекомендуется.

## 8. Расчет расхода по полосе питания колодца путем построения гидроизогипс

Расчет единичного расхода подземного потока по полосе питания колодца производится по формуле

$$q = \frac{Q_k}{E}, \qquad (20)$$

где $q$ — единичный расход потока;
$Q_k$ — дебит колодца, соответствующий ширине зоны питания,
$E$ — ширина зоны питания (рис. 2).

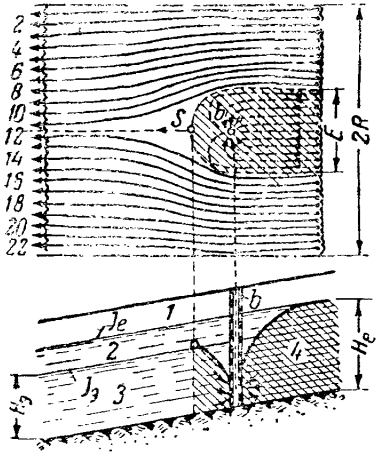



Рис. 2. Схема режима колодца в грунтовом потоке.

*1* — естественный уровень воды; *2* — пониженный уровень; *3* — проходящий поток; *4* — зона питания; $E$ — полоса зоны питания; $2R$ — ширина зоны питания; $S$ — водораздел грунтовых вод ниже колодца по потоку.

Определение ширины зоны питания производится при этом способе следующим путем.

Сначала строится карта гидроизогипс по наблюдательным точкам. Затем по карте гидроизогипс выделяется зона питания, границы которой проводятся нормально к гидроизогипсам. Внутри зоны питания все токи воды попадают в колодец. Из области, лежащей вне зоны питания, указанные токи в колодец не попадают.

На рис. 3 показан пример определения по наблюдательным шурфам ширины зоны питания $E$.

Следует отметить, что для построения надежной карты гидроизогипс необходимо большое количество наблюдательных точек. Поэтому метод определения расхода по полосе питания

колодца может быть применен лишь для неглубоких подземных вод; для глубоких подземных вод этот метод будет дорог.

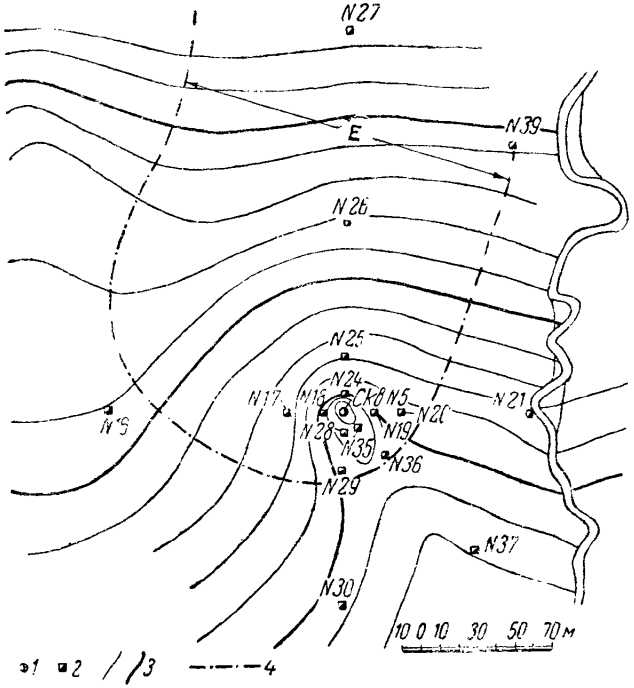



Рис. 3. Определение ширины зоны питания колодца путем построения гидроизогипс (по данным изысканий для водоснабжения одного из городов в 1937—1938 гг.), сечение гидроизогипс через 0,1 *м*.

*1*—буровая скважина; *2*—шурфы; *3*—гидроизогипсы; *4*—граница захватной зоны; *E*—ширина захватной зоны питания.

## 9. Расчет расхода подземного потока по методу пьезометрии

Расчет расхода подземного потока по методу пьезометрии производится по уравнению

$$Q = \alpha I, \tag{21}$$

где $Q$ — расход подземного потока;

$I$ — гидравлический уклон между двумя наблюдательными створами, расположенными нормально потоку;

$\alpha$ — водопроводимость, которая равна $K_{ср}$ и $F_{ср}$,

где $K_{ср}$ — средний коэфициент фильтрации и

$F_{ср}$ — средняя площадь поперечного сечения между двумя створами.

Для определения водопроводимости $\alpha$ закладывается нормально к оси потока створ $D$ опытных или эксплоатационных скважин (рис. 4).

Ниже створа $D$ опытных или эксплоатационных скважин по оси потока закладываются две (лучше до четырех) наблюдательные скважины по створу $1—2$ для изучения режима уровней воды. Выше створа $D$ по створу $3—4$ также закладываются две (или лучше до четырех) наблюдательные скважины для получения данных об уровнях. Расстояние между скважинами в створах $1—2$ и $3—4$ (по оси потока) берется 250 до 1000 *м*. Ближайшие скважины должны быть удалены от створа $D$ на расстояние, где в поперечном сечении потока отметки уровней воды будут одинаковы, т. е. на расстояние, равное примерно ширине подземного потока. Из створа $D$ производится откачка с двумя производительностями $Q_I$ и $Q_{II}$. Каждая откачка ведется до установившегося динамического равновесия, т. е. когда уровни воды, а следовательно, и гидравлические уклоны в створах остаются неизменным минимумом в течение суток.

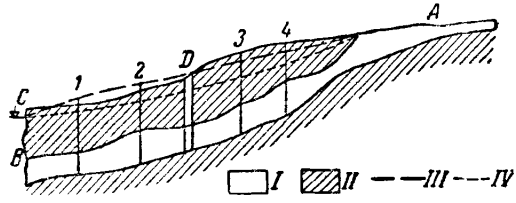



**Рис. 4. Схема откачки из напорного подземного потока ограниченной ширины.**

*I*—водоносные породы; *II*—водоипроницаемые породы; *III* — статический уровень до эксплоатации; *IV*—статический уровень при откачке из водосбора; *A*—область питания водоносного горизонта; *B*—область дренирования водоносного горизонта; *C*—отметка уровня подземных вод в области дренирования; *D*—опытные или эксплоатационные скважины; *1, 2, 3, 4*—наблюдательные скважины.

Производительность $Q_{II}$ желательно получать не менее чем в два раза большую сравнительно с производительностью $Q_I$, а $Q_I$ — не менее $^1/_{10}$ от предполагаемого расхода подземного потока. Во время откачки наблюдаются уровни воды в верхнем и нижнем створах. Это дает возможность определить гидравлические уклоны при откачке с дебитом $Q_I$, причем для верхнего створа мы получим гидравлический уклон $I'_в$ и для нижнего створа $I'_н$; при откачке с дебитом $Q_{II}$ соответственно получим для верхнего створа гидравлический уклон $I''_в$ и для нижнего створа — $I''_н$.

Водопроводимость для верхнего створа $\alpha_в$ определяется по формуле

$$\alpha_н = \frac{Q_{II} I'_н - Q_I I''_н}{I''_в I'_н - I'_в I''_н} \qquad (22)$$

и для нижнего створа по формуле

$$\alpha_в = \frac{Q_{II} I'_в - Q_I I''_в}{I''_в I'_н - I'_в I''_н} \qquad (23)$$

Если, кроме периода откачек из створа $D$, наблюдения за уровнями в верхнем и нижнем створах велись и в другие периоды (без откачек) при минимальных и максимальных гидравлических уклонах, то по формуле (21) можно подсчитать минимальные и максимальные естественные расходы подземного потока.

Если нет подпитывания между верхним и нижним створами, то естественный расход в верхнем створе должен равняться естественному расходу в нижнем створе, если же из створа производилась откачка, то расход подземного потока в верхнем створе должен равняться сумме расхода потока в нижнем створе и количества воды, откачиваемой из створа $D$.

Этот метод применим для подземных потоков ограниченной ширины — порядка до нескольких километров; при этом на участках между верхним и нижним створами не должно быть подпитывания водоносного горизонта или же это подпитывание должно учитываться.

## 10. Оценка производительности подземного потока по способу удельного дебита

Способ „удельных дебитов" водоносного пласта, предложенный Тимом [*16*], заключается в оценке водопроводимости пласта по удельному дебиту скважин.

Производительность $Q$ водоносного горизонта интересующего нас участка $A$ определяется при этом способе путем сравнения соответствующих данных с данными другого участка $Б$, где подсчитана или известна его производительность $Q_i$, по формуле

$$Q = Q_1 \frac{q}{q_1} \cdot \frac{IF}{I_1F_1}, \tag{24}$$

где $Q$ — искомая производительность участка $A$;
$q$ — удельный дебит скважины участка $A$;
$q_1$ — „ „ „ „ $Б$;
$I$ — гидравлический уклон подземного потока на участке $A$;
$I_1$ — „ „ „ „ „ „ $Б$;
$F$ — площадь поперечного сечения на участке $A$ и
$F_1$ — „ „ „ „ $Б$.

По мнению Принца, такой способ вполне надежен для напорных вод, так как в этом случае имеется прямая пропорциональность между дебитом и понижением уровня и разница в величине удельных дебитов при различных понижениях будет невелика.

Подсчет по формуле (24) Тима может дать грубые ошибки, так как фактическая замена коэфициента фильтрации $K$ удельным дебитом $q$ является теоретически и практически неверной. Поэтому более правильно пользоваться предложенной автором формулой,

$$Q = Q_1 \frac{q}{q_1} \cdot \frac{IB}{I_1B_1}, \tag{25}$$

где $B$ — ширина потока на участке $A$;

$B_1$ — ширина потока на участке $Б$;

остальные обозначения даны к формуле (24).

При оценке производительности водоносного пласта по формуле (25) необходимо удельный дебит получать по данным откачек из скважин одного диаметра, длины и конструкции, а также при одинаковых (или близких между собой) понижениях уровня воды; последнее особенно важно для подземных вод со свободным зеркалом при небольшой мощности водоносного пласта. Если откачка производится из колодца с фильтром Люмерта (с зафильтровой наблюдательной трубкой), то в этом случае исключаются гидравлические сопротивления при входе в фильтр и в колодце; тогда можно сравнивать данные откачек из фильтров разной конструкции. При сильной изменчивости водопроницаемости пласта метод удельных дебитов даст случайные результаты, так как на величину удельного дебита особенно сильно влияет водопроницаемость непосредственно около колодца.

Учитывая все изложенное, метод удельных дебитов можно рекомендовать для приближенной оценки производительности подземного пласта по формуле (25).

## 11. Изменение расхода подземного потока во времени

Величина расхода подземного потока в одном и том же поперечном сечении может изменяться как по сезонам, так и по отдельным годам. Это зависит в основном от изменения гидравлических уклонов, а следовательно, — и скоростей движения воды.

Кроме того, для вод со свободным зеркалом изменяется также и мощность водоносного слоя. В результате изменяется расход подземного потока.

Таким образом, для определения колебаний расхода подземного потока необходимо иметь данные наблюдений за режимом изменения уровней, гидравлических уклонов, а в некоторых случаях и скоростей. По этим данным производятся подсчеты расходов подземного потока. При постоянном поперечном сечении и ламинарном движении изменение расходов прямо пропорционально гидравлическим уклонам.

Тогда, если $Q_{max}$ — искомый наибольший расход при максимальном гидравлическом уклоне $I_{max}$ и $Q$ — известный расход при гидравлическом уклоне $I$, то

$$Q_{max} = Q \frac{I_{max}}{I}. \qquad (26)$$

## 12. Сравнительная оценка методов определения естественного расхода подземного потока в поперечном сечении

1) Расчет расхода по простым и уточненным формулам Дарси, Шези и Смрекера, и по полосе питания колодца путем

построения гидроизогипс следует применять, как правило, для неглубоких водоносных горизонтов.

Расчет расхода глубоких подземных потоков по этим методам (формулам), при малом количестве разведочных, опытных и наблюдательных скважин, является недостаточно точным.

2) Расчет расхода подземного потока по действительной скорости можно применять для неглубоких водоносных горизонтов, приуроченных к сравнительно однородным рыхлым породам.

3) Метод подсчета расхода подземного потока по радиусу влияния можно применять для ориентировочных подсчетов.

4) Расчет расхода подземного потока по методу Малишевского теоретически не обоснован. Метод проф. Малишевского применять не рекомендуется.

5) Расчет расхода подземного потока по методу пьезометрии может быть применен для неглубоких подземных потоков сравнительно небольшого поперечного сечения (шириной до нескольких километров).

6) Определение ресурсов подземных вод по способу удельного дебита может применяться для приближенных расчетов как неглубоких, так и глубоких подземных вод.

## ГЛАВА III

# МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ПО БАЛАНСОВЫМ ПОДСЧЕТАМ

### 13. Определение ресурсов по детальным балансовым подсчетам

Рассмотрим баланс отдельного участка водоносного горизонта за некоторый отрезок времени.

Приход воды может быть за счет следующих элементов:

1) поступление из других участков того же водоносного горизонта $W_{\text{I}}$;

2) поступление из других водоносных горизонтов $W_{\text{I}\partial}$;

3) поступление из зоны аэрации $Z_{\text{II}z}$;

4) поступление непосредственно из поверхностных вод $Y_{\text{II}n}$;

5) поступление из запасов подземных вод $W_{\text{I}з}$ (например понижение уровня воды для подземных вод со свободным зеркалом).

Расход воды из водоносного горизонта может происходить за счет следующих элементов:

1) расход на другие участки того же водоносного горизонта $W_{\text{II}}$;

2) расход в другие водоносные горизонты $W_{\text{II}\partial}$;

3) расход в зону аэрации $W_{\text{II}a}$;

4) расход на транспирацию растений $W_{\text{II}m}$;

5) расход открытыми ключами $W_{\text{II}ok}$;

6) расход подводными ключами $W_{\text{II}nk}$;

7) количество воды, ушедшее в запас подземных вод $W_{\text{Пз}}$ (например повышение уровня воды для подземных вод со свободным зеркалом).

Изменения в балансе воды за счет химических и других процессов на участке водоносного горизонта не учитываются, так как они относительно ничтожны.

Разность между количеством воды, ушедшей в запас подземных вод и водой, поступившей из их запасов, дает изменение запаса на отдельном участке за определенный период времени. т. е. $W_{\text{Пэ}} - W_{\text{Iэ}}$; назовем эту разность через $\varphi h$,

где $h$ — высота изменения слоя подземных вод и

$\varphi$ — коэфициент пористости.

Тогда

$$W_{\text{Пэ}} - W_{\text{Iэ}} = \varphi_h = (W_{\text{I}} + W_{\text{Iд}} + Z_{\text{Пг}} + Y_{\text{Пп}}) - (W_{\text{П}} + W_{\text{Пд}} + W_{\text{Па}} + W_{\text{Пт}} + W_{\text{Пок}} + W_{\text{Ппк}}) \quad (27)$$

Уравнение (27) перепишем так:

$$W_{\text{Пэ}} - W_{\text{Iэ}} = \varphi h = \underbrace{[(W_{\text{I}} + W_{\text{Iд}}) - (W_{\text{П}} + W_{\text{Пд}})]}_{\text{член I}} + \underbrace{[(Z_{\text{Пг}} - W_{\text{Па}}) - W_{\text{Пт}}]}_{\text{член II}} + \underbrace{[Y_{\text{Пп}} - (W_{\text{Пок}} + W_{\text{Ппк}})]}_{\text{член III}} \quad (28)$$

В правой части последнего балансового уравнения (28) член I определяется путем подсчетов расхода подземного потока по границам участка, член II — по балансу зоны аэрации, т. е. по ниже приводимой формуле (29), с учетом транспирации растений ($W_{\text{Пт}}$) и член III чаще гидрометрическим методом (если это конечно возможно) или по балансу поверхностных вод, т. е. по ниже приводимой формуле (30).

Баланс влагооборота на участке в зоне аэрации складывается из следующих элементов:

Приход:

поступление из грунтовых вод $W_{\text{Па}}$;
поступление из выпавших атмосферных осадков $X_a$;
поступление в результате конденсации из атмосферы $Z_{\text{Im}}$;
поступление из запасов воды (снег, лед) на поверхности земли $\xi X_{\text{Iз}}$;
поступление из запасов в зоне аэрации $Z_{\text{I}}$.

Расход:

на питание грунтовых вод $Z_{\text{Пг}}$;
на испарение и транспирацию растений $Z_{\text{Пит}}$;
количество воды, ушедшее в запас зоны аэрации $Z_{\text{П}}$.

Разность между количеством воды, ушедшей в запас зоны аэрации, и воды, поступившей из ее запасов на отдельном участке, дает изменение запаса в зоне аэрации $Z_{\text{П}} - Z_{\text{I}}$.

Баланс для поверхностных вод составится из следующих элементов:

Приход:

приток открытыми водотоками $Y_{\text{I}}$;
поступление из подземных вод открытыми ключами $W_{ок}$;
поступление из подземных вод подводными ключами $W_{\text{II}пк}$;
поступление из выпавших атмосферных осадков (сток с поверхности земли и осадки на участок поверхностных вод) $X_n$;
поступление из запасов воды (снег, лед) на поверхность земли $\psi x_{\text{I}з}$;
поступление из запасов поверхностных вод $Y_{\text{I}з}$.
Конденсация не учитывается отдельно, она суммарно включена в испарение.

Расход:

поверхностный сток за границы участка $Y_{\text{II}}$;
поступление в подземные воды $Y_{\text{II}п}$;
испарение $Y_{\text{II}и}$;
количество воды, ушедшее в запас поверхностных вод $Y_{\text{II}з}$;
разница между количеством воды, ушедшей в запас поверхностных вод, и воды, поступившей из запасов, дает изменение запасов поверхностных вод $Y_{\text{II}} - Y_{\text{I}}$.

При оценке баланса зоны аэрации и поверхностных вод следует учитывать баланс осадков, который можно представить в следующем виде:

Поступление:

выпадение осадков на поверхности $X$;
поступление воды из запасов на поверхности $X_{\text{I}з}$.

Расход:

просачивание в зону аэрации $X_a$;
сток в поверхностные воды $X_n$;
испарение $X_u$;
расход воды в запас на поверхности $X_{\text{II}з}$.

Разница между количеством воды, ушедшей в запас на поверхности и поступившей из запаса на поверхности, дает изменение запасов осадков на поверхности земли $X_{\text{II}з} - X_{\text{I}з}$.

Поступление из зоны аэрации в подземные воды за вычетом расхода в зону аэрации и определится уравнением:

$$Z_{\text{II}г} - W_{\text{II}a} = (X_a + Z_{\text{I}m} + \xi X_{\text{I}з} + Z_{\text{I}} - (Z_{\text{II}} + Z_{\text{II}m})). \qquad (29)$$

При положительном значении $Z_{\text{II}г} - W_{\text{II}a}$ мы будем иметь поступление в подземные воды и при отрицательном, наоборот, — расход из подземных вод.

Поступление из поверхностных вод в подземные воды за вычетом расхода открытыми и подводными ключами определится уравнением

$$Y_{\text{Пп}}-(W_{\text{Пок}}+W_{\text{Ппк}})=(Y_{\text{I}}+X_{n}+\psi X_{\text{Из}}+Y_{\text{Из}})-(Y_{\text{II}}+Y_{\text{Пи}}+Y_{\text{Пз}}) \quad (30)$$

При положении подземных вод ниже корневой системы растений $W_{\text{П}m}$ (расход на транспирацию растений) равен нулю. В этом случае $Z_{\text{Пг}}-W_{\text{Па}}$ определить легче. Кроме использования уравнения (29) для вычисления $Z_{\text{Пг}}-W_{\text{Па}}$ можно применить также приближенный подсчет, основанный на определении $\varphi h$; в этом случае наблюдения за изменением $\varphi h$ нужно вести в период, когда члены I и III уравнения (28) остаются постоянными (за этот период).

Уравнение (28) с учетом уравнений (29) и (30) дает возможность детально анализировать все три основных элемента влагооборота на участке подземных вод, а именно: 1) внутри одного водоносного горизонта и между водоносными горизонтами — член I правой части уравнения (28); 2) между подземными водами и зоной аэрации (член II уравнения (28), и 3) между подземными водами и поверхностными водами — член III уравнения (28).

Из практических соображений часто прибегают к упрощению подсчета элементов баланса, исключая те члены, которые мало влияют на точность.

Ниже приводится три отдельных примера подсчета баланса подземных вод.

### Баланс грунтовых вод в рыхлых отложениях замкнутой междугорной котловины Овенс (Owens)

США, Калифорния, по Г. М. Чарльзу

Главными источниками питания грунтовых вод является просачивание атмосферных осадков, а также воды речек, ручейков и ирригационной сети.

Расходными статьями баланса является испарение с водной поверхности и почвы и транспирация растений. В этой долине ясно прослеживается зона накопления грунтовых вод (в конусах выноса) и зона выклинивания, приуроченная к участкам смены крупногалечникового материала суглинками и глинами.

Элементы баланса получены следующие:

Приход:

| | | |
|---|---|---|
| 1) просачивание атмосферных осадков; из них 61% на прилегающих склонах долин, 30% на конусах выноса и 9% по долине, а всего . . . . . | 1,22 | $м^3/сек$ |
| 2) фильтрация из рек; 68% на конусах выноса, 32% в зоне неглубокого залегания, а всего . . | 2,23 | „ |
| 3) просачивание ирригационных вод . . . . . | 0,51 | „ |
| 4) просачивание из р. Овенс в периоды паводков | 0,23 | „ |
| Итого . . | 4,19 | $м^3/сек$ |

Расход:

| | |
|---|---|
| 1) испарение с почвы и транспирация растений с неорошаемых земель . . . . . | 3,02 *м³/сек* |
| 2) то же с орошаемых земель . . . . . | 0,51 „ |
| 3) испарение с водной поверхности родниковых ручейков и озер . . . . . | 0,43 „ |
| 4) выклинивание в русло р. Овенс . . . . . | 0,40 „ |
| Итого . . | 4,36 *м³/сек* |

Разница получается в 0,17 *м³/сек* или около 4%.

Точность — высокая.

При подсчетах баланса котловины р. Овенс левый член уравнения (28) $\varphi h$ принят равным нулю.

Приняты равными нулю также $W_{I\partial}$, $W_{II}$, $W_{II\partial}$[1].

$$W_I = 1{,}22 \times 0{,}61 = 0{,}74 \ м^3/сек.$$

Член II правой части уравнения (28)

$$[(Z_{II_2} - W_{II_a}) - W_{II_m}] = 1{,}22 \times 0{,}39 - (3{,}02 + 0{,}51) = -3{,}05 \ м^3/сек,$$

и

член III указанного уравнения $X_{II_n} - (W_{II_{ok}} + W_{II_{nk}}) = (2{,}23 + 0{,}51 + 0{,}23) - (0{,}43 + 0{,}40) = +2{,}14 \ м^3/сек.$

В итоге получается $0{,}74 - 3{,}05 + 2{,}14 = -0{,}17 \ м^3/сек.$

Эта цифра была указана раньше.

**Баланс подземных вод в одной из равнин юга СССР, по данным Н. К. Игнатовича**

Элементы баланса по трехлетним данным получены следующие:

Приход:

| | |
|---|---|
| 1) суммарный средний расход речек горной зоны, которые поступают в равнину . . . . . | 20,7 *м³/сек* |
| 2) в пределах равнины разность между осадками (470 *мм*) и испарением (385 *мм*), т. е. сток и инфильтрация . . . . . | 3,2 „ |
| Итого | 23,9 *м³/сек* |

Расход:

| | |
|---|---|
| 1) потери на испарение с открытой водной поверхности речек, арыков и проч. в пределах равнины . . . . . | 2,6 *м³/сек* |
| 2) поверхностный сток из пределов равнины | 11,8 „ |
| 3) родниковый сток из пределов нижней части равнины . . . . . | 2,5 „ |
| 4) потери на испарение с почвы и на транспирацию растений в пределах родниковой зоны равнины . . . . . | 3,8 — 4,0 „ |
| Итого | 20,7 — 20,9 *м³/сек* |

[1] Так как котловина замкнутая.

Следовательно, на подземный сток из пределов равнины остается 23,9 — (от 20,7 до 20,9) = 3,0 до 3,2 *м³/сек*.

Из приведенных ниже данных Н. К. Игнатович делает вывод, что гарантированными эксплоатационными ресурсами являются 2,5 *м³/сек* родникового стока. Кроме того, могут быть использованы подземные воды в результате снижения потерь за счет испарения с почвы и за счет уменьшения транспираций растений.

Рассматривая по уравнению (28) баланс подземных вод равнины, получим, что левый член принят равным нулю. В правой части уравнения равными нулю приняты:

$$W_I,\ W_{Iд}{}^1,\ W_{IIд}{}^2.$$

Остальные члены уравнения определяются так:

$$W_{IIг} + W_{IIт} = 3{,}8 - 4{,}0\ м^3/сек \text{ (теоретически)};$$

$$W_{II\,ок} = 2{,}5\ м^3/сек.$$

$$Z_{IIг} + (Y_{II_1}\ W_{II\,пк}) = 3{,}2 + (20{,}7 - 11{,}8) - 2{,}6 = 9{,}5\ м^3/сек.$$

В итоге $W_{II} = 9{,}5 - 4{,}0\ (3{,}8) - 2{,}5 = 3{,}0\ (3{,}2)\ м^3/сек.$

**Баланс подземчых вод в районе конуса выноса Узбекская ССР, по данным М. А. Шмидта**

Элементы баланса получены по схеме, указанной для данных Овенс; они приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Месяцы | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | За год в среднем |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Питание подземных вод в зоне поглощения, *м³/сек* | 6,58 | 4,79 | 4,34 | 9,08 | 9,40 | 49,50 | 73,25 | 79,05 | 43,16 | 8,11 | 5,60 | 8,13 | 25,1 |
| Выклинивание (сток) подземных вод, *м³/сек* | 28,3 | 31,5 | 33,28 | 27,25 | 16,19 | 12,37 | 10,60 | 10,84 | 14,98 | 21,11 | 28,6 | 32,77 | 22,3 |

В этом примере было принято, что подземный приток к конусу выноса из высокогорной части бассейна практически отсутствует, а подземный сток за пределы зоны выклинивания практически ничтожен.

[1] Так как подземные воды формируются в пределах долины.

[2] Так как расхода в другие горизонты нет.

При таких допущениях разница между приходом и расходом за год получилась $25{,}1 - 22{,}3 = 2{,}8$ *м*³/*сек*, т. е. около 12%.

Из приведенных примеров видно, что балансовые подсчеты практически делаются приближенно, чаще определяются элементы из уравнения (28) и значительно реже анализируют балансы с учетом уравнений (29) и (30).

## 14. Определение ресурсов по инфильтрации

При расчетах ресурсов водоносного горизонта по инфильтрации определяют в зависимости от гидрогеологических условий или просачивание атмосферных осадков или инфильтрацию из реки (ручья) или оба эти источника питания одновременно.

Расчет инфильтрации атмосферных осадков производится по формуле

$$Q = 1000\ MaF, \tag{31}$$

где $Q$ — количество просочившейся воды в *м*³/*год*;

$M$ — количество осадков, выпавших за год, *мм*;

$a$ — коэфициент просачивания;

$F$ — площадь области питания, *км*².

Количество выпавших осадков определяется по метеорологическим наблюдениям.

Произведение $Ma$ — это количество осадков, просочившихся за год. Точное определение $Ma$ или $a$ является весьма трудной задачей.

По данным Н. Н. Биндемана $a$ для песчано-глинистых грунтов можно принять за 0,3. Но наши исследования (с использованием ряда материалов) показывают значительное колебание $a$ для различных условий, а именно от 0,1 до 0,9.

Ввиду весьма больших затруднений в определении коэфициента просачивания $a$ и его значительной амплитуды колебаний, метод подсчета ресурсов подземных вод по инфильтрации атмосферных осадков может быть применен в весьма редких случаях.

Расчет инфильтрации из поверхностных вод реки (ручья) производится по формуле

$$Q = Q_1 - Q_2, \tag{32}$$

где $Q$ — количество воды, просочившейся в водоносный горизонт;

$Q_1$ — расход реки до области инфильтрации;

$Q_2$ — расход реки ниже по течению от области инфильтрации.

При ясных гидрогеологических условиях питания водоносного горизонта из реки и при инфильтрации от расхода $\left(\frac{Q}{Q_1}\,100\right)$ не менее 5—10% точность подсчета получается практически приемлемой; чем больше процент инфильтрации $\left(\frac{Q}{Q_1}100\right)$, тем выше точность подсчета инфильтрации.

## 15. Определение ресурсов по дебиту ключей и по поверхностному стоку

В некоторых районах, в частности в горных, потоки подземных вод иногда выходят полностью в виде сосредоточенных ключей. В этом случае производительность подземного потока определяется по дебиту ключей.

Нередко ключи выходят на значительных площадях в виде небольших, иногда почти незаметных, струй воды; затем эти мелкие струйки собираются и текут по оврагам. В этом случае определение расхода сводится к учету производительности ручейков и потерь (на фильтрацию, испарение и проч.) воды в этих ручейках; производительность ручейков следует определять с исключением поверхностного стока непосредственно от атмосферных осадков.

При отсутствии атмосферных осадков в жидком состоянии, питание значительного большинства равнинных рек происходит за счет подземных вод. Если на основании гидрогеологических данных выделить участок реки, на котором происходит дренирование водоносного горизонта (или его части), то по разности расходов в верхнем и нижнем створах указанного участка реки можно за указанный период (без поверхностного питания) определить производительность подземного потока (или его части).

При определении разности расхода реки по двум створам реки необходимо учитывать потери (испарение, фильтрацию, отбор из реки и проч., а также и точность гидрометрических измерений).

## 16. Определение ресурсов по коэфициенту и модулю подземного стока

При наличии данных о площади $F$ питания водоносного горизонта, подземного стока $Q_n$ и количества осадков $M$ можно воспользоваться характеристикой ресурсов по коэфициенту и модулю подземного стока. Коэфициент $a$ подземного стока по отношению к годовому количеству осадков определяется по формуле

$$a = 0{,}001 \frac{Q_n}{MF}, \qquad (33_1)$$

где $Q_n$ — подземный сток в $м^3/год$;

$M$ — осадки в $мм$ за год;

$F$ — площадь питания водоносного горизонта в $км^2$.

Модуль подземного стока $\mu$ можно вычислить по следующим формулам:

$$\mu = \frac{10^6 Ma}{365 \cdot 86\,400} = 0{,}0317\ Ma \qquad (33_2)$$

и

$$\mu = \frac{10^3 Q_n}{F \cdot 365 \cdot 86\,400} = 0{,}000032 \frac{Q_n}{F}, \qquad (33_3)$$

где $\mu$ — модуль подземного стока $л/сек \cdot км^2$.

Таблица 2

| № п/п | Местонахождение и описание пород водоносного горизонта | Модуль подземного стока *л/сек. км²* | Источник приведенных данных |
|---|---|---|---|
| 1 | Глинистый сланец, площадь питания в лесистой местности в Рейхенборге в Богемии . . . . . | 0,41—0,51 | По Принцу из Гюбера (Hüber) и Die kleinste Ergiebigkeit einiger Quelbäche. Mitt. Disch, Ing. in Mären, u. s. w., 1922 |
| 2 | Гранит, там же . . . . . | 0,10—3,52 | То же |
| 3 | Кристаллический известняк, там же . . | 7,03—7,15 | » |
| 4 | Гнейсовый слюдяной сланец, Карлсбад, Чехо-Словакия, в лесистой местности . | 1,05—2,59 | » |
| 5 | Гнейс, Германштадт. в лесистой местности . . . . . | 6,54—13,79 | |
| 6 | Гнейс, Германштадт, в местности со скудным лесом . . . . . | 3,11 | |

Остальные обозначения приведены ранее.

Для характеристики коэфициента $a$ и модуля $\mu$ подземного стока в табл. 2 приведен ряд примеров.

Данные табл. 2 можно использовать при оценке ресурсов подземных вод по аналогии.

По данным Н. С. Токарева следует, что коэфициент подземного стока при увеличении эффективного количества осадков уменьшается, а при уменьшении, наоборот, увеличивается. Такое явление отмечается и другими исследователями.

### 17. Сравнительная оценка методов определения естественных ресурсов водоносных горизонтов по балансовым подсчетам

Определение ресурсов по балансовым подсчетам обычно делается приближенно, так как практически все необходимые данные для детальных подсчетов получить не удается. Легче всего можно получить данные по инфильтрации и по стоку (расходы ключей и расходы рек, питающихся подземными водами), в соответствии с чем и производится определение ресурсов по инфильтрации, а также по дебиту ключей и по поверхностному стоку.

Методы определения по детальным балансовым подсчетам с учетом всех элементов баланса подземных вод могут применяться весьма редко, так как получение всех этих элементов полностью практически осуществить не удается. Несколько чаще из детальных балансовых подсчетов исключаются или принимаются ориентировочно отдельные элементы баланса, и тогда подсчет получает приближенный характер.

Методы балансовых подсчетов в большинстве случаев возможно применять для водоносных горизонтов небольшого распространения.

Расчеты ресурсов по этим методам могут применяться для подземных вод, приуроченных как к зернистым, так и к трещиноватым породам.

## ГЛАВА IV

## О ВЕКОВЫХ ЗАПАСАХ

### 18. Определение вековых запасов

В отдельных случаях можно допустить эксплоатацию водоносного горизонта с расходом, который не обеспечивается питанием. В этом случае из водоносного горизонта приходится отбирать количество воды $Q_\partial$ сверх той воды, которая обеспечена питанием. Назовем количество воды, обеспеченное питанием (с учетом

регулирующей емкости) $Q_e$, а количество воды, отбираемое из водоносного горизонта, $Q_э$. Тогда

$$Q_д = Q_э - Q_e. \tag{34}$$

Вековыми запасами мы называли количество гравитационной подземной воды в водоносном слое, заполненном водой ниже низкого горизонта грунтовых вод.

Эти запасы для напорных вод соответствуют полной мощности водоносного слоя и для подземных вод со свободным зеркалом — мощности водоносного слоя ниже самого низкого стояния уровня воды.

Таким образом отбор $Q_д$ будет вестись за счет вековых запасов и будет вызывать снижения уровней воды.

Подсчет общих вековых запасов водоносного горизонта можно производить по формуле

$$Q_w = \varphi w_з, \tag{35}$$

где $Q_w$ — запасы гравитационной воды;

$w_з$ — объем занимаемой водоносной толщей при самом низком уровне подземных вод;

$\varphi$ — коэфициент водоотдачи.

Определение коэфициента водоотдачи для зернистых рыхлых пород можно делать лабораторным методом.

Определение коэфициента водоотдачи рыхлых трещиноватых пород можно также делать в соответствующих условиях [1] по стоку из водоносного горизонта по формуле

$$\varphi = \frac{Q}{\Omega h_k}, \tag{36}$$

где $Q$ — количество воды, стекшей из водоносного горизонта;

$h_k$ — среднее понижение уровня воды за тот же период;

$\Omega$ — площадь распространения водоносного горизонта со свободным зеркалом.

Если $h_k$ в различных пунктах различно, то $\Omega$ разбивается на участки, и формула $\varphi = \frac{Q}{\Omega h_k}$ примет вид

$$\varphi = \frac{Q}{\Sigma \Omega h_к}. \tag{37}$$

При расчете на использование вековых запасов будет наблюдаться непрерывное снижение уровней. Это снижение на участках водоносного горизонта со свободным зеркалом вызовет уменьшение вековых запасов.

На участках же напорных вод уменьшения вековых запасов не будет до тех пор, пока уровень воды не понизится ниже кровли водоносного слоя. Отбор количества воды, не обеспечен-

[1] Когда не возникает особых затруднений в определении других элементов прихода и расхода (в частности испарение) водоносного горизонта.

ного питанием водоносного горизонта $Q_д$, из участков с напорными водами будет итти за счет уменьшения вековых запасов на участках со свободным зеркалом того же водоносного горизонта.

Расчет количества воды, которое можно получить из вековых запасов, определяется допустимым понижением уровня воды в водоносном горизонте, а это понижение, в свою очередь, зависит от технико-экономических условий.

## ГЛАВА V

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ РЕСУРСОВ

Между периодами питания подземных вод естественно рассчитывать на регулировочные ресурсы.

Ниже даются два метода подсчета регулировочных ресурсов.

### 19. Подсчет регулировочных ресурсов по коэфициенту водоотдачи

При годичных и многолетних колебаниях уровня подземных вод на участках со свободным зеркалом мы получаем изменение количества воды, заключенной в водоносной толще.

Объем воды выше самых низких уровней является регулятором расхода водоносного горизонта.

Определение указанного объема по коэфициенту водоотдачи можно делать аналогично определению вековых запасов по формуле

$$Q_p = W_p \varphi, \tag{38}$$

где $Q_p$ — регулировочные ресурсы;

$\varphi$ — коэфициент водоотдачи;

$W_p$ — объем, занимаемый водоносной толщей между высоким и низким стояниями уровня воды на участках подземных вод со свободным зеркалом;

$W_p$ — определяется произведением амплитуды колебания уровня на площадь, где происходит изменение положения этого уровня.

Определение годового подземного стока $Q_г$ по регулировочным ресурсам для случаев, когда питание водоносного горизонта происходит один раз в год, можно приближенно сделать по формуле

$$Q_г = 365 \frac{Q_p}{365 - t}, \tag{39}$$

где $t$ — число дней, в продолжение которых происходит инфильтрация.

Аналогично можно подсчитать годовой сток и для случаев питания водоносного горизонта несколько раз в год.

## 20. Интегральный метод определения регулировочных ресурсов

Если нам известно количество воды, поступающей в водоносный горизонт и сток из него в течение года, то регулирующую емкость водоносного горизонта можно подсчитать и аналитически и графически. Поясним это на примере: в районе конуса выноса (Узбекская ССР, по данным Шмидта). В табл. 1 приведены данные о питании и стоке подземных вод. При этом принято, как указано ранее, что подземный приток к конусу выноса из высокогорной части бассейна практически отсутствует, а подземный сток за пределы зоны выклинивания ничтожен. При таких допущениях разница между приходом и расходом за год получилась $25{,}1 - 22{,}3 = 2{,}8$ *м³/сек*, т. е. около 12%.

Отношение максимума к минимуму в течение года (по среднемесячным данным) составляет для питания 16,7 и для стока 3,9. Таким образом при весьма неравномерном питании мы имеем значительно более равномерное расходование подземных вод. Это показывает, что водоносный горизонт обладает высокой аккумулирующей способностью.

Для определения регулирующей емкости водоносного горизонта примем величину питания равной величине подземного стока; средняя их величина будет

$$\frac{25{,}1 + 22{,}3}{2} = 23{,}7 \ м^3/сек.$$

Таблица 3

| Месяцы | Питание, *м³/сек* | Подземный сток, *м³/сек* | Поступление в водоносный горизонт, *м³/сек* | Сток из водоносного горизонта, *м³/сек* | Регулировочные ресурсы, *м³/сек* |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| I | 6,23 | 30,07 | — | 23,84 | 88,75 |
| II | 4,53 | 33,76 | — | 28,93 | 59,82 |
| III | 4,12 | 35,36 | — | 31,24 | 28,58 |
| IV | 8,59 | 28,96 | — | 20,37 | 8,21 |
| V | 8,89 | 17,10 | — | 8,21 | 0 |
| VI | 46,75 | 13,14 | 33,61 | — | 33,61 |
| VII | 69,19 | 11,25 | 57,94 | — | 91,55 |
| VIII | 74,67 | 11,52 | 63,15 | — | 154,70 |
| IX | 40,77 | 15,91 | 24,86 | — | 179,56 |
| X | 7,67 | 22,43 | — | 14,76 | 164,80 |
| XI | 5,30 | 30,38 | — | 25,08 | 139,72 |
| XII | 7,69 | 34,82 | — | 27,13 | 112,59 |
| Итого за год . . . | Σ 284,40 | Σ 284,70 | Σ 179,56 | Σ 179,56 | 1060,89 |

В соответствии с этим изменяем ежемесячные величины питания и стока путем соответственного пропорционального уменьшения (для питания) и увеличения (для стока). Величину аккумулирующей способности водоносного горизонта можно подсчитать аналитически и графически (по интегральным кривым).

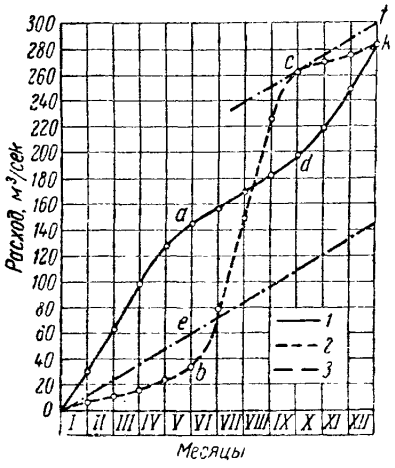



Рис. 5. Определение регулирующей емкости и водоносного слоя по интегральным кривым.

*1*—кривая подземного стока; *2*—кривая питания; *3*—кривая равномерного эксплоатационного отбора. Регулирующая емкость для естественного подземного стока определится как сумма ординат *ab* и *cd*, которая будет равна 179,6 *м³/сек*. Для равномерного расхода в 12 *м³/сек* полезная регулирующая емкость будет равна сумме ординат *eb* и *fk*, т. е. 40 *м³/сек*.

Аналитический подсчет регулирующей емкости приводится в табл. 3.

Указанный в табл. 3 расчет производится следующим путем.

В графах 4 и 5 дается разница между питанием и подземным стоком. С июня начинается период накопления регулировочных ресурсов; этот период продолжается 4 месяца до октября. Затем начинается снижение накопленных регулировочных ресурсов, количество которых полностью используется к июню на подземный сток. Наибольшее количество регулировочных ресурсов будем иметь в сентябре. Графический подсчет регулировочных ресурсов приведен на рис. 5. Питание и подземный сток даны здесь в виде интегральных кривых. Сумма двух ординат *ab* и *cd* дает величину регулировочных ресурсов.

Принимая по табл. 3 и рис. 5 секундный расход с округлением в 179,6 *м³/сек*, мы получим следующую регулировочную емкость[1]

$$179{,}6 \times 86\,400 \times 30 = 465\,523\,200\ м^3.$$

Если из водоносного горизонта отбирать равномерно 12 *м³/сек*, что очень близко к минимальному подземному стоку, то полезная регулирующая емкость будет равна

$$40^2 \times 86400 \times 30 = 103\,680\,000\ м^3.$$

Приведенный пример показывает, что естественные возможности водоносных горизонтов по регулированию подземного стока часто бывают весьма велики.

---

[1] Регулировочная емкость в табл. 3 и на рис. 5 выражена в среднемесячном секундном расходе (для промежуточного расчета).

[2] Сумма ординат *eb* и *fk* на рис. 5.

ГЛАВА VI

# МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСПЛОАТАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

## 21. Влияние размещения конструкции водосборов на величину эксплоатационных ресурсов и допустимое понижение уровней подземных вод при эксплоатации

Понижение уровня подземных вод является одним из важнейших элементов, определяющих величину эксплоатационных ресурсов. Допустимое понижение уровня зависит не только от гидрогеологических условий, но также и от конструкции водосборов для захвата подземных вод.

Отбор подземных вод производится при помощи двух основных типов водосборов: вертикальных (скважины и шахтные колодцы) и горизонтальных.

При горизонтальных водосборах возможно значительное понижение уровня воды по сравнению с мощностью водоносного слоя: при помощи горизонтальных водосборов, уложенных на водоупор, можно почти полностью перехватить подземный поток. Если же горизонтальный водосбор уложен выше подошвы водоносного пласта, то захватить весь расход подземного потока обычно нельзя.

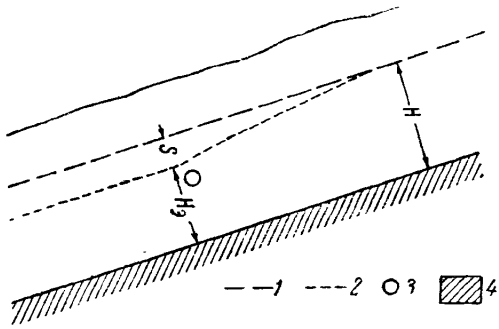



Рис. 6. Схема действия горизонтального водосбора.

*1*—естественный уровень подземного потока; *2*—уровень при отборе воды; *3*—горизонтальный водосбор; *4*—водоупорная подошва водоносного слоя; $H$—мощность водоносного слоя; $S$—понижение уровня воды у горизонтального водосбора; $H_э$—высота слоя воды у водосбора.

Пусть горизонтальный водосбор уложен поперек подземного потока со свободным зеркалом выше подошвы водоносного слоя (рис. 6). Тогда количество воды, которое захватывается горизонтальным водосбором, можно приближенно определить по формуле

$$Q_в = Q_е \frac{S}{H}, \qquad (40)$$

где $Q_в$ — расход горизонтального водосбора на 1 *пог. м*;

$Q_е$ — естественный расход подземного потока на 1 *пог. м*;

$S$ — понижение уровня у горизонтального водосбора;

$H$ — мощность водоносного слоя, который в данном случае принят однородным.

При расчете по формуле (40) имеется в виду, что гидравлический уклон подземного потока при эксплоатации ниже водо-

сбора примерно равен гидравлическому уклону до эксплоатации, а ниже водосбора уменьшается лишь мощность слоя, заполненного водой.

При условиях, показанных на рис. 7, горизонтальный водосбор уложен выше подошвы водоносного слоя, но ниже отметки дренирования водоносного горизонта. В этом случае подземный поток может быть полностью захвачен горизонтальным водосбором. Для этого отметка уровня воды $B$ около горизонтального водосбора при эксплоатации должна быть не выше отметки $A$ дренажа водоносного горизонта.

При отборе подземных вод вертикальными водосборами понижение уровня воды в водоносных горизонтах со свободным зеркалом рекомендуют (Козени, Эренберг) делать на половину мощности водоносного слоя. Очевидно, что в этом случае имелось в виду однородное строение водоносного слоя. По нашему мнению в эту рекомендацию, если она верна [1], необходимо внести следующие уточнения. Прежде всего следует учитывать неоднородность строения водоносной толщи; поясним это на примере. Пусть водоносная толща состоит из двух слоев; первый (верхний) слой имеет мощность $H_1 = 20$ *м* и коэфициент фильтрации $K_1 = 7$ *м/сутки*, а второй (нижний) слой — мощность $H_2 = 4$ *м* и коэфициент фильтрации $K_2 = 25$ *м/сутки*. Очевидно, что по каждому слою протекает количество воды, прямо пропорциональное его мощности и коэфициенту фильтрации.

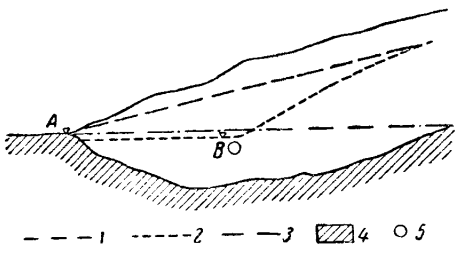



Рис. 7. Схема действия горизонтального водосбора в подпертом потоке подземных вод.

*1* — естественный уровень подземного потока; *2* — уровень воды при отборе; *3* — горизонт дренирования; *4* — водоупорная подошва водоносного слоя; *5* — горизонтальный водосбор; $A$ — отметка дренирования; $B$ — отметка уровня воды у горизонтального водосбора при отборе воды.

Назовем величину произведения $HK$ водопроводимостью. Тогда, переходя от однородных грунтов (где, по Козени и Эренбергу, рекомендуется понижение на 0,5 $H$) к неоднородным, понижение $S$ следует рассчитывать по водопроводимости. Если $K_1 H_1 > K_2 H_2$, т. е. допустимое понижение $S < H_1$, то, принимая это понижение равным половине водопроводимости, получим:

$$S = \frac{H_1 K_1 + H_2 K_2}{2K_1} = 0{,}5\ H_1 + 0{,}5\ \frac{K_2}{K_1} \cdot H_2. \qquad (41)$$

Для нашего примера

$$S = 0{,}5 \times 20 + 0{,}5 \times 4\frac{25}{6} = 18{,}3\ м$$

[1] Эта рекомендация, по нашему мнению, требует проверки.

из общей мощности

$$20 + 4 = 24 \text{ м}.$$

Если

$$K_1 H_1 < K_2 H_2, \text{ т. е. } S > H_1,$$

то

$$S = 0{,}5\, H_2 + 0{,}5 \frac{K_1}{K_2} H_1. \qquad (42)$$

Затем наибольшее понижение в отдельном колодце следует рассчитывать не по всей мощности водоносного слоя $H$, а за вычетом понижений, связанных с районными депрессиями $S_{рд}$ и с влиянием ближайших скважин $S_в$.

Кроме того, необходимо учитывать допустимые скорости притока воды к фильтрам [13].

При захвате вертикальными водосборами напорных подземных вод допустимое понижение большей частью принимают до водоупорной кровли водоносного горизонта; этой мерой имеют в виду сохранить свойства напорного горизонта.

В ряде случаев при большой мощности водоносного слоя напорного горизонта и при слабой водопроницаемости в верхней его части возможно понижение уровня допускать и ниже водоупорной кровли.

## 22. Использование методов подсчета эксплоатационных ресурсов по расходу подземного потока в поперечном сечении

Естественный расход подземного потока является весьма важной характеристикой для оценки эксплоатационных ресурсов. В различных гидрогеологических условиях и при различной конструкции водосборов из водоносного горизонта можно рассчитывать на получение в одних случаях полного естественного расхода потока, в других же случаях — меньше, а иногда и больше.

Если рассматривать часть сечения по ширине подземного потока, то при эксплоатации подземных вод на этом участке, сравнительно с естественным расходом воды через указанное сечение обычно можно получить воды больше; это объясняется притоком воды с соседних участков при понижении уровня в районе эксплоатации.

Ниже даются конкретные указания для отдельных случаев.

В потоке подземных вод со свободным зеркалом в зависимости от глубины залегания и мощности водоносного слоя устраивают каптаж из горизонтальных или вертикальных водосборов (трубчатые и шахтные колодцы).

Если горизонтальные водосборы укладываются на постель водоносного слоя, то в этом случае возможно почти полностью перехватить подземный поток по ширине, соответствующей длине горизонтального водосбора ($B$). При таких условиях за эксплоа-

тационные ресурсы можно принять естественный расход подземного потока по ширине $B$[1].

Для уточнения расчета в данном примере следовало бы принять ширину потока несколько большую, чем длина горизонтального водосбора. Кроме того, при обеспеченном питании водоносного горизонта недалеко от горизонтального водосбора можно, в связи с увеличением гидравлических уклонов, получить расход больше естественного.

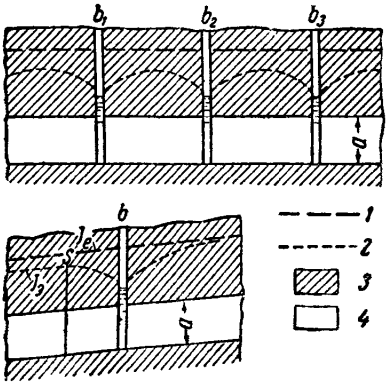



Рис. 8. Схема действия вертикальных водосборов в напорном водоносном горизонте.

$b$, $b_1$, $b_2$ и $b_3$—колодцы; 1—естественный уровень воды; 2—пониженный уровень; 3—водонепроницаемые породы; 4—водоносные породы; $S$—водораздел напорных вод ниже колодца по потоку; $a$—мощность водоносного слоя; $I_e$—гидравлический уклон потока в естественном состоянии; $I_э$—гидравлический уклон потока при эксплоатации его ниже водосборов.

По схеме рис. 6 эксплоатационные ресурсы можно приближенно определить по формуле (40).

При гидрогеологических условиях и схеме водосбора на рис. 7 эксплоатационные ресурсы будут равны расходу подземного потока.

При гидрогеологических условиях, показанных на рис. 4, и при понижении уровня подземного потока в районе вертикальных водосборов $D$ до отметки $C$ (уровень в области дренирования) можно рассчитывать на полный захват всего расхода подземного потока.

Если взять более общий случай заложения вертикальных водосборов (поперек направления движения воды) в широком подземном потоке со свободным зеркалом (рис. 2) или в напорном потоке (рис. 8), то вопрос об оценке

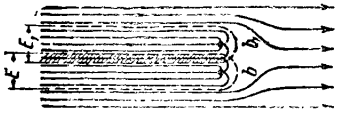



Рис. 9. Схема двух колодцев с независимыми зонами питания.

$b$ и $b_1$—колодцы; $E$ и $E_1$—зоны питания колодцев.

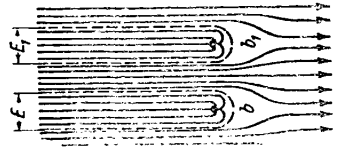



Рис. 10. Схема двух колодцев с пересекающимися зонами питания.

$b$ и $b_1$—колодцы; $E$ и $E_1$—зоны питания колодцев.

эксплоатационных ресурсов по естественному расходу подземного потока будет довольно сложным. При анализе этого во-

[1] Мы имеем в виду, что горизонтальный водосбор закладывается поперек направления потока.

проса примем сначала некоторую весьма распространенную в литературе схематизацию взаимодействия зон питания колодцев (рис. 9 и 10).

Обозначим единичный естественный расход потока через $q$ и ширину зоны питания одного колодца через $E_i$. Тогда, если длина водосбора меньше ширины подземного потока и зоны питания колодцев не пересекаются, эксплоатационные ресурсы $Q_э$ для водосбора колодцев можно подсчитать по формуле

$$Q_э = q \sum_1^n E_i. \qquad (43$$

Если вертикальные водосборы расположены по всей ширине потока, то при гидрогеологических условиях, указанных на рис. 2 и 8, ниже этого водосбора по потоку будет проходить какой-то расход. Этот расход для подземных вод со свободным зеркалом (см. рис.2) определяется формулой

$$Q_н = K_{ср}\ J_э\ H_э\ B. \qquad (44)$$

Для напорных вод расход потока ниже створа скважин будет:

$$Q_н = K_{ср}\ J_э\ a\ B. \qquad (45$$

Обозначения в формулах (44) и (45) следующие:

$Q_н$ — расход подземных вод ниже водосбора по потоку;

$K_{ср}$ — средний коэфициент фильтрации;

$J_э$ — гидравлический уклон в потоке ниже водосбора при эксплоатации;

$H_э$ — мощность водоносного слоя горизонта со свободным зеркалом ниже водосбора за местной депрессией;

$a$ — мощность водоносного слоя напорного горизонта;

$B$ — ширина потока.

Совершенно очевидно, что расход подземного потока ниже линии водосбора будет меньше расхода потока выше водосбора.

$Q_э$ — эксплоатационные ресурсы приближенно определяются уравнением

$$Q_э = Q_е - Q_н, \qquad (46)$$

где $Q_е$ — естественный расход потока выше водосбора.

Уменьшение расхода ниже водосбора при эксплоатации зависит для вод со свободным зеркалом от уменьшения гидравлического уклона и мощности слоя, заполненного водой, а для напорных вод только от изменения гидравлического уклона. В обоих случаях уменьшение $Q_н$ определяется величиной снижения динамического уровня в колодцах и расстоянием между колодцами.

Так как снижение уровня воды возможно только в некоторых пределах, то при условиях, показанных на рис. 2 и 8, $Q_н$ не может равняться нулю; следовательно, $Q_э$ будет меньше $Q_е$. В других гидрогеологических условиях, например, когда отметка уровня воды по потоку ниже водосборов будет не выше отметки дрени-

рования подземного потока, возможно полностью захватит подземный поток водосборами (аналогично примеру на рис. 7) и тогда $Q_э = Q_е$.

Подсчет эксплоатационных ресурсов по формуле $Q_э = Q_е - Q_н$ в условиях, когда часть подземного потока уходит ниже по течению этого потока от водосборов, является весьма сложной задачей, которая может быть решена в большинстве случаев только приближенно. Насколько сложно решение подсчета эксплоатаци-

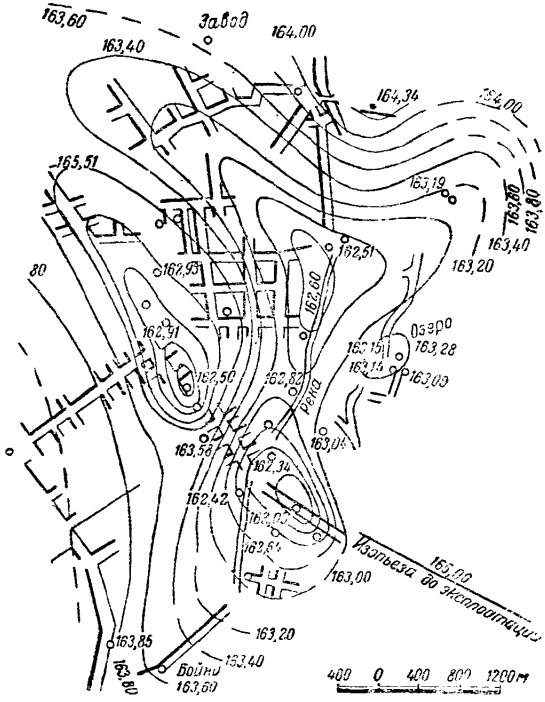



Рис. 11. Изопьезы юрских артезианских вод в районе одного из городов (по данным 1930 г.). Цифры обозначают абс. отметки статического уровня в метрах

онных ресурсов по расходам выше и ниже водосборов видно из рис. 11, где показаны изопьезы юрских артезианских вод района в условиях эксплоатации. Участок, на котором расположены скважины, сравнительно с шириной юрского потока невелик. Поток юрских вод в районе имеет общее направление на юг с уклоном 0,00025. Сложное очертание районной депрессии показывает, с какой сложностью идет приток воды к скважинам.

При наличии довольно подробных данных об уровнях юрских вод мы получаем лишь представление о части депрессион-

ной воронки, но не имеем данных о гидравлических уклонах по той ширине потока, по которой идет приток к системе скважин, а также о количестве воды, которое уходит вниз по потоку.

Сравнительно точное решение задачи определения эксплоатационных ресурсов по формуле $Q_э = Q_е - Q_н$ для одного из случаев дается далее (в § 24).

## 23. Расчет эксплоатационных ресурсов с учетом береговой инфильтрации

При использовании водоносных горизонтов, имеющих тесную связь с поверхностными водами, например по схеме рис. 12, можно рассчитывать на инфильтрацию через русло реки. Расчет количества воды, поступающей в водосбор, следует вести с уче-

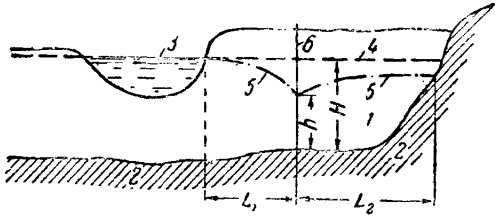



Рис. 12. Схема захвата подземных вод с береговой инфильтрацией.

*1*—водоносный горизонт; *2*—водоупор; *3*—уровень воды в реке; *4*—статический уровень до эксплоатации; *5*—уровень воды при эксплоатации; *6*—каптаж; $H$—мощность водоносного слоя; $h$—слой воды у колодца при откачке; $L_1$—расстояние от колодца до реки; $L_2$—расстояние от колодца до границы водоносного слоя.

том гидрогеологических условий, а также расположения и конструкции каптажных сооружений. Рассмотрим для примера следующие случаи.

1) Пусть каптаж выполнен в виде горизонтального водосбора и длина $L_г$ (рис. 12) является небольшой. В этом случае можно рассчитывать только на береговую инфильтрацию; поступлением воды с другой стороны водосбора можно пренебречь.

Тогда для расчета притока можно с достаточной практической точностью воспользоваться формулой

$$Q = BK\frac{H-h}{L_1}\cdot\frac{H+h}{2}, \qquad (47)$$

где $Q$—приток воды к горизонтальному водосбору;

$B$—длина горизонтального водосбора;

$K$—коэфициент фильтрации.

2) При расположении водосбора из нескольких колодцев вдоль берега реки определение дебита или понижения уровня

коды за стенкой колодца можно делать по уравнению

$$H^2 - Z^2 = \frac{Q}{1{,}37K} \lg \frac{2b}{2} \cdot \frac{S_1}{a_1} \cdot \frac{S_2}{a_2} \cdot \frac{S_3}{a_3}, \qquad (48)$$

где $H$ — мощность водоносного слоя;

$Z$ — слой воды при понижении уровня у колодца $A$ (у его наружной стенки);

$Q$ — дебит каждого колодца в $м^3/сек$; дебит принят одинаковым для каждого колодца;

$K$ — коэфициент фильтрации в $м/сек$;

$b$ — расстояние от колодца $A$ до реки;

$r$ — радиус колодца;

$a_1, a_2, a_3$ — расстояние от колодца $A$ до первого, второго, третьего и т. д. колодцев;

$s_1, s_2, s_3$ — расстояние от колодца $A$ до первого, второго, третьего и т. д. отображенных колодцев, находящихся на расстоянии $2b_1$, $2b_2$, $2b_3$ и т. д. от первого, второго, третьего и т. д. колодцев нормально к реке, где $b_1$, $b_2$, $b_3$ и т. д. расстояние первого, второго, третьего и т. д. колодцев от уреза воды в реке.

При расчете на береговую инфильтрацию следует учитывать возможность заиливания берегов и дна реки, что может дать уменьшение инфильтрации. На устойчивую береговую инфильтрацию можно рассчитывать только там, где во время паводков происходят размывание и очистка от наносов.

Для расчета нужно брать минимальный уровень в реке. Таким образом расчет эксплоатационных ресурсов сводится к расчету водосборов. Расчеты для других случаев изложены в ряде руководств и, в частности, в книге Форхгеймера „Гидравлика".

## 24. Расчет эксплоатационных ресурсов по методу пьезометрии

Пусть мы имеем ограниченный по ширине подземный поток, схема продольного профиля которого показана на рис. 13; там же приведены и соответствующие обозначения: $A$ — область питания, $Б$ — область дренажа водоносного горизонта и $D$ — участок отбора подземных вод.

Если в районе $D$ из потока брать воду в количестве $Q_э$, то уровень воды в этом районе понизится с отметки $D_е$ на отметку $D_э$, и в верхнем продольном створе ($DA$) вместо гидравлического естественного уклона $I_{вe}$ мы получим больший уклон — эксплоатационный $I_{вэ}$. В нижнем продольном створе $DБ$, вместо естественного уклона $I_{нэ}$, будет меньший гидравлический уклон — эксплоатационный $I_{нэ}$.

При таких условиях выше створа $D$ поток будет иметь расход $Q_{вэ}$ — больший, чем в естественных условиях и, ниже створа $D$ расход, меньший, чем в естественных условиях. Отбор воды

$Q_э$ в районе $D$ определится по уравнению.

$$Q_э = Q_{вэ} - Q_{нэ}. \tag{49}$$

Гидравлические уклоны выше и ниже потока можно подсчитывать, задаваясь положением динамического уровня[1], по следующим формулам:

$$I_{вэ} = \frac{A_в - D_э}{L_в} \tag{50}$$

и

$$I_{нэ} = \frac{D_э - Б}{L_н}, \tag{51}$$

где $A_е$ — отметка уровня воды в области питания без понижения уровня;

$Б$ — отметка уровня воды в области дренажа;

$L$ — расстояние от области питания до створа $D_э$;

$L_н$ — расстояние от створа $D$ до области дренажа.

Подсчеты расходов $Q_{вэ}$ и $Q_{нэ}$ можно сделать по формулам (1) и (21); формулой (1) можно пользоваться лишь при однород-

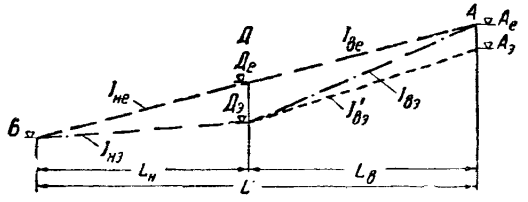



Рис. 13. Схема изменения уровней при откачке из напорного подземного потока ограниченной ширины.

$A$ — область питания; $A_е$ — отметка естественного уровня воды подземного потока в области питания; $A_в$ — отметка уровня воды в области питания при использовании регулирующей емкости водоносного горизонта; $Б$ — область дренирования водоносного горизонта и отметка уровня воды подземного потока; $Д$ — район эксплоатации; $Д_е$ — отметка естественного уровня воды в районе эксплоатации; $Д_в$ — отметка эксплоатационного уровня воды; $I$ — гидравлические уклоны; $L_в$ — расстояние от участка эксплоатации до области питания; $L_н$ — расстояние от участка эксплоатации до области дренирования; $L$ — длина подземного потока.[2]

ном строении водоносного пласта как в продольном, так и в поперечном сечении.

Разработанная выше схема расчета действительна при обеспеченном питании в области $A$.

## 25. Оценка эксплоатационных ресурсов с учетом регулировочной емкости водоносного горизонта

Так как обычно питание водоносных горизонтов происходит периодически, то при расчетах ресурсов следует учитывать

[1] Понижение уровня принимается без сопротивлений в колодцах и около них, т. е. вне резких местных депрессий отдельных колодцев.

[2] ($D$ на рис. 13 соответствует в тексте и формулах).

периодическое использование емкости водоносного горизонта, т. е. регулировочные запасы. Рассмотрим для примера гидрогеологические условия, приведенные на рис. 4 и 13 и описанные в § 9.

Там был разобран случай расчета ресурсов в потоке ограниченной ширины с учетом изменения гидравлических уклонов, но отметка уровня в области питания принималась неизменной.

Если же рассчитывать в течение года на использование регулирующей емкости водоносного горизонта, то для минимальных расходов уровень в области питания следует принять ниже — на отметке $A_э$. Тогда гидравлический уклон в верхнем створе будет:

$$I_{lэ} = \frac{A_э - D_э}{L_b}. \qquad (52)$$

Новый гидравлический уклон $L'_{bэ}$ меньше $L_{lэ}$.

В связи с этим выше створа $D$ мы получим расход $Q'_{lэ}$ меньше прежнего.

Чтобы получить прежний расход $Q_{bэ}$, нужно для напорных горизонтов уровень воды в районе эксплоатации снизить на величину $A_e - A_э$; для подземного потока со свободным зеркалом снижение уровня в районе эксплоатации потребуется больше, так как в последнем случае, кроме уменьшения гидравлического уровня, будет еще уменьшение мощности водоносного слоя.

Расход водосбора в створе $D$ в период минимального питания проверяется также по формуле

$$Q_{lэ} = \frac{Q_p}{t} + Q_n, \qquad (53)$$

где $Q_p$ — регулировочные ресурсы, используемые в период минимального питания;

$t$ — продолжительность периода минимального питания;

$Q_n$ — поступление в водоносный горизонт в период минимального питания.

## 26. Оценка эксплоатационных ресурсов по методу депрессионных воронок

Оценку эксплоатационных ресурсов отдельных районов глубоких артезианских вод, имеющих обширное распространение, можно делать по методу изучения развития районных депрессионных воронок при эксплоатации подземных вод.

Исследования показали, что в ряде мест эксплоатации артезианских вод районное, при наличии нескольких или многих скважин, понижение пьезометров, т. е. депрессия уровней, идет закономерно в зависимости от увеличения отбора воды; во всех исследованных случаях наблюдалась почти прямая пропорциональная зависимость районного понижения от районного расхода.

В районное понижение не входят понижения в наблюдаемой скважине, связанные с сопротивлениями в скважине и около нее при откачке из данной скважины, а также величины влияния, полученные при опытных откачках из ближайших скважин (на расстоянии до 500—2000 *м*).

Таким образом в районную депрессию входит понижение, связанное со значительной эксплоатацией артезианского горизонта в районе и вызванное, повидимому, изменением режима этого горизонта, в особенности в указанном районе.

Глубина и форма депрессионной воронки будут зависеть не только от отбора воды, но также и от площади и самого расположения на этой площади скважин.

Наибольшее понижение будет в центральной части района эксплоатации подземных вод и может быть с достаточной практической точностью определено по формуле

$$S = \frac{Q\alpha}{1000}, \tag{54}$$

где $S$ — районное понижение в центральной части депрессии в *м*;
$Q$ — районный отбор подземной воды в $м^3/сутки$;
$\alpha$ — удельная районная депрессия, т. е. понижение уровня на 1000 $м^3/сутки$ районного отбора воды.

Величина $\alpha$ определяется как среднее за ряд лет из опыта эксплоатации или принимается по аналогии с имеющимися наблюдениями для похожих гидрогеологических условий. Если площадь, на которой размещаются скважины, увеличивается, то удельная районная депрессия будет уменьшаться.

В табл. 4 приводится ряд примеров величин удельной депрессии.

Из формулы (54) по удельной районной депрессии $\alpha$ и принятому районному понижению $S$ можно определить районный расход $Q$:

$$Q = \frac{1000 \cdot S}{\alpha}. \tag{55}$$

При наличии многолетних наблюдений за развитием районной депрессии при эксплоатации подземных вод целесообразно исследовать по методу корреляций связь между районным расходом и районной депрессией.

Исследуем для примера связь районной депрессии с районным расходом для юрского водоносного горизонта в одном из городов УССР.

В табл. 5 приведены данные по годам, а также средние величины за 9 лет суточного районного отбора воды, понижения уровня сравнительно с первоначальным и удельной районной депрессии.

Понижение уровня воды в табл. 5 взято в водоносном горизонте для глубокой части депрессионной воронки. Понижение при откачке из отдельной скважины и взаимодействие близко распо-

Таблица 4

**Данные по удельной районной депрессии**

| Водоносный горизонт | | | Районный отбор воды | | | Удельная районная депрессия |
|---|---|---|---|---|---|---|
| название горизонта | породы | средняя глубина залегания, *м* | год | расход *м³/сутки* | понижение | |
| Сеноманский . . | Газы | 100 | 1933 | 36 100 | 18,00 | 0,5 |
| Юрский . . . . . | Пески | 200 | 1939 | 37 400 | 22,60 | 0,6 средняя за 21 год 0,7 |
| „ | „ | 650 | 1932 | 20 817 | 19,29 | 0,94, средняя за 20 лет 1,01 |
| Мергельно-меловой . . . . . | Мел | 100 | 1933 | 28 000 | 19,00 | 0,68 |
| Юрский . . . . . | Пески | 80—150 | 1932 | 11 000 | 4,86 | 0,44 |
| Сеноманский . . | „ | 500 | 1930 | 2 600 | 1,66 | 0,64 |
| Нижнесенонский[1] | „ | 80 | 1936 | 8 000 | 10,00 | 1,25 |
| Девонский . . . | Известняки | 75 | 1936 | 36 000 | 9,40 | 0,26 |
| „ | То же | 80 | 1940 | 15 000 | 8,50 | 0,57 |
| Омфалотроховый | „ „ | 40 | 1940 | 6 000 | 5,50 | 0,9 |
| Тегулифериновый | „ „ | 75 | 1940 | 10 000 | 6,20 | 0,62 |
| Среднесарматский | „ „ | — | 1939 | 4 500 | 3,80 | 0,84 |
| Подземные воды в разрушенной и трещиноватой зонах изверженных и метаморфических пород (шахтные воды) . . . . . | — | — | 1939 | 40 000 | $\infty$ 33,0 | 0,82 |

ложенных скважин, приведенное в табл. 5, в понижение не вошло.

В последней графе табл. 5 дана величина удельной районной депрессии $\alpha$, определяемой как частное от деления понижения $S$ на районный расход в тыс. *м³/сутки*,

$$\alpha = \frac{1000 \cdot S}{Q} . \qquad (56)$$

Исследуем зависимость между $Q$ и $S$. Незначительная амплитуда $\alpha$ (в табл. 5 от 0,60 до 0,81 *м*, в одном случае 0,93 *м*) показывает зависимость понижения от расхода, близкую к прямолинейной функции.

Учитывая колебания $Q$ и вероятные неточности замеров, исследуем по методу корреляций зависимость между дебитом и районным понижением. Для этого определим коэфициент корреляции.

---

[1] По Архангельскому. А. Д.

Таблица 5

**Зависимость изменения уровней воды в юрском водоносном горизонте от районного отбора воды (в одном из районов УССР)**

| Год | Суточный отбор воды, $м^3/сутки$ | Абс. отметки уровней воды в глубокой части депрессии, $м$ | Понижение уровня воды сравнительно с первоначальным, $м$ | Удельная районная депрессия $1000\frac{S}{Q}$, $м/м^3/сутки$ |
|---|---|---|---|---|
| — | 0. (до эксплоатации) | 104,6 | 0. | — |
| 1918 | 13 000 | ~ 97,6 | 7,0 | 0,54 |
| 1928 | 16 500 | ~ 93,0 | 11,6 | 0,71 |
| 1931 | ~ 18 000 | ~ 90,0 | 14,6 | 0,81 |
| 1932 | 20 800 | 89,2 | 15,4 | 0,74 |
| 1933 | 21 600 | 87,7 | 16,9 | 0,78 |
| 1935 | 22 000 | 84,2 | 20,4 | 0,93 |
| 1/II 1937 | ~ 34 000 | 82,8 | 21,8 | 0,64 |
| 1/I 1938 | 36 700 | 82,5 | 22,1 | 0,60 |
| 1/I 1939 | 37 400 | 82,0 | 22,6 | 0,60 |
| Среднее | $\Sigma$ 220 000<br>$Q_0 = 24\,400$ | | 152,4<br>$S_0 = 16,9$ | $X_0 = 0,7$ |

Таблица 6

**Расчеты по юрскому горизонту в одном из районов УССР (для прямолинейной корреляции)**

| Годы | Районный расход $Q$, тыс. $м^3/сутки$ | Понижение $S$, $м$ | $Q-Q_0$ | $S-S_0$ | $(Q-Q_0)^2$ | $(S-S_0)^2$ | $(Q-Q_0)(S-S_0)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1918 | 13,0 | 7 | —11,5 | —10,0 | 132,25 | 100,00 | 115,00 |
| 1928 | 16,5 | 11,6 | — 8,0 | — 5,4 | 64,00 | 29,16 | 43,20 |
| 1931 | 18,0 | 14,6 | — 6,4 | — 2,3 | 40,96 | 5,29 | 14,72 |
| 1932 | 20,8 | 15,4 | — 3,6 | — 1,5 | 12,96 | 22,50 | 5,40 |
| 1933 | 21,6 | 16,9 | — 2,8 | 0 | 7,84 | 0 | 0 |
| 1935 | 22,0 | 20,4 | — 2,4 | 3,5 | 5,76 | 12,25 | —8,40 |
| 1937 | 34,0 | 21,8 | 9,6 | 4,9 | 92,16 | 24,01 | 47,04 |
| 1938 | 36,7 | 22,1 | 12,2 | 5,2 | 148,84 | 27,04 | 63,44 |
| 1939 | 37,4 | 22,6 | 12,9 | 5,6 | 166,41 | 31,36 | 72,24 |
| $\Sigma$<br>Среднее | 220,0<br>$Q_0 = 24,44$ | 152,4<br>$S_0 = 16,9$ | 0 | 0 | 671,18 | 251,61 | 352,64 |

Расчеты по прямолинейной корреляции для юрского водоносного горизонта в районе приведены в табл. 6.

По данным табл. 6 получаем коэфициент корреляции

$$r = \frac{\Sigma (Q-Q_0)(S-S_0)}{\sqrt{\Sigma (Q-Q_0)^2 \Sigma (S-S_0)^2}} = \frac{352,64}{\sqrt{671,18 \cdot 251,61}} = 0,858.$$

Коэфициент корреляции получается неплохой; связь корреляционная имеется, но функциональной нет.

Выведем уравнение прямой регрессии:

$$\frac{\sigma_{Q_0}}{\sigma_S} = \sqrt{\frac{\Sigma (Q - Q_0)^2}{\Sigma (S - S_0)^2}} = \sqrt{\frac{671{,}18}{251{,}61}} = \sqrt{2{,}67} = 1{,}634;$$

$$R = r\frac{\sigma_{Q_0}}{\sigma_S} = 0{,}858 \cdot 1{,}634 = 1{,}402;$$

$$Q - Q_0 = (S - S_0) R;$$

$$Q - 24{,}4 = (S - 16{,}9)\, 1{,}402;$$

$$Q - 24{,}4 = 1{,}402\, S - 23{,}69;$$

$$Q = 1{,}402\, S + 0{,}71. \qquad (57)$$

Исследуем связь между $Q$ и $S$ для района по криволинейной корреляции. Для нахождения криволинейной связи воспользуемся тем свойством кривых, что большинству их удовлетворяет уравнение степенных функций. Для упрощения будем коррелировать не непосредственно $Q$ и $S$, а их логарифмы. В результате мы получим уравнение прямой регрессии логарифмической анаморфозы; затем путем потенцирования можно легко перейти к степенному уравнению.

Расчет для криволинейной корреляции приведен в табл. 7-а.

Таблица 7-а

**Расчеты по юрскому горизонту в одном из районов УССР (для криволинейной корреляции)**

| Годы | Районный расход $\lg Q$, тыс. $м^3/сутки$ | Понижение $\lg S$ | $\lg Q - \lg Q_0$ | $\lg S - \lg S_0$ | $(\lg Q - \lg Q_0)^2$ | $(\lg S - \lg S_0)^2$ | $(\lg Q - \lg Q_0)(\lg S - \lg S_0)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1918 | 1,1139 | 0,8451 | —0,2472 | —0,3588 | 0,0611 | 0,1289 | 0,0887 |
| 1928 | 1,2175 | 1,0645 | —0,1437 | —0,1394 | 0,0206 | 0,0195 | 0,0200 |
| 1931 | 1,2553 | 1,1644 | —0,1059 | —0,0395 | 0,0112 | 0,0015 | 0,0042 |
| 1932 | 1,3181 | 1,1875 | —0,0431 | —0,0164 | 0,0018 | 0,0002 | 0,0007 |
| 1933 | 1,3344 | 1,2279 | —0,0268 | 0,0240 | 0,0007 | 0,0114 | —0,0006 |
| 1935 | 1,3424 | 1,3096 | —0,0188 | 0,1056 | 0,0003 | 0,0111 | —0,0020 |
| 1937 | 1,6315 | 1,3384 | 0,1703 | 0,1345 | 0,0290 | 0,018 | 0,0229 |
| 1938 | 1,5647 | 1,3444 | 0,2035 | 0,1405 | 0,0414 | 0,0197 | 0,0286 |
| 1939 | 1,5728 | 1,3541 | 0,2116 | 0,1502 | 0,0448 | 0,0225 | 0,0318 |
| Σ | 12,2508 | 10,8359 | 0 | 0 | 0,2109 | 0,2058 | 0,1943 |
| Среднее | $\lg Q_0$=1,3612 | $\lg S_0$=1,2039 | | | | | |

По табл. 7-а вычисляем коэфициент корреляции $r$:

$$r = \frac{\Sigma (\lg Q - \lg Q_0)(\lg S - \lg S_0)}{\sqrt{\Sigma (\lg Q - \lg Q_0)^2 \Sigma (\lg S - \lg S_0)^2}} = \frac{0{,}1781}{\sqrt{0{,}2109 \cdot 0{,}2058}} =$$

$$= \frac{0{,}1781}{\sqrt{0{,}0434}} = \frac{0{,}1781}{0{,}208} = 0{,}856.$$

Связь корреляционная имеется.

Выведем уравнение прямой регрессии логарифмической анаморфозы:

$$\frac{\sigma_{\lg Q_0}}{\sigma_{\lg S}} = \sqrt{\frac{\Sigma (\lg Q - \lg Q_0)^2}{\Sigma (\lg S - \lg S_0)^2}} = \frac{0{,}2109}{0{,}2058} = 1{,}01;$$

$$R = r\frac{\sigma_{\lg Q_0}}{\sigma_{\lg S}} = 0{,}856 \cdot 1{,}01 = 0{,}8646;$$

$$\lg Q - \lg Q_0 = (\lg S - \lg S_0) R;$$

$$\lg Q - 1{,}3612 = 0{,}8646 (\lg S - 1{,}2039);$$

$$\lg Q = 0{,}8646 \lg S + 0{,}3204.$$

Из этого уравнения легко получаем простую степенную функцию

$$Q = 2{,}09 S^{0{,}86}. \qquad (58)$$

Подставляя в полученное уравнение значение $S$, получим соответствующее $Q$ (см. табл. 7-б).

Таблица 7-б

**Данные расчетов для кривой по уравнению $Q = 2{,}09 \cdot S^{0{,}86}$**

| $S$ м | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $Q$, тыс. $м^3$ сутки | 0 | 8,426 | 15,233 | 21,74 | 27,82 | 33,95 |

По уравнениям (57) и (58) построим график зависимости между районными дебитом и понижением (рис. 14) и нанесем точки по данным наблюдений. Расхождение между кривой и прямой по уравнениям регрессии невелико, но рассеяние точек по данным наблюдений все же значительно, так как коэфициент корреляции $r$ равен 0,85. Средняя удельная депрессия по табл. 5 будет:

$$\alpha = \frac{1000 \cdot 16{,}9}{24100} = 0{,}70.$$

По средней удельной депрессии $\alpha = 0{,}7$, пользуясь формулами (54) или (55), нанесем на рис. 14 прямую зависимости $Q$ от $S$. Обращается внимание, что прямые по уравнению регрессии и по формулам (54 и 55) почти совпадают.

Исследования других случаев в большинстве давали лучший коэфициент корреляции. Например, для юрского горизонта в г. Харькове коэфициент корреляции получен равным 0,984, т. е. близкий к единице; по существу это указывает уже на функциональную связь.

Для исследования районных депрессионных воронок можно пользоваться уравнениями (54) и (55), а также составлять уравнения прямолинейной и криволинейной регрессии и пользоваться для прямолинейной корреляции формулой

$$Q = a\,S + b \tag{59}$$

и для криволинейной корреляции формулой

$$Q = a\,S^{b} \tag{60}$$

Для исследований последнюю формулу удобнее применять в виде уравнения прямой регрессии логарифмической анамор-

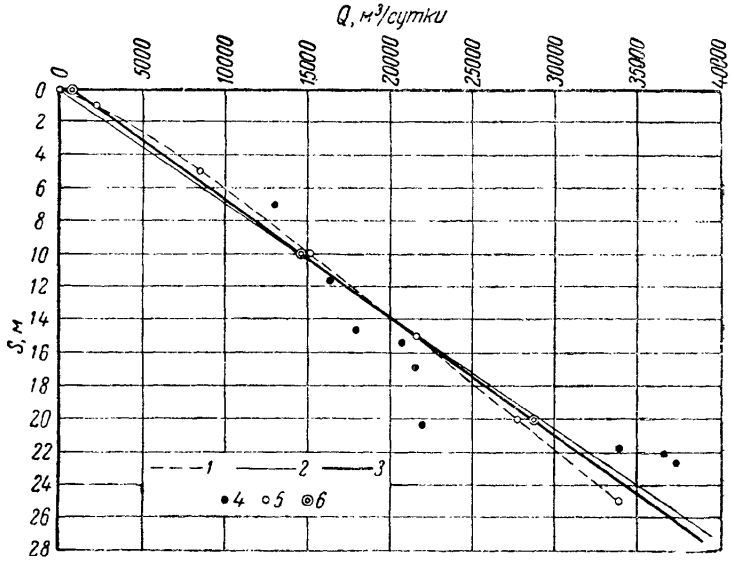



Рис. 14. Зависимость изменения уровней воды в юрском водоносном горизонте в одном из городов от районного расхода воды.

*1*—кривая по уравнению криволинейной регрессии; 2—прямая по уравнению $Q = \frac{1000 \cdot S}{\alpha}$ при $\alpha = 0{,}7$; *3*—прямая по уравнению прямолинейной регрессии; *4*—точки по данным наблюдений; 5—точки кривой уравнения криволинейной регрессии; *6*—точки прямой уравнения прямолинейной регрессии.

фозы. Затем путем потенцирования можно уже легко перейти к степенному уравнению.

Теоретически коррелятивной связью можно пользоваться при $r > 0{,}5$, но практически обычно считают, чтобы коэфициент

корреляции был не меньше 0,7, так при меньшей величине связь будет слаба.

Построение графической зависимости между районной депрессией и районным расходом можно делать не только путем вычисления из уравнений (54, 55, 59 и 60), но также и путем проведения прямой (или кривой) глазомерно по точкам фактических данных; последний прием требует, конечно, опытности.

Для наглядного представления о развитии районной депрессии целесообразно строить профиль развития ее. Для примера на

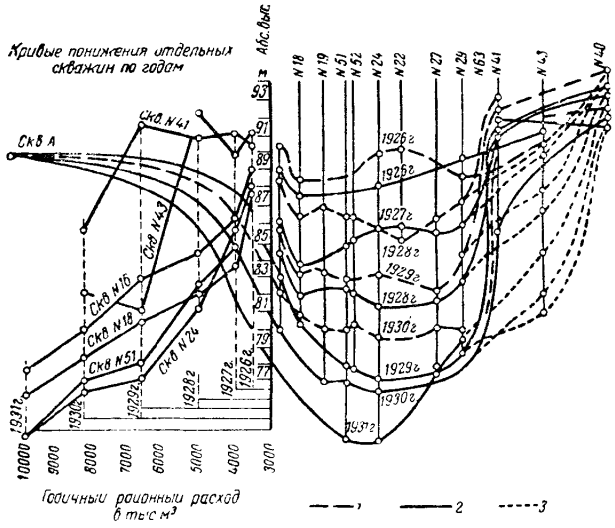



Рис. 15. Развитие депрессии пьезометрических уровней сеноманских вод в одном из городов УССР.

*1*—весенняя депрессионная кривая с наличием влияния р. Днепра; **2**—та же кривая для летнего, осеннего и зимнего периодов; *3*—части депрессионных кривых в направлении скв. № 29, 43 и 40.

рис. 15 показан профиль развития депрессионной воронки в сеноманском водоносном горизонте в одном из городов УССР. С левой стороны рис. 15 показано изменение районного расхода по годам и изменение уровня за те же годы в скв. № 41, 43, 16, 18, 57 и 24.

На рис. 15 видно, что падение пьезометров резко выражено в центральной части; на крайних же наблюдаемых точках (в скважине А, где эксплоатации нет) понижение за 10 лет почти незаметно, а в эксплоатируемой скв. № 40 на краю депрессии понижение незначительно.

Таким образом распространение депрессии ограничено и в данном случае (для сеноманских вод района) на длине около 15 *км*.

Важно отметить необходимость учета сезонного колебания уровней: на рис. 15 пунктиром показана весенняя депрессионная кривая и сплошной линией — для летнего, осеннего и зимнего периодов.

## 27. Оценка эксплоатационных ресурсов подземных вод по методу изучения статических и динамических уровней, по данным опытных откачек и стационарных наблюдений

Детальное определение ресурсов подземных вод при небольших потребностях по сравнению с производительностью подземных потоков является дорогим (по отношению к стоимости захватных сооружений) даже при неглубоких подземных водах.

В этих случаях для оценки эксплоатационных ресурсов можно воспользоваться методом изучения статических и динамических уровней по опытным откачкам. Сущность этого метода заключается в следующем. Если при длительной откачке с постоянным дебитом динамический уровень не изменяется, то можно сделать такой вывод: в водоносном горизонте наступило динамическое равновесие, т. е. приток к каптажному сооружению при данном понижении уровня обеспечивается.

Кроме того, сравнивается положение статического уровня перед откачкой со статическим уровнем после откачки (восстановившегося). Если статический уровень после окончания откачки поднялся до прежнего положения, то истощения вековых запасов не было и, следовательно, ресурсы водоносности горизонта обеспечивают бесперебойный отбор воды в количестве, определенном опытной откачкой.

Необходимо иметь в виду, что продолжительность откачки определяется общими гидрогеологическими условиями водообильности горизонта и в сомнительных случаях может потребоваться весьма длительная откачка — 1—3 месяца и более.

Для случаев, когда потребность близка к естественным ресурсам водоносного горизонта, особенно важно приурочивать откачки к периоду наименьшего питания.

Наиболее надежные выводы по обеспеченности дебита каптажных сооружений можно сделать по данным стационарных наблюдений за эксплоатационной откачкой в течение года и больше.

## 28. Оценка эксплоатационных ресурсов по методу аналогии

Оценка эксплоатационных ресурсов водоносного горизонта может даваться по аналогии с другими изученными водоносными горизонтами, по которым имеются данные по детальным изысканиям или, что еще лучше, по эксплоатации.

Аналогию можно проводить при наличии сведений о распространении водоносного горизонта, мощности водоносного слоя и описании пород, слагающих этот слой. В этом случае оценка

водоносности не может быть дана путем вычисления по формуле. Следует отметить, что при сложных гидрогеологических условиях вычисления по формулам не всегда оправдываются. Поэтому оценка водоносности горизонта на основании сравнения с другими более изученными горизонтами и в особенности в условиях эксплоатации является весьма важной. Если к общим гидрогеологическим сведениям имеются еще и данные о дебитах колодцев, а также об условиях питания этого горизонта, то оценка водоносности по аналогии позволяет в ряде случаев с достаточной практической точностью дать обоснование для оценки ресурсов водоносного горизонта.

## 29. Оценка эксплоатационных ресурсов по расчету взаимодействующих скважин

Косвенным методом для оценки эксплоатационных ресурсов является расчет дебита взаимодействующих скважин.

Теоретическое решение взаимодействия группы колодцев для подземных вод со свободным зеркалом дано Форхгеймером в виде уравнения

$$H^2 - Y^2 = \frac{Q}{1{,}37K}\left(\lg R - \lg \sqrt[n]{x_1 . x_2 . x_3 . \ldots . x_n}\right), \qquad (61)$$

где $H$ — мощность водоносного слоя;

$Y$ — высота слоя от подошвы водоносного горизонта;

$Q$ — расход водосбора, *м³/сутки*;

$K$ — коэфициент фильтрации, *м/сутки*;

$R$ — радиус влияния действия водосбора, *м*;

$x_1, x_2$ — · · · расстояния от точки, для которой определяется понижение, до соответствующего колодца, *м*.

Для напорных вод, пользуясь методом Форхгеймера, получаем уравнение:

$$S = \frac{Q}{2{,}73Ka}\left(\lg R - \lg \sqrt[n]{x_1 . x_2 . x_3 . \ldots . x_n}\right) \qquad (62)$$

где $a$ — мощность водоносного слоя в *м*;

$S$ — понижение уровня в *м*;

остальные обозначения те же, что и в формуле (61).

А. М. Агаджанов и по существу М. Е. Альтовский дают расчеты для взаимодействующих скважин в основном при наличии прямолинейной зависимости понижений от дебитов.

А. М. Агаджанов при работе двух взаимодействующих скважин для определения дебита одной скважины выводит формулу

$$Q = Aq_1S_1, \qquad (63)$$

где $Q$ — дебит первой скважины при взаимодействии;

$q_1$ — удельный дебит первой скважины без взаимодействия;

$A = \frac{S_1S_2 - S_2h_1}{S_1S_2 - h_1h_2}$ — коэфициент уменьшения дебита скважины при взаимодействии;

$S_1$ — понижение в первой скважине при одиночной откачке из нее;

$S_2$ — понижение во второй скважине при одиночной откачке из нее;

$h_1$ — понижение в первой скважине при одиночной откачке из второй скважины;

$h_2$ — понижение во второй скважине при одиночной откачке из первой скважины.

М. Е. Альтовский для подсчета дебита взаимодействующих скважин предлагает следующие методы: 1) метод суммарного коэфициента снижения дебита, 2) метод суммарной срезки и 3) метод суммарного коэфициента влияния.

По методу суммарного коэфициента снижения дебита дебит скважины во взаимодействующем водосборе можно определить приближенно по формуле[1]

$$Q_i = (1 - \Sigma\alpha_i)\, q_i S_i, \tag{64}$$

где $Q_i$ — дебит скважины при взаимодействии;

$q_i$ — удельный дебит скважины без взаимодействия;

$S_i$ — понижение в скважине без взаимодействия;

$\Sigma\alpha_i$ — сумма коэфициентов снижения дебита.

Коэфициент снижения дебита $\alpha_1$ определяется от влияния других скважин по формуле

$$\alpha_i = \left(1 - \frac{q_{i\,вл}}{q_i}\right), \tag{65}$$

где $q_{i\,вл}$ — удельный дебит при взаимодействии;

значение $q_i$ указано выше.

Дебит водосбора $Q$ будет равен сумме дебитов отдельных скважин.

Из сравнения формул (63) и (64) видно, что при взаимодействии двух скважин $A = 1 - \alpha_i$.

По методу суммарной срезки дебит скважины во взаимодействующем водосборе можно определить приближенно по формуле

$$Q_i = q_i (S_i - \Sigma t_i), \tag{66}$$

где $Q_i$, $q_i$ и $S_i$ — те же обозначения, как и для формулы (64).

$\Sigma t_i$ — суммарная срезка, определяемая как сумма понижений уровня в данной скважине от влияния других скважин.

Метод суммарного коэфициента влияния аналогичен первому методу[2].

Следует отметить, что расчет взаимодействующих водосборов, т. е. определение дебита и положения уровня, по данным опыт-

---

[1] Эта формула дана в нашем выражении.

[2] Более подробное изложение указанных выше методов см. в работе М. Е. Альтовского „Временная инструкция по расчету взаимодействующих артезианских скважин“ [2].

ных откачек, не учитывает изменения режима подземного потока при эксплоатации, что обычно вызывает дополнительное понижение уровней. Это дополнительное понижение уровней бывает весьма значительным (до нескольких десятков метров) и должно учитываться особо (см. § 26).

## 30. Использование метода балансовых подсчетов при оценке эксплоатационных ресурсов

Для оценки эксплоатационных ресурсов по балансу подземных вод можно воспользоваться уравнением

$$W_{\text{II}\,з} - W_{\text{I}\,з} = \varphi h = [(W_{\text{I}} + W_{\text{I}\,д}) - (W_{\text{II}} + W_{\text{II}\,д})] + [(Z_{\text{II}} - W_{\text{II}\,a}) - W_{\text{II}m}] + \\ + [Y_{\text{II}\,n} - (W_{\text{II}\,ок} + W_{\text{II}\,пк})] - Q_э. \qquad (67)$$

Уравнение (67) отличается от уравнения (28) включением в правую его часть величины отбора подземных вод $Q_э$. Остальные обозначения даны в § 13.

Для того чтобы после включения в балансовое уравнение нового члена $Q_э$ сохранить равенство в уравнении (67), необходимо изменить величину других членов. Это положение преимущественно касается:

1) увеличения притока на данный участок из того же горизонта — члена уравнения $W_{\text{I}}$;

2) увеличения инфильтрации поверхностных вод — члена уравнения $Y_{\text{II}\,n}$,

3) уменьшения расхода подземных вод на другие участки водоносных горизонтов — члена уравнения $W_{\text{II}}$,

4) уменьшения расхода открытыми и подземными ключами — членов уравнения $W_{\text{II}\,ок}$ и $W_{\text{II}\,пк}$.

Указанные выше изменения идут в результате развития депрессий уровней подземных вод при отборе $Q_э$. Изменение других членов балансового уравнения также наблюдается. Например отрицательное значение члена $W_{\text{II}\,з} - W_{\text{I}\,з} = \varphi h$ является следствием отбора или регулировочных ресурсов, или вековых запасов.

Уменьшение расхода в зону аэрации $W_{\text{II}\,a}$ и расхода на транспирацию растений $W_{\text{II}\,m}$ может получиться в результате понижения уровня воды.

Изменение членов $W_{\text{I}д}$ и $W_{\text{II}д}$ (поступление из других водоносных горизонтов и расход в другие водоносные горизонты) пока не исследовано, но такое явление также может происходить.

В качестве примера использования уравнения (67) для анализа величины эксплоатационных ресурсов можно указать на подсчет баланса в равнине, сделанный Н. К. Игнатовичем (см. § 14). Эксплоатационные ресурсы Игнатович считает возможным получить там за счет родникового стока (полностью) и за счет уменьшения транспирации растений.

Нужно сказать, что эти выводы Игнатовича являются весьма осторожными, так как и другие члены уравнения (67), конечно, будут изменяться по величине. Это подтверждается следующими данными по изменению расхода ключей.

В конце 1938 г. была пущена в эксплоатацию группа скважин с дебитом около 135 *л/сек*. Ключ № 88, находящийся около этой группы скважин, до эксплоатации давал 15,9 *л/сек*, к осени же 1940 г. ключ уменьшил расход до 5,9 *л/сек*, т. е. на 10 *л/сек*, что значительно меньше дебита скважин.

Таким образом эксплоатационные ресурсы получаются не только за счет изменения величины члена $W_{\Pi o ч}$, но и за счет других членов уравнения (67).

В случае если для водоносного горизонта подсчитан подземный сток, то за эксплоатационные ресурсы можно приближенно принять расход этого стока, близкий к минимальному. При этом нужно учесть понижение уровня воды, обеспечивающее приток указанных эксплоатационных ресурсов к водосборам (см. § 21).

Определение эксплоатационных ресурсов в некоторых случаях можно сделать по оценке инфильтрации, т. е. по членам уравнения (67) $У_{\Pi п}$ и $Z_{\Pi г}$. Член $Z_{\Pi г}$ в этом случае определяют обычно как часть осадков по формуле

$$Z_{\Pi г} = aM, \tag{68}$$

где $a$ — коэфициент просачивания осадков и
$M$ — осадки.

Для подхода к количественной оценке просачивания атмосферных осадков и конденсации следует делать предварительно качественную оценку, пользуясь уравнением (67).

Для проверки величины инфильтрации следует вести наблюдения за колебанием уровня в подземных водах со свободным зеркалом. Если подъем уровня происходит один раз в год, в течение короткого периода, то годовой коэфициент просачивания можно приближенно определить по формуле

$$a = \frac{h\varphi}{M}, \tag{69}$$

где $h$ — высота подъема уровня подземных вод со свободным зеркалом в *мм*;
$\varphi$ — коэфициент водоотдачи (или точнее коэфициент недостатка насыщения);
$M$ — годовой слой осадков в *мм*.

Вычисление эксплоатационных ресурсов по просачиванию можно вести по следующей схеме. Сначала определяется коэфициент просачивания, затем по статистическим данным принимается величина осадков, по формуле (38) вычисляются регулировочные ресурсы и по формуле (39) подземный сток. Расчет эксплоатационных ресурсов по подземному стоку ведется с учетом указаний, приведенных в § 21 и 22.

При наличии данных по инфильтрации из реки в водоносный горизонт или данных по дебиту ключей, выходящих из водоносного горизонта, возможно в ряде случаев принять за эксплоатационные ресурсы величину инфильтрации или дебита ключей.

Для иллюстрации использования такого метода приведем пример оценки эксплоатационных ресурсов подземных вод в долине одной реки. Эти подземные воды приурочены к карсту в каменноугольных известняках и к древнеаллювиальным песчано-галечниковым отложениям.

Водоносные карстовые известняки лежат на глубине от 20 до 35 *м*. В межень на протяжении 10 *км* на участке, где начинается развитие водоносного горизонта в карстовых известняках, русло реки иногда остается сухим, так как вся вода реки поглощается в древний аллювий и карстовые известняки. Ниже по течению реки от этого участка из рассматриваемого водоносного горизонта выходят ключи.

В табл. 8 приведены данные о зависимости дебита ключей и подземного стока ниже ключей от расхода реки и инфильтрации в водоносный горизонт из реки.

Из табл. 8 видно, что питание водоносного горизонта идет за счет инфильтрации из реки.

Таблица 8

| Дата | Расход реки выше области ее исчезновения, *л/сек* | Потери реки в области ее исчезновения | | Суммарный расход ключей | | | Подземный сток ниже ключей | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *л/сек* | % от расхода реки | *л/сек* | % от расхода реки | % от поглощения водоносным горизонтом | *л/сек* | % от поглощения водоносным горизонтом |
| 15/VI | 726 | 574 | 79 | 415 | 57 | 73 | 149 | 26 |
| 28/VI | 382 | 340 | 89 | 232 | 61 | 68 | 108 | 32 |

При увеличении расхода реки поглощение, расход ключей и подземный сток ниже ключей увеличиваются. Но процент подземного стока ниже ключей при увеличении расхода реки и увеличении инфильтрации уменьшается, что указывает на ограниченную пропускную способность водоносного горизонта по течению ниже ключей. Было установлено, что минимальный расход реки составляет около 160 *л/сек*. Полагая, что все это количество просочится, можно принять эксплоатационные ресурсы равными величине минимального расхода реки. Если принять во внимание регулировочные ресурсы, то величину эксплоатационных ресурсов следует увеличить.

## 31. Оценка эксплоатационных ресурсов с учетом использования вековых запасов

В результате использования вековых запасов при эксплоатации будет наблюдаться непрерывное падение уровней. Поэтому количество воды, которое в проекте можно намечать для отбора из вековых запасов ограничивается допустимым снижением уровня воды. Обозначим величину вековых запасов выше принятого расчетного динамического уровня через $Q_в$; годовое количество воды, отбираемое из водоносного горизонта через $Q_э$ и годовое количество подземных вод, обеспеченное питанием, через $Q_е$. Тогда эксплоатация до запроектированной отметки динамического уровня может быть рассчитана на количество лет $t$, которое определяется по формуле

$$t = \frac{Q_в}{Q_э - Q_е}. \tag{70}$$

Для глубоких напорных подземных вод определение вековых запасов $Q_в$ является весьма сложной задачей. В этом случае можно пользоваться данными первого периода эксплоатации и аналогии. Пусть ежегодное понижение уровней воды при отборе постоянного количества воды $Q_э$ будет $S_{год}$. Тогда при общем допустимом понижении против первоначального на величину $S$ и при неизменном годовом расходе эксплоатация может быть рассчитана на число лет, определяемое по формуле

$$t = \frac{S}{S_{год}}. \tag{71}$$

В некоторых случаях при постоянном эксплоатационном отборе использование вековых запасов подземных вод идет лишь в первые годы, а затем наступает динамическое равновесие, при котором $Q_е = Q_э$. При таких условиях в первые годы при постоянном отборе количества воды будет непрерывное падение уровней, но величина этого ежегодного падения будет постепенно уменьшаться, и когда $Q_е$ будет равняться $Q_э$, то падение уровней прекратится[1].

## 32. Учет влияния изменения условий питания на величину эксплоатационных ресурсов

При определении величины эксплоатационных ресурсов необходимо учитывать возможное изменение условий питания подземных вод.

Например питание аллювиальных водоносных горизонтов в Средней Азии часто связано с инфильтрацией из оросительных каналов; если в дальнейшем будут приняты меры к уменьшению

[1] Падение уровней в связи с увеличением сопротивлений в фильтре и в скважине следует учитывать отдельно.

фильтрации из этих каналов, то питание водоносного горизонта уменьшится.

Если водоносный горизонт питается инфильтрационными водами из реки и ее в дальнейшем зарегулируют так, что в продолжение ряда месяцев расход из нее резко сократится, то в связи с этим уменьшится также и питание водоносного горизонта. Если же расход в реке при зарегулировании, в особенности для месяцев ее минимальных расходов, повысится, то инфильтрация может увеличиться, и минимальные расходы подземного потока также увеличатся.

## 33. Выбор методов определения эксплоатационных ресурсов для различных условий

При определении эксплоатационных ресурсов подземных вод необходимо, в первую очередь, получить ясное представление о гидрогеологических условиях залегания, распространения и питания подземных вод. Дело в том, что комплекс гидрогеологических условий (включая сюда гидрологические, метеорологические и прочие элементы), а также изученность их определяют применение тех или иных методов расчета эксплоатируемых ресурсов.

Кроме того, выбор метода для оценки ресурсов подземных вод определяется также и потребностью в воде.

Ниже приводятся условия применения различных методов по оценке эксплоатационных ресурсов.

1) Использование методов подсчета эксплоатационных ресурсов по расходу потока в поперечном сечении рекомендуется применять для неглубоких водоносных горизонтов, приуроченных к рыхлым породам.

Для глубоких водоносных горизонтов, для трещинных вод, а также часто на участках значительных тектонических нарушений указанные методы практически непригодны.

2) Расчет эксплоатационных ресурсов с учетом береговой инфильтрации рекомендуется применять как основной метод для гидрогеологических условий, показанных на рис. 12, т. е. когда неглубокий водоносный горизонт тесно связан с поверхностными водами и при понижении уровня подземных вод происходит инфильтрация поверхностных вод в водоносный горизонт.

3) Расчет эксплоатационных ресурсов по методу пьезометрии рекомендуется применять как основой метод для неглубоких подземных потоков ограниченной ширины (не более 2—4 *км*) при потребности, составляющей заметную часть расхода подземного потока.

4) Расчет эксплоатационных ресурсов с учетом регулировочной емкости водоносного горизонта можно применять как вспомогательный метод при потребности, составляющей значительную часть от расхода подземного потока.

5) Оценка эксплоатационных ресурсов по методу депрессионных воронок рекомендуется как основной метод для глубоких подземных вод в различных гидрогеологических условиях.

6) Оценку эксплоатационных ресурсов подземных вод по методу изучения статических и динамических уровней, по данным опытных откачек и стационарных наблюдений, можно применять для различных гидрогеологических условий при небольшой потребности, когда детальные гидрогеологические исследования будут дороги.

7) Оценка эксплоатационных ресурсов по методу аналогии может применяться для ориентировочных расчетов при различных гидрогеологических условиях с наличием аналога.

8) Оценка эксплоатационных ресурсов по расчету взаимодействующих скважин может служить вспомогательным методом главным образом для неглубоких подземных вод, но при таком расчете, основанном на данных откачек, необходимо особо учитывать изменение режима подземных вод при эксплоатации и соответствующее этому дополнительное падение уровней.

9) Метод балансовых подсчетов при оценке эксплоатационных ресурсов можно применять для таких гидрогеологических условий, при которых имеется возможность получить количественную характеристику хотя бы важнейших элементов питания и стока подземных потоков.

В связи с этим указанный метод практически может применяться для неглубоких и реже для глубоких подземных вод с небольшим распространением по площади — порядка от нескольких квадратных километров до сотен их.

10) Оценку эксплоатационных ресурсов с учетом использования вековых запасов следует применять в том случае, если потребность в воде больше, чем возобновляемые ресурсы подземных вод.

Следует иметь в виду, что определение эксплоатационных ресурсов является весьма сложной задачей и что широкой проверки методики расчета эксплоатационных ресурсов мы не имеем. Оценку эксплоатационных ресурсов следует делать с весьма тщательным анализом принимаемой методики расчета для данных условий. Весьма желательно для проверки применять несколько методов оценки эксплоатационных ресурсов. Кроме того, в ряде случаев оценку эксплоатационных ресурсов следует делать по совокупности нескольких методов.

В качестве примера приведем схему расчета эксплоатационных ресурсов для подземных вод, намеченных к использованию для водоснабжения одного города. Участок, где намечено расположить каптажные сооружения, находится на правом берегу реки, около села А. План района приведен на рис. 16.

Долина реки в районе изысканий врезана в отложение верхнетретичной (неогеновой) толщи. Верхняя часть этой толщи мощностью около 100 *м* представлена конгломератами, в которых отдельными прослоями встречается галечник, гравий, песчаник и мергель. На неогеновой толще лежат четвертичные образования

представленные для древних террас (выше третьей) долины реки — конгломератами и в верхней части лёссом; для более молодых террас (первая, вторая и третья) среди галечников встречаются небольшие прослои и линзы рыхлых конгломератов.

Поверхность галечников молодых террас прикрыта лёссовидными суглинками и супесями, общая мощность которых на третьей террасе доходит до 5 *м*, составляя в среднем 1—3 *м*; на второй террасе мощность мелкозернистых грунтов составляет 0,5—1 *м*, на пойме же галечники не прикрыты мелкоземом.

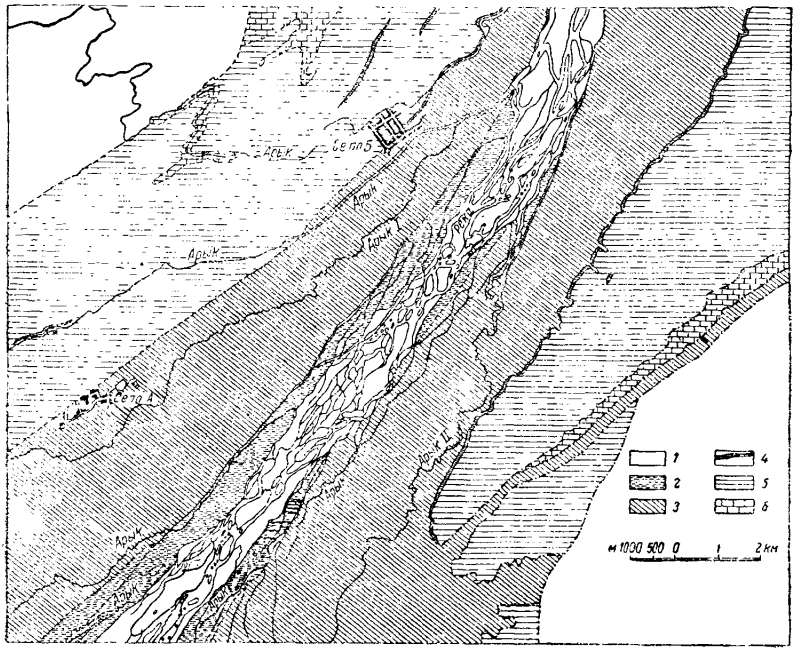



Рис. 16. Геологическая карта долины реки на участке от села Б до села А.

*1*—пойменная терраса (I) и русло реки—галечники; *2*—терраса (II)—галечники с покровом лёссовидного суглинка до 1 *м*; *3*—терраса (III)—галечники с покровом лёссовидного суглинка до 5 *м*; *4*—выходы галечников и конгломератов II, III и более древних террас; *5*—лёсс; *6*—третичные мергели, песчаники, конгломераты.

Рассматриваемый водоносный горизонт приурочен к галечниковым отложениям.

Ширина пойменной террасы, включая и русло реки, составляет около 1,6 *км*. Вторая терраса возвышается над поймой на 2—3 *м*, ширина ее на правом берегу составляет 600—700 *м* и на левом берегу 200—600 *м*; третья терраса ниже села А на правом берегу имеет ширину около 4,5 *км*, выше по долине до села А 3,5 *км* и еще выше, в 9 *км* от села А у села Б — 2 *км*; на левом берегу

против села А ширина третьей террасы доходит до 5 *км*, а немного выше по долине она сразу уменьшается до 2 *км*.

Как по правобережью, так и по левобережью на террасах проходят оросительные каналы.

Общий уклон долины реки составляет около 0,005.

Ниже села А по долине подземные воды выходят на поверхность, образуя болота.

Подземные воды долины реки имеют непосредственную связь с поверхностными водами: река дренирует подземные воды, а воды из оросительной сети местами фильтруются в водоносный горизонт, а местами оросительные каналы дренируют подземные воды.

Общее движение подземного потока направлено вдоль долины и идет с уклоном 0,005, но при этом около реки и оросительных каналов гидроизогипсы отклоняются от нормали к оси долины.

Уровень подземных вод на пойме и второй террасе залегает в среднем на глубине до 2 *м* и на третьей террасе на глубине до 2—5 *м* (на март месяц 1938 г.).

По данным 1936 г., минимум стояния подземных вод приходится на февраль, по данным же других лет — на март — апрель, а максимум — на июль. Амплитуда колебаний составляет около 3 *м*.

Для оценки эксплоатационных ресурсов получены следующие данные.

1. Естественный расход $Q_e$ подземного потока в поперечнике через село А определен по формулам Дарси (1) и (12) в количестве 2,25 $м^3/сек$.

2. Естественный расход подземного потока для проверки определен также методом расчета по полосе питания колодца путем построения карты гидроизогипс.

По этому методу $Q_e$ определен в 2,15 $м^3/сек$.

3. По формуле Дарси подсчитан и дренаж реки, определенный в среднем на 1 *пог. м* русла в следующих цифрах:

а) при высоком стоянии уровня подземных вод (на 6/IX 1936 г.):

| | | |
|---|---|---|
| по правому берегу | в 0,212 $м^3/сек$ | на 1 *пог. км* |
| по левому берегу | в 0,097 „ | „ |
| Итого | 0,309 $м^3/сек$ | на 1 *пог. км* |

б) при низком стоянии уровня подземных вод (на 12/IV 1936 г.):

| | | |
|---|---|---|
| по правому берегу | в 0,077 $м^3/сек$ | на 1 *пог. км* |
| по левому берегу | в 0,058 „ | „ |
| Итого | 0,135 $м^2/сек$ | на 1 *пог. км* |

По данным 1937 г., дренаж в реке получился несколько меньшим: при высоком стоянии уровня подземных вод он определен в 0,253 $м^3/сек$. на 1 *пог. км*, т. е. на 22% меньше, а при низком стоянии уровня в 0,082 $м^3/сек$ на 1 *пог. км*, т. е. на 64% меньше.

Подсчет количества подземных вод дренирующихся в реку, определять гидрометрическим методом было нецелесообразно, так как суммарный дренаж от минимального расхода реки составлял около 2%, а от максимального — сотые доли процента.

4. По данным же гидрометрических наблюдений, подсчитан дренаж подземных вод в левобережный арык II; этот дренаж на 1 *пог. км* составил в среднем 0,173 *м*³/*сек*. Дренаж идет также в правобережный арык I и в другие арыки.

5. Регулировочные ресурсы $Q_p$, по данным наблюдений за колебанием уровня подземных вод, подсчитаны (за год) по формуле (38) в количестве 26 млн. *м*³ воды на 10 *км* по длине долины. Продолжительность питания 175 дней.

6. Минимальный расход реки в результате использования ее воды для ирригации уменьшается с 60 до 10 *м*³/*сек*.

7. В случае понижения уровня подземных вод ниже уровня реки вода последней будет частично фильтроваться в водоносный горизонт. Величину этой фильтрации, по литературным данным, можно принять на 1 *км* русла в 1% от расхода реки.

8. Установлено, что формирование подземного потока идет в 30 *км* выше по долине от села *А* за счет питания из саев, а также за счет инфильтрации речной воды.

9. Потребность в воде намечена в количестве 2,3 *м*³/*сек*. Для удовлетворения ее величина естественного расхода (в поперечном сечении потока) в количестве $\frac{2{,}25+2{,}15}{2}=2{,}20$ *м*³/*сек*[1] недостаточна. Кроме того, в наших условиях, когда подземный поток идет на значительное расстояние вниз по направлению долины, рассчитывать на полный захват нельзя.

Поэтому при определении эксплоатационных ресурсов, обеспечивающих потребность в 2,3 *м*³/*сек*, особое внимание следует уделить анализу изменения режима подземного потока при эксплоатации.

При откачке из водосборов подземных вод уровень в районе эксплоатации понизится. Поэтому необходимо водосборы распределить так и уровень воды настолько понизить, чтобы можно было не только использовать часть естественного расхода подземного потока вдоль долины, но и привлечь к водосборам другие „статьи" баланса подземных вод и, в первую очередь, воды, дренирующиеся в естественных условиях в реку и в оросительные каналы. Кроме того, при понижении уровня подземных вод ниже уровня реки, эта река будет часть воды отдавать в водоносный горизонт.

Примем, что депрессия уровней при эксплоатации водосборов распространится на 10 *км* как по длине, так и по ширине до границ между третьими и четвертыми террасами.[2]

---

[1] Мы берем среднее арифметическое из определений по двум методам.

[2] Расчет водосборов подтверждает, что границы депрессии приняты правильно. Этот расчет здесь не приводится. Расчет можно сделать по формуле Форхгеймера для взаимодействующих колодцев.

Исходя из этих положений, определим эксплоатационные ресурсы.

Примем для расчета минимальный дренаж в реку в 0,082 *м*³/*сек* и дренаж в левобережный арык II в 0,173 *м*³/*сек* на 1 *пог км*. Сумма этих дренажных вод на 10 *км* долины дает $(0{,}082 + 0{,}173) \times 10 = 2{,}55$ *м*³/*сек*. Годовой подземный сток ($Q_г$) по длине долины на 10 *км* по формуле (39) выразится в количестве:

$$Q_г = 365 \frac{Q_р}{365 - t} = 365 \times \frac{26{,}000{,}000}{365 - 175} = 52{,}6 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год},$$

что дает средний секундный расход в 1,65 *м*³.

Подземный поток формируется выше села А и уже с расходом около 2,2 *м*³/*сек* подходит к этому селению; ниже района расположения водосборов подземный поток имеет примерно такой же расход. Поэтому подсчитанный по регулировочным ресурсам по формуле (39) подземный сток должен дренироваться в реку и арыки; величина этого подземного стока отличается на 35% $\left(\frac{2{,}55 - 1{,}65}{2{,}55} \cdot 100\right)$ от величины дренажных вод в реку и левобережный арык II[1]. Из осторожности, а также с учетом возможного переустройства ирригационных каналов, в расчет баланса примем 50% от подсчитанной величины дренажных вод, т. е. $2{,}55 \times 0{,}5 = 1{,}28$ *м*³/*сек* (меньше подземного стока, подсчитанного по регулировочным ресурсам). Фильтрация из реки на 10 *км* русла при расходе в 10 *м*³/*сек* выразится в количестве $10 \times 0{,}01 \times 10 = 1$ *м*³/*сек*.

Примем, что при районном понижении уровня во время эксплоатации в среднем на 25% от мощности водоносного слоя можно получить 25% от естественного расхода вдоль долины, что даст $2{,}50 \times 0{,}25 = 0{,}55$ *м*³/*сек*.

Тогда эксплоатационные ресурсы составят приближенно (с запасом) $1{,}28 + 1{,}00 + 0{,}55 = 2{,}83$ *м*³/*сек*. Эти ресурсы больше потребности (2,3*м*³/*сек*) и, следовательно, обеспечивают ее.

## ГЛАВА VII

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ НИСХОДЯЩИХ КЛЮЧЕЙ

### 34. Учет гидрогеологических условий при оценке дебитов ключей

При проектировании использования нисходящих ключей необходимо иметь данные об изменении дебита в течение года и ряда лет. Кроме того, для отдельных типов ключей (например для перемежающихся или сифонных) требуются сведения о коле-

[1] Учитывая сложность условий, разницу в 35% следует признать удовлетворительной.

бании дебита за более короткие интервалы времени — несколько суток, сутки и даже меньше. Оценка производительности ключей обычно дается на основании наблюдений за их дебитом и сопоставления этого дебита с факторами, влияющими на изменение его. Но особенно важно при анализе изменения дебита ключей учитывать гидрогеологические условия выхода и изменение этих условий при каптаже. Для иллюстрации приведем два примера. На рис. 17 показан ключ $Q_1$, получившийся в результате частичного подпора водоносного слоя водоупорной породой. Во время минимального расхода в водоносном горизонте ключ $Q_1$ будет резко уменьшать свой дебит, и вода будет выходить ниже ключом $Q_2$; при этом выход ключа $Q_2$ может быть ниже уровня реки и при поверхностном осмотре может не обнаружиться. Если каптировать ключ (рис. 18) путем захвата полностью подземного потока, то расход ключа $Q_1$, очевидно, будет составлять сумму $Q_1 + Q_2$.

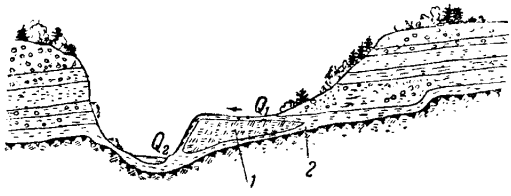



Рис. 17. Ключ, получившийся в результате частичного подпора водоносного слоя водоупорной породой.

$Q_1$ — верхний ключ; $Q_2$ — нижний ключ; *1* — водонепроницаемые породы; 2 — водоносная порода.

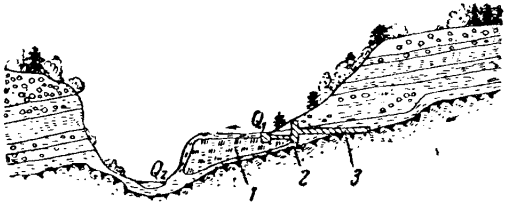



Рис. 18. Каптаж ключа путем захвата полностью подземного потока.

$Q_1$ — верхний ключ; $Q_2$ — нижний ключ; *1* — водонепроницаемая порода; 2 — водоносная порода; *3* — каптаж.

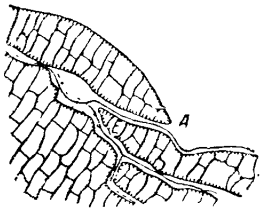



Рис. 19. Ключ с сильно меняющимся дебитом из трещиноватой породы.

*A* — выход ключа на поверхность; *E* — место разделения струи ключа.

На рис. 19 показан ключ с сильно меняющимся дебитом из трещиноватой породы. Если на этом ключе дебит измерять у выхода в точке *A*, то учтется лишь часть расхода; при замере в точке *E* расход будет больше.

Путем рационального каптажа дебит ключа может быть увеличен. Например, по данным Принца *[17]* дебит каптажа в Нанси, вследствие подпора [1], увеличен с 6—7 до 60 *л/сек*. Некоторые наблюдения показали, что значительная расчистка выходов ключей и понише-

[1] Подпор ключа дает возможность повысить минимум расхода, но это мероприятие следует проводить лишь после тщательного гидрогеологического изучения, так как ключ при подпоре может найти выход в другом месте и тогда вместо повышения минимума расхода каптаж останется без воды.

ние бытового уровня влекут за собой в ряде случаев снижение минимумов. Такое явление наблюдалось на ключах Кайзербруннен и Стиксеншейн около г. Вены *[17]*.

Однако, например, известно, что при наличии ряда дериватов снижение бытового уровня у главного выхода ключа повышает в ряде случаев как общий расход, так и минимум его.

Изменение величины питания водоносного горизонта небольшого распространения довольно быстро — через несколько дней, а иногда и через несколько часов—сказывается на расходе ключей. Однако, известны также случаи, когда это влияние обнаруживается только через 1—$1^1/_2$ года; такой пример медленного влияния осадков в области питания на дебит кяризов описан Д. Г. Шапошниковым для северного подножья Копет-Дага.

Таким образом только тщательное и глубокое изучение гидрогеологических условий позволяет правильно анализировать данные наблюдений за дебитом ключа и наметить рациональный каптаж.

## 35. Неравномерность расхода ключей, их характеристики и составление хронологического графика

Изменение дебита ключа является весьма важным элементом для оценки практического использования его. Средний многолетний секундный расход $Q_o$ мы будем называть нормой расхода, а средний годовой расход $Q_г$ — годовой нормой расхода. Отношение расхода за любой отрезок времени $Q$ к норме расхода $Q_o$ мы будем называть модульным коэфициентом $K$, который, следовательно, равен

$$K = \frac{Q}{Q_o}.$$

Отношение максимального расхода $Q_{max}$ к минимуму $Q_{min}$ будем называть коэфициентом неравномерности $K_н$

$$K_н = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}.$$

Важнейшими характеристиками дебита ключа являются: норма расхода, минимальный и максимальный расход, коэфициент неравномерности и модульный коэфициент для минимального расхода.

Эти характеристики изменяются в зависимости от срока наблюдений.

Минимальный расход вводится обычно при оценке полезной отдачи ключа как расчетный.

Одни только наблюдения за год или за несколько лет недостаточны; на основании их выводить характеристики для ключей без анализа закономерностей режима нельзя. Так как наблюдения обычно производятся в относительно короткие сроки, то

необходимо путем всестороннего анализа выявлять перспективы изменения дебита.

Для оценки изменения дебита ключа во времени может служить хронологический график дебита ключа.

На рис. 20 показан такой хронологический график дебита для одного из ключей Крыма; продолжительность наблюдений была 13 лет.

По этому графику наглядно видны величины расходов, а также распределение по периодам года минимумов и максимумов расхода

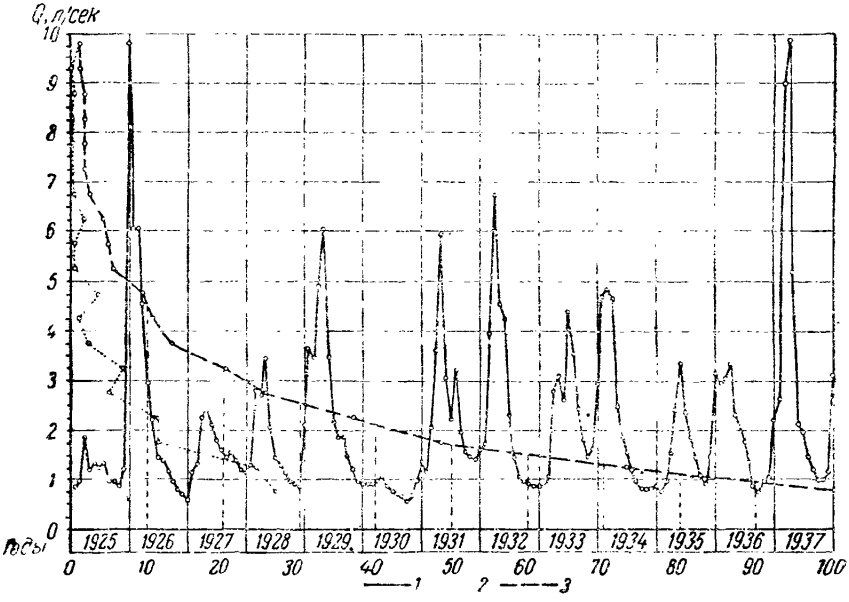



Рис. 20. Графики расхода ключа — хронологический, частоты и обеспеченности.

*1* — хронологический график; 2 — кривая частоты; *3* — кривая обеспеченности.

Хронологический график дебита ключа на рис. 20 составлен по месячным нормам расхода. На хронологический график целесообразно также наносить элементы, от которых зависит дебит ключа, т. е. для соответствующих случаев осадки, температуру, влажность воздуха, расход, уровни поверхностных вод и проч. По такому совмещенному графику можно судить о факторах, влияющих на дебит ключа.

## 36. Обеспеченность дебита ключей. Кривые распределения и обеспеченности

Для суждения о повторяемости дебитов различной величины можно воспользоваться зависимостью функционального характера между величиной дебита и частотой их повторяемости.

Таблица 9

| Месяцы | Годы | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1925 | 1926 | 1927 | 1928 | 1929 | 1930 | 1931 | 1932 | 1933 | 1934 | 1935 | 1936 | 1937 |
| | Расход воды в *л/сек* | | | | | | | | | | | | |
| I | 0,85 | 6,05 | 1,15 | 1,30 | 3,65 | 0,90 | 1,15 | 1,70 | 0,85 | 4,70 | 0,75 | 2,95 | 2,60 |
| II | 0,95 | 6,05 | 1,30 | 2,60 | 3,40 | 0,90 | 2,05 | 3,95 | 1,05 | 4,65 | 0,95 | 3,05 | 8,95 |
| III | 1,35 | 4,55 | 2,25 | 2,70 | 4,90 | 0,95 | 3,60 | 6,75 | 2,60 | 4,65 | 1,55 | 3,35 | 9,80 |
| IV | 1,20 | 2,95 | 2,40 | 3,45 | 6,05 | 1,05 | 5,95 | 4,55 | 3,10 | 2,45 | 2,40 | 2,30 | 5,20 |
| V | 1,35 | 2,20 | 2,10 | 2,05 | 3,45 | 0,85 | 3,05 | 4,25 | 2,60 | 1,85 | 3,35 | 2,05 | 2,10 |
| VI | 1,25 | 1,45 | 1,80 | 1,45 | 2,15 | 0,75 | 2,20 | 2,30 | 4,40 | 1,50 | 2,35 | 1,75 | 1,95 |
| VII | 1,35 | 1,40 | 1,60 | 1,30 | 1,85 | 0,70 | 3,20 | 1,45 | 3,55 | 1,20 | 1,85 | 1,35 | 1,45 |
| VIII | 0,95 | 1,15 | 1,45 | 1,15 | 1,85 | 0,65 | 1,95 | 1,05 | 2,45 | 0,95 | 1,45 | 0,85 | 1,20 |
| IX | 0,95 | 0,95 | 1,55 | 0,95 | 1,45 | 0,55 | 1,55 | 0,95 | 1,80 | 0,80 | 1,10 | 0,75 | 0,93 |
| X | 0,85 | 0,80 | 1,40 | 0,90 | 1,20 | 0,65 | 1,45 | 0,90 | 1,45 | 0,80 | 0,90 | 0,95 | 0,93 |
| XI | 1,20 | 0,70 | 1,20 | 0,85 | 0,95 | 0,95 | 1,40 | 0,85 | 1,60 | 0,80 | 1,45 | 1,05 | 1,15 |
| XII | 9,80 | 0,60 | 1,15 | 2,10 | 0,90 | 1,35 | 1,60 | 0,85 | 2,95 | 0,85 | 3,15 | 2,20 | 3,10 |
| Σ | 22,55 | 28,85 | 19,35 | 21,00 | 31,85 | 10,25 | 29,15 | 29,55 | 28,60 | 25,45 | 21,25 | 22,60 | 39,41 |
| Среднее $Q_0$ | 1,73 | 2,22 | 1,49 | 1,61 | 2,45 | 0,78 | 2,24 | 2,27 | 2,20 | 1,96 | 1,63 | 1,74 | 3,03 |

Таблица 10

| Интервал *л/сек* | От | 10 | 9,5 | 9 | 8,5 | 8 | 7,5 | 7 | 6,5 | 6 | 5,5 | 5 | 4,5 | 4 | 3,5 | 3 | 2,5 | 2 | 1,5 | 1 | 0,5 | Итого |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | До | 9,5 | 9 | 8,5 | 8 | 7,5 | 7 | 6,5 | 6 | 5,5 | 5 | 4,5 | 4 | 3,5 | 3 | 2,5 | 2 | 1,5 | 1 | 0,5 | 0 | |
| Число месяцев | | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 1 | 1 | 6 | 2 | 4 | 11 | 8 | 18 | 18 | 38 | 42 | — | 156 |

Такие функции носят название функций распределения; их лучше всего представить в виде ломаной кривой, называемой полигоном — многоугольником распределения.

Для построения полигона дебита ключа следует амплитуду крайних отклонений этого дебита разделить на равные интервалы и производить подсчет лет, месяцев или дней в каждом интервале.

Поясним построение полигона на примере (рис. 20) ключа в Крыму. Наблюдения велись 13 лет; имеются данные о среднемесячных расходах ключа, которые приводятся в табл. 9.

Наибольшие расходы доходят до 10 *л/сек*. Делим расходы на интервалы по 0,5 *л/сек* и подсчитываем число месяцев, на которое приходятся расходы в этом интервале. Результаты подсчета приведены в табл. 10.

Затем из середины интервалов проводятся абсциссы (в масштабе), соответствующие числу месяцев с расходом в данном интервале. Концы этих абсцисс соединяются и, таким образом, получается полигон, или многоугольник распределения.

При увеличении числа лет наблюдений и уменьшении интервала ломаная кривая-полигон в пределе приближается к плавной кривой, которая называется кривой частоты или кривой распределения. Кривая распределения дает наглядное представление о повторяемости различных дебитов.

Для оценки обеспеченности расходов ключей можно воспользоваться кривой обеспеченности или продолжительности. Эта кривая получается путем последовательного суммирования кривой частоты. При этом обеспеченность обычно определяется в процентах.

Построение кривой обеспеченности видно на рис. 20.

Кривая обеспеченности дает возможность сразу определить обеспеченность расхода.

Например, на рис. 20 обеспеченности на 90% соответствует расход 0,95 *л/сек*. Обеспеченность на 90% показывает, что на 90% по времени можно ожидать расходы, которые будут больше 0,95 *л/сек*. Такая обеспеченность (на 90%) также значит, что из 100 месяцев следует ожидать 10 месяцев с расходом меньше 0,95 *л/сек*.

При неравномерной потребности в течение года следует составлять по отдельным интервалам времени отдельные кривые обеспеченности.

### 37. Анализ дебита ключей по теории вероятностей и построение теоретической кривой обеспеченности

Со временем изменяются не только распределение и величина метеорологических и гидрологических явлений, но также и геологические условия, которые определяют питание и условие выхода ключа.

Таким образом, простая статистика изменения дебита ключа не только при коротких, но и при длительных наблюдениях тре-

бует анализа отклонения величины и распределения этого дебита. Для оценки закономерности явлений изменения дебита ключа можно воспользоваться методами математической статистики.

При определении характеристики дебита ключа наибольший интерес представляет изменение норм расхода, годовой нормы расхода, минимального и максимального расходов, а также многолетнее изменение расходов за определенные месяцы.

Среднее арифметическое ряда или, в данном случае, норма расхода определяется формулой

$$x_o = \frac{\sum_1^n x_i}{n}, \tag{72}$$

где $x_o$ — среднее арифметическое;

$\sum_1^n x_i$ — сумма признаков, или аргументов, в нашем случае — дебитов;

$n$ — число всех объектов, в нашем случае — наблюдений дебитов.

Истинное среднее значение $x$ получается только в том случае, если число наблюдений $n$ бесконечно велико. Среднее арифметическое $x_o$ для ограниченного ряда наблюдений является приближенным, отличающимся от истинного $x$, на величину $\sigma_o$. Величина $\sigma_o$ называется ошибкой арифметической середины и для средней ошибки симметричного ряда выражается следующей формулой

$$\sigma_o = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \tag{73}$$

где $\sigma$ — среднее квадратичное отклонение (стандартная вариация) или средняя ошибка отдельного наблюдения

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - x_o)^2}{n-1}} \tag{74}$$

где $n$ — число наблюдений.

При $n > 30$ в знаменателе формулы (74) можно ставить не $n-1$, а $n$.

$\sigma$ и $\sigma_o$ — являются именованными числами.

Характеристика вариации в безразмерной величине, т. е. коэфициент вариации $C_v$, определяется по формуле

$$C_v = \frac{\sigma}{x_o} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (x_i - x_o)^2}{n-1}}}{x_o} = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{x_i}{x_o} - 1\right)^2}{n-1}} = \frac{\sqrt{\sum (k-1)^2}}{n-1}, \tag{75}$$

где $\frac{x_i}{x_o}$ обозначено через $k$; этот коэфициент мы назвали модульным.

Число наблюдений, при которых получается среднее арифметическое с заданной точностью, определяется по формуле

$$n = \frac{10^4 \, C_v^2}{(\sigma\%)^2}. \tag{76}$$

Для характеристики асимметричности ряда наблюдений служит коэфициент асимметрии

$$C_s = \frac{\Sigma (x_i - x_0)^3}{n \sigma_3} = \frac{\Sigma (k-1)^3}{n C_v^3}. \qquad (77)$$

При $\Sigma (x_i - x_0) = 0$ ряд будет симметричен.

Коэфициент асимметрии дает возможность сравнивать ряды с одинаковыми средними арифметическими и разными $n$ и $\sigma$.

Следует иметь в виду, что при малом количестве наблюдений среднеквадратичная ошибка коэфициента асимметрии получается большой. Так, при $n = 10$ ошибка составляет 77,5% от величины коэфициента асимметрии, при $n = 20$ ошибка будет 55%, а при $n = 100$ даже 24,5%.

Формулы для вероятных ошибок, которые возможны для 50% случаев, будут следующие:

для $x_0$ $$\Delta x_{0\text{-}50} = \pm 0{,}67 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \qquad (78)$$

для $\sigma$ $$\Delta \sigma_{50} = \pm 0{,}67 \frac{\sigma}{\sqrt{2n}}; \qquad (79)$$

для $C_v$ $$\Delta C_{v50} = \pm 0{,}67 \frac{C_v}{\sqrt{2n}} \sqrt{1 + 2C_v^2}. \qquad (80)$$

Предельную ошибку возможно принять равной учетверенной вероятной.

Формулы ошибок (78), (79) и (80) относятся к рядам симметричного вида; поэтому они не отвечают полностью ошибкам в асимметричных рядах.

Для построения теоретической кривой обеспеченности расхода можно воспользоваться функцией распределения Шарлье, которая соответствует общему виду кривой распределения.

Построение производится по следующей схеме вычислений:

1) по формуле (72) вычисляется норма расхода;
2) определяется модульный коэфициент;
3) по формуле (75) определяется коэфициент вариации;
4) по формуле $x = \frac{k-1}{C_v}$ вычисляется нормированная величина признака;
5) по нормированной величине признака определяется $\varphi(x)$ из табл. 11 и затем $\Sigma \varphi(x)$;
6) определяется $\Sigma x \varphi(x)$;
7) вычисляются экспотенциально взвешенные моменты по формулам

$$b_0 = \frac{2\sqrt{\pi}}{n} \sum \varphi(x), \qquad (81)$$

$$b_1 = \frac{2\sqrt{\pi}}{n} \sum x_i \varphi(x); \qquad (82)$$

8) определяется эксцесс $E$ по формуле

$$E = 4(b_0 - 1); \tag{83}$$

9) по формуле (84) вычисляется характеристика асимметрии

$$S = 4b_1 \tag{84}$$

(при $S = 0$ кривая симметрична и совпадает с нормальной кривой распределения Гаусса);

10) по асимметрии $S$ из табл. 12 находятся отклонения ординат кривых обеспеченности от середины для разных процентов обеспеченности;

11) по эксцессу находят в табл. 13 поправку на эксцесс;

Таблица 11

**Значения** $y = \varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$

| x | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,0 | 3989 | 3989 | 3989 | 3988 | 3986 | 3984 | 3982 | 3980 | 3977 | 3973 |
| 0,1 | 3970 | 3965 | 3961 | 3956 | 3951 | 3945 | 3939 | 3932 | 3925 | 3918 |
| 0,2 | 3910 | 3902 | 3894 | 3885 | 3876 | 3867 | 3857 | 3847 | 3836 | 3825 |
| 0,3 | 3814 | 3802 | 3790 | 3778 | 3765 | 3752 | 3739 | 3725 | 3712 | 3797 |
| 0,4 | 3683 | 3668 | 3653 | 3637 | 3621 | 3605 | 3589 | 3572 | 3555 | 3588 |
| 0,5 | 3521 | 3503 | 3485 | 3467 | 3448 | 3429 | 3410 | 3391 | 3372 | 3352 |
| 0,6 | 3332 | 3312 | 3292 | 3271 | 3251 | 3230 | 3209 | 3187 | 3166 | 3144 |
| 0,7 | 3123 | 3101 | 3079 | 3056 | 3034 | 3011 | 2989 | 2966 | 3943 | 2920 |
| 0,8 | 2897 | 2874 | 2850 | 2827 | 2803 | 2780 | 2756 | 2732 | 2709 | 2685 |
| 0,9 | 2661 | 2637 | 2613 | 2589 | 2565 | 2541 | 2516 | 2492 | 2468 | 2444 |
| 1,0 | 2420 | 2396 | 2371 | 2347 | 2323 | 2299 | 2275 | 2251 | 2227 | 2203 |
| 1,1 | 2179 | 2155 | 2131 | 2107 | 2083 | 2059 | 2036 | 2012 | 1989 | 1965 |
| 1,2 | 1942 | 1919 | 1895 | 1872 | 1849 | 1826 | 1804 | 1781 | 1758 | 1736 |
| 1,3 | 1714 | 1631 | 1669 | 1647 | 1626 | 1604 | 1582 | 1561 | 1539 | 1518 |
| 1,4 | 1497 | 1476 | 1456 | 1435 | 1415 | 1394 | 1374 | 1354 | 1334 | 1315 |
| 1,5 | 1295 | 1276 | 1257 | 1238 | 1219 | 1200 | 1182 | 1163 | 1145 | 1127 |
| 1,6 | 1109 | 1092 | 1074 | 1057 | 1040 | 1023 | 1006 | 0989 | 0973 | 0957 |
| 1,7 | 0940 | 0925 | 0909 | 0893 | 0878 | 0863 | 0848 | 0838 | 0818 | 0804 |
| 1,8 | 0790 | 0775 | 0761 | 0748 | 0754 | 0721 | 0707 | 0694 | 0681 | 0669 |
| 1,9 | 0656 | 0644 | 0632 | 0620 | 0608 | 0596 | 0584 | 0573 | 0562 | 0551 |
| 2,0 | 0540 | 0529 | 0519 | 0508 | 0498 | 0488 | 0478 | 0468 | 0459 | 0449 |
| 2,1 | 0440 | 0431 | 0422 | 0413 | 0404 | 0396 | 0387 | 0379 | 0371 | 0363 |
| 2,2 | 0355 | 0347 | 0339 | 0332 | 0325 | 0317 | 0310 | 0303 | 0297 | 0290 |
| 2,3 | 0283 | 0277 | 0270 | 0264 | 0258 | 0252 | 0246 | 0241 | 0235 | 0229 |
| 2,4 | 0224 | 0219 | 0213 | 0208 | 0203 | 0198 | 0194 | 0189 | 0184 | 0180 |
| 2,5 | 0175 | 0171 | 0167 | 0163 | 0158 | 0154 | 0151 | 0147 | 0143 | 0139 |
| 2,6 | 0136 | 0132 | 0129 | 0126 | 0122 | 0119 | 0116 | 0113 | 0110 | 0107 |
| 2,7 | 0104 | 0101 | 0099 | 0096 | 0093 | 0091 | 0088 | 0086 | 0084 | 0081 |
| 2,8 | 0079 | 0077 | 0075 | 0073 | 0071 | 0069 | 0067 | 0065 | 0063 | 0061 |
| 2,9 | 0060 | 0058 | 0056 | 0055 | 0053 | 0051 | 0050 | 0048 | 0047 | 0046 |
| 3,0 | 0044 | 0033 | 0024 | 0017 | 0012 | 0009 | 0006 | 0004 | 0003 | 0002 |
| 4,0 | 0001 | 0001 | 0001 | 0000 | 0000 | 0000 | 0000 | 0000 | 0000 | 0000 |

Примечание. Все значения умножены на 10 000.

Таблица 12

**Отклонения ординат кривых обеспеченности от средины в зависимости от значений $S$ при $E=0$ и $C_v=1{,}0$ по функции распределения Шарлье**

| Коэфициент асимметрии $S$ | Значение обеспеченности в % | | | | | | | | | | | | | | | | | | Коэфициент асимметрии $S$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,5 | 1 | 3 | 5 | 10 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 75 | 80 | 90 | 95 | 97 | 99 | 99,5 | |
| — 0,50 | 1,82 | 1,75 | 1,57 | 1,44 | 1,21 | 0,89 | 0,75 | 0,62 | 0,39 | — 0,16 | — 0,08 | — 0,38 | — 0,55 | — 0,77 | — 1,44 | — 2,00 | — 2,32 | — 2,88 | — 3,16 | — 0,50 |
| — 0,40 | 1,92 | 1,84 | 1,62 | 1,47 | 1,22 | 0,88 | 0,74 | 0,61 | 0,37 | — 0,13 | — 0,12 | — 0,41 | — 0,58 | — 0,79 | — 1,40 | — 1,92 | — 2,25 | — 2,80 | — 3,08 | — 0,40 |
| — 0,30 | 2,03 | 1,93 | 1,68 | 1,50 | 1,23 | 0,87 | 0,72 | 0,59 | 0,34 | — 0,10 | — 0,15 | — 0,44 | — 0,61 | — 0,81 | — 1,36 | — 1,84 | — 2,16 | — 2,71 | — 3,00 | — 0,30 |
| — 0,20 | 2,20 | 2,05 | 1,74 | 1,54 | 1,24 | 0,86 | 0,70 | 0,57 | 0,31 | — 0,07 | — 0,19 | — 0,47 | — 0,63 | — 0,82 | — 1,34 | — 1,77 | — 2,06 | — 2,61 | — 2,92 | — 0,20 |
| — 0,10 | 2,40 | 2,18 | 1,80 | 1,59 | 1,26 | 0,85 | 0,68 | 0,55 | 0,28 | — 0,03 | — 0,22 | — 0,50 | — 0,65 | — 0,83 | — 1,31 | — 1,70 | — 1,96 | — 2,46 | — 2,73 | — 0,10 |
| 0,00 | 2,60 | 2,33 | 1,87 | 1,64 | 1,27 | 0,84 | 0,68 | 0,53 | 0,25 | 0,00 | — 0,25 | — 0,53 | — 0,68 | — 0,84 | — 1,27 | — 1,65 | — 1,87 | — 2,32 | — 2,60 | 0,00 |
| 0,10 | 2,75 | 2,46 | 1,96 | 1,70 | 1,30 | 0,83 | 0,66 | 0,50 | 0,22 | — 0,04 | — 0,29 | — 0,55 | — 0,70 | — 0,85 | — 1,27 | — 1,60 | — 1,80 | — 2,20 | — 2,40 | 0,10 |
| 0,20 | 2,90 | 2,60 | 2,06 | 1,78 | 1,34 | 0,82 | 0,64 | 0,48 | 0,19 | — 0,07 | — 0,31 | — 0,57 | — 0,71 | — 0,86 | — 1,25 | — 1,55 | — 1,73 | — 2,06 | — 2,20 | 0,20 |
| 0,30 | 3,00 | 2,69 | 2,14 | 1,85 | 1,36 | 0,80 | 0,61 | 0,44 | 0,15 | — 0,10 | — 0,34 | — 0,59 | — 0,72 | — 0,87 | — 1,23 | 1,50 | — 1,67 | — 1,92 | — 2,03 | 0,30 |
| 0,40 | 3,10 | 2,77 | 2,24 | 1,92 | 1,40 | 0,79 | 0,59 | 0,41 | 0,12 | — 0,13 | — 0,37 | — 0,61 | — 0,74 | — 0,88 | — 1,21 | — 1,47 | — 1,62 | — 1,85 | — 1,92 | 0,40 |
| 0,50 | 3,17 | 2,86 | 2,30 | 2,00 | 1,44 | 0,77 | 0,55 | 0,38 | 0,10 | — 0,15 | — 0,39 | — 0,62 | — 0,75 | — 0,88 | — 1,21 | — 1,44 | — 1,57 | — 1,76 | — 1,82 | 0,50 |
| 0,60 | 3,20 | 2,92 | 2,39 | 2,07 | 1,49 | 0,75 | 0,52 | 0,34 | 0,05 | — 0,19 | — 0,42 | — 0,64 | — 0,76 | — 0,89 | — 1,19 | — 1,41 | — 1,53 | — 1,69 | — 1,74 | 0,60 |
| 0,70 | 3,27 | 2,98 | 2,45 | 2,14 | 1,55 | 0,73 | 0,49 | 0,31 | 0,02 | — 0,22 | — 0,44 | — 0,65 | — 0,77 | — 0,90 | — 1,18 | — 1,39 | — 1,49 | — 1,63 | — 1,68 | 0,70 |
| 0,80 | 3,30 | 3,03 | 2,51 | 2,18 | 1,60 | 0,70 | 0,45 | 0,26 | — 0,02 | — 0,24 | — 0,46 | — 0,67 | — 0,78 | — 0,90 | — 1,18 | — 1,37 | — 1,46 | — 1,59 | — 1,63 | 0,80 |
| 0,90 | 3,33 | 3,06 | 2,57 | 2,26 | 1,68 | 0,66 | 0,41 | 0,23 | — 0,06 | — 0,27 | — 0,48 | — 0,68 | — 0,78 | — 0,90 | — 1,17 | — 1,34 | — 1,43 | — 1,55 | — 1,59 | 0,90 |
| 1,0 | 3,38 | 3,13 | 2,62 | 2,31 | 1,73 | 0,63 | 0,37 | 0,19 | — 0,07 | — 0,29 | — 0,49 | — 0,69 | — 0,79 | — 0,91 | — 1,17 | — 1,33 | — 1,41 | — 1,52 | — 1,55 | 1,00 |

Таблица 13

**Поправки на эксцесс отклонений ординат кривых обеспеченности при $C_v = 1{,}0$**

| Эксцесс | Значения обеспеченности в % | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,5 | 1 | 3 | 5 | 10 | 20 | 25 | 30 | 40 |
| −0,40 | −0,475 | −0,325 | −0,062 | +0,050 | +0,125 | +0,222 | +0,212 | +0,212 | +0,150 |
| −0,20 | −0,390 | −0,250 | −0,050 | +0,030 | +0,095 | +0,110 | +0,115 | +0,105 | +0,055 |
| −0,10 | −0,250 | −0,150 | −0,040 | +0,020 | +0,050 | +0,070 | +0,060 | +0,050 | +0,025 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| +0,10 | +0,330 | +0,230 | +0,045 | −0,020 | −0,065 | −0,070 | −0,060 | −0,045 | −0,025 |
| +0,20 | +0,570 | +0,435 | +0,115 | −0,045 | −0,135 | −0,125 | −0,110 | −0,085 | −0,040 |
| +0,40 | +0,875 | +0,775 | +0,400 | −0,175 | −0,337 | −0,237 | −0,200 | −0,162 | −0,075 |

*Продолжение*

Значения обеспеченности в %

| 50 | 60 | 70 | 75 | 80 | 90 | 95 | 97 | 99 | 99,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,00 | −0,150 | −0,212 | −0,225 | −0,225 | −0,150 | −0,035 | +0,075 | +0,350 | +0,550 |
| 0,00 | −0,060 | −0,110 | −0,115 | −0,125 | −0,100 | −0,025 | +0,050 | +0,230 | +0,370 |
| 0,00 | −0,025 | −0,050 | −0,060 | −0,065 | −0,060 | −0,010 | +0,025 | +0,135 | +0,220 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,00 | +0,025 | +0,045 | +0,055 | +0,065 | +0,060 | +0,020 | −0,040 | −0,240 | −0,345 |
| 0,00 | +0,050 | +0,085 | +0,110 | +0,115 | +0,140 | +0,050 | −0,120 | −0,460 | −0,590 |
| 0,00 | +0,075 | +0,150 | +0,182 | +0,238 | +0,111 | +0,075 | −0,400 | −0,750 | −0,870 |

12) по формуле $k_1 = C_v x' + 1$ вычисляется модульный коэфициент;

13) по формуле $Q = Q_0 \cdot k_1$ вычисляются расходы для разной обеспеченности и по ним строится кривая обеспеченности.

Для иллюстрации использование изложенных выше методов математической статистики сделаем пример расчетов обеспеченности для минимальных среднемесячных расходов и их модульных коэфициентов по одному из ключей Крыма.

Результаты вычислений необходимых элементов для дальнейших подсчетов по формуле (72) и (75) сводим в табл. 14.

По данным этой таблицы сначала вычисляем годовую норму минимальных расходов $Q_{c\min}$, модульный коэфициент $k$ и коэфициент вариации $C_v$.

$$Q_{o\min} = \frac{\Sigma Q_{\min}}{n} = \frac{10{,}98}{13} = 0{,}84 \ л/сек;$$

$= \frac{\Sigma Q_{\min}}{Q}$ (результаты вычислений $k$ даны в таблице 14);

$$C_v = \sqrt{\frac{\Sigma (k_i - 1)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0{,}5136}{12}} = 0{,}207.$$

Затем по формуле $x = \frac{k-1}{c_v}$ вычисляем нормированную величину признака и по ней из табл. 11 находим $\varphi(x)$, а затем из

Таблица 14

| № п/п | Годы | $Q_{min}$, $м^3/сек$ | $k$ | $k-1$ | $(k-1)^2$ | $x=\frac{k-1}{c_v}$ | $\varphi(x)$ | $x\varphi(x)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1925 | 0,85 | 1,01 | 0,01 | 0,0001 | 0,05 | 0,3984 | 0,0199 |
| 2 | 1926 | 0,60 | 0,71 | —0,29 | 0,0841 | —1,40 | 0,1497 | —0,2096 |
| 3 | 1927 | 1,15 | 1,36 | 0,36 | 0,1296 | 1,74 | 0,0878 | 0,1528 |
| 4 | 1928 | 0,85 | 1,01 | 0,01 | 0,0001 | 0,05 | 0,3984 | 0,0199 |
| 5 | 1929 | 0,90 | 1,06 | 0,06 | 0,0036 | 0,28 | 0,3835 | 0,1074 |
| 6 | 1930 | 0,55 | 0,64 | —0,36 | 0,1296 | —1,74 | 0,0878 | —0,1528 |
| 7 | 1931 | 1,15 | 1,36 | 0,36 | 0,1296 | 1,74 | 0,0878 | 0,1528 |
| 8 | 1932 | 0,85 | 1,01 | 0,01 | 0,0001 | 0,05 | 0,3984 | 0,0199 |
| 9 | 1933 | 0,85 | 1,01 | 0,01 | 0,0001 | 0,05 | 0,3984 | 0,0199 |
| 10 | 1934 | 0,80 | 0,95 | —0,05 | 0,0025 | —0,24 | 0,3876 | —0,0930 |
| 11 | 1935 | 0,75 | 0,89 | —0,11 | 0,0121 | —0,53 | 0,3467 | —0,1837 |
| 12 | 1936 | 0,75 | 0,89 | —0,11 | 0,0121 | —0,53 | 0,3467 | —0,1837 |
| 13 | 1937 | 0,93 | 1,10 | 0,10 | 0,0100 | 0,48 | 0,3555 | 0,1706 |
| Сумма | | 10,98 | 13 | 0 | 0,5136 | 0 | 3,8268 | —0,1596 |
| Среднее | | $Q_0 = 0,84$ | | | | | | |

табл. 14 видим, что $\Sigma\varphi(x) = 3,8268$. По $\varphi(x)$ и $x$ находим $x\varphi(x)$. Далее переходим к определению $b_0$, $b_1$, $E$ и $S$:

$$b_0 = \frac{2\sqrt{\pi}}{n}\sum \varphi(x) = \frac{2 \cdot 1,772 \cdot 3,8268}{13} = 1,0432;$$

$$b_1 = \frac{2\sqrt{\pi}}{n}\sum x\varphi(x) = \frac{2 \cdot 1,772}{13} \cdot (-0,1596) = -0,04351;$$

$$E = 4(b_0 - 1) = 4(1,0432 - 1) = 0,1728;$$

$$S = 4b_1 = 4 \cdot (-0,0435) = -0,174.$$

Далее по асимметрии $S$, равной —0,174, находим по табл. 12 отклонение ординат кривых обеспеченности от середины для разных процентов обеспеченности. Данные вносим в табл. 15; затем по табл. 13 находим эксцесс. Вносим поправку на эксцесс и записываем ее в табл. 15.

Результаты дальнейших вычислений обеспеченности минимальных расходов и их модульных коэфициентов приведены в табл. 15.

По данным этой таблицы строим теоретическую кривую обеспеченности минимального расхода (рис. 21); на этом рисунке нанесена также кривая обеспеченности по фактическим данным.

На рис. 21 видно, что теоретическая кривая довольно хорошо совпадает с фактическими точками в средней части и отступает по кра м. Весьма важно отметить, что крайние ветви кривой,

Таблица 15

| Процент обеспеченности | 0,5 | 1 | 3 | 5 | 10 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Отклонения ординат при $E = O_n\, C_v = 1{,}0$ | 2,25 | 2,08 | 1,76 | 1,553 | 1,245 | 0,857 |
| Поправки на эксцесс $E$ . . . . . | 0,505 | 0,380 | 0,096 | —0,038 | —0,116 | —0,110 |
| Отклонения ординат с учетом эксцесса $E$ | 2,755 | 2,460 | 1,856 | 1,515 | 1,129 | 0,747 |
| $C_v x'$ . . . . . | 0,570 | 0,509 | 0,384 | 0,314 | 0,234 | 0,155 |
| $k_1 = C_v x^1 + 1$ . . . | 1,570 | 1,509 | 1,384 | 1,314 | 1,234 | 1,155 |
| $Q_{\min} = Q_0 (C_v x' + 1)$ | 1,319 | 1,268 | 1,163 | 1,104 | 1.037 | 0,970 |

*Продолжение*

| Процент обеспеченности | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Отклонения ординат при $E = O_n\, C_v = 1{,}0$ | 0,695 | 0,565 | 0,30 | —0,06 | —0,198 | —0,478 |
| Поправки на эксцесс $E$ . . . . . | —0,096 | —0,075 | —0,035 | 0 | 0,043 | 0,074 |
| Отклонения ординат с учетом эксцесса $E$, | 0,599 | 0,490 | 0,265 | —0,06 | —0,155 | —0,404 |
| т. е. $x'$ $C_v x'$ . . . . | 0,124 | 0,101 | 0,055 | 0,012 | —0,032 | —0,084 |
| $k = C_v x' + 1$ . . . . | 1,124 | 1,101 | 1,055 | 1,012 | 0,968 | 0,916 |
| $Q_{\min} = Q_0 (C_v x' + 1)$ | 0,944 | 0,925 | 0,886 | 0,850 | 0,813 | 0,769 |

*Продолжение*

| Процент обеспеченности | 75 | 80 | 90 | 95 | 97 | 99 | 99,5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Отклонения ординат при $E = O_n\, C_v = 1{,}0$ | —0,635 | —0,823 | —1,33 | —1,752 | —2,003 | —2,571 | —2,87 |
| Поправки на эксцесс $E$ . . . . . | 0,095 | 0,101 | 0,118 | 0,042 | —0,100 | —0,400 | —0,524 |
| Отклонения ординат с учетом эксцесса $E$ | —0,540 | —0,722 | -1,212 | —1,710 | —2,130 | —2,971 | —3,394 |
| $C_v x'$ . . . . . | —0,112 | —0,149 | —0,251 | —0,354 | —0,441 | —0,615 | —0,702 |
| $k = C_v x' + 1$ . . . . | 0,888 | 0,851 | 0,749 | 0,646 | 0,559 | 0,385 | 0,298 |
| $Q_{\min} = Q_0 (C_v x' + 1)$ | 0,746 | 0,715 | 0,629 | 0,544 | 0,459 | 0,323 | 0,250 |

построенной по фактическим данным, являются наиболее неясными. Края же теоретической кривой обеспеченности, построенные по закономерностям функции Шарлье, дают большую уверенность в вероятности величины обеспеченности. Для практического использования нас интересует конец кривой обеспеченности (для 90—97 и 99%). Отсюда видно, что построение теоретических кривых обеспеченности имеет большое значение и практический интерес.

Для обеспеченности 95% в нашем примере (рис. 21) по кривой, построенной только по фактическим данным, мы имеем расход 0,38 *л/сек*, а по кривой, построенной по функциям Шарлье, — 0,54 *л/сек*, т. е. больше на 42%. Как отмечено выше, расход следует принять по теоретической кривой, т. е. в 0,54 *л/сек*, так как концы теоретической кривой более вероятны, чем концы эмпирической кривой.

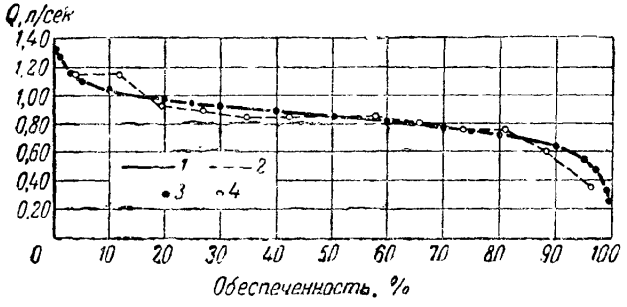



Рис. 21. Кривая обеспеченности минимальных дебитов ключа (Крым).

*1*—кривая обеспеченности (по функциям Шарлье); *2*—кривая обеспеченности по фактическим точкам; *3*—точки, вычисленные по функциям Шарлье; *4*—точки по фактическим наблюдениям.

## 38. Исследование связи дебита ключей с метеорологическими и гидрологическими факторами по методу корреляций

Для исследования зависимости между дебитом ключа и метеорологическими, гидрологическими и другими, влияющими на него факторами, а также для исследования связи между дебитом ключа и дебитом аналога за параллельные периоды наблюдений можно воспользоваться методом корреляций.

Корреляционная зависимость между двумя величинами выражается уравнением прямой регрессии

$$y - y_0 = r\frac{\delta_y}{\delta_x}(x - x_0), \tag{85}$$

где $x_0$ и $y_0$ — среднее арифметического ряда;

$r$ — коэфициент корреляции, являющийся мерой связи между величинами.

При $r = 1$ имеет место функциональная связь. Теоретически наличие корреляционной связи между сравниваемыми явлениями будет иметь место при $r > 0{,}5$. При практических расчетах корреляционную связь используют при $r > 0{,}70$.

Коэфициент корреляции определяется по формуле.

$$r = \frac{\Sigma(y - y_0)(x - x_0)}{\sqrt{\Sigma(y - y_0)^2\,\Sigma(x - x_0)^2}}. \tag{86}$$

В приводимой выше формуле (85) $\sigma_x$ и $\sigma_y$ — стандартные вариации или среднеквадратные отклонения $y$-ов и $x$-ов от их средних $y_0$ и $x_0$.

Стандартные вариации вычисляют по формулам

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\Sigma (x_i - x_0)^2}{n-1}} \tag{87}$$

и

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\Sigma (Y_1 - Y_0)^2}{n-1}}. \tag{88}$$

Вероятная ошибка коэфициента корреляции вычисляется по формуле

$$\Delta r = \pm 0{,}67 \frac{1 - r^2}{\sqrt{n}}. \tag{89}$$

Коэфициент $r\frac{\sigma_y}{\sigma_x}$ в уравнении (85) определяет собою угол наклона прямой регрессии и называется коэфициентом регрессии. В уравнении (85) коэфициент регрессии $y$ по $x$, обозначается через $R_{y/x}$; коэфициент регрессии $x$ по $y$ — через $R_{x/y}$; последний равняется $r\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$. В этом случае уравнение регрессии имеет вид

$$x - x_0 = r\frac{\sigma_x}{\sigma_y}(y - y_0). \tag{90}$$

Коэфициенты регрессии связаны уравнением

$$R_{y/x} \times R_{x/y} = r^2.$$

При функциональной связи между величинами $x$ и $y$ обе линии регрессии сливаются в одну и

$$R_{x/y} = \frac{1}{R_{x/y}}.$$

Для установления связи одной переменной с двумя, например, $y$ с $x_1$ и $x_2$, пользуются соответствующими формулами из математической статистики.

В гидрогеологических явлениях, как и в ряде других, не всегда можно применить прямолинейную корреляцию; в этом случае связь облекается в более сложную формулу криволинейной коррелятивной зависимости. За меру связи такой зависимости принимается величина коррелятивного отношения, вычисление которой довольно сложно. Поэтому для суждения о характере связи при криволинейной корреляции проще построить приближенную кривую графическим путем.

Так как большинство кривых удовлетворяется уравнениями степенных функций, то можно воспользоваться этим свойством и коррелировать не непосредственно величины, а их логарифмы. Тогда мы получаем не криволинейную, а прямолинейную корреляцию и, следовательно, уравнение прямой регрессии логарифмической аноморфозы.

Пользоваться анализом связи по уравнениям регрессии желательно при числе членов ряда больше 10; если же число членов будет меньше 10, то следует искать простую графическую связь, в особенности при криволинейной зависимости.

На рис. 22, по Д. Г. Шапошникову, дан график зависимости дебита кяризов от атмосферных осадков в области питания.

Для выявления зависимости построены две кривых связи. По первой, сплошной кривой I, взяты осадки в миллиметрах по метеорологической станции за вторую половину предыдущего

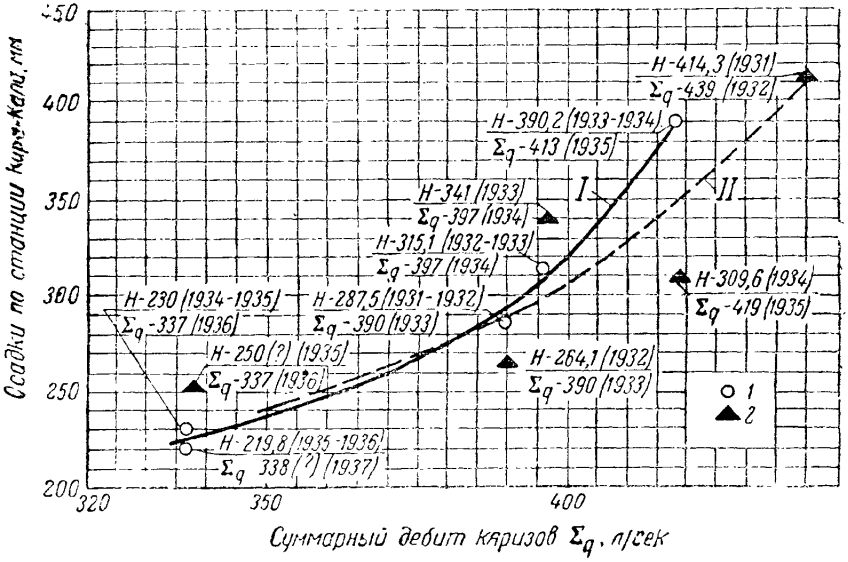



Рис. 22. График зависимости дебитов группы кяризов от атмосферных осадков по метеорологической станции.

*I*—кривая, построенная по связи осадков за вторую половину ($N-1$) года и первую половину ($N$ года и дебита кяризов за ($N+1$) год; *II*—кривая, построенная по связи осадков за $N$ год и дебита кяризов за $N+1$ год; *1*—точки для построения кривой *I*; *2*—точки для построения кривой *II*; *H*—осадки в *мм*; $\Sigma q$—средний дебит кяризов в *л/сек*. В скобках указаны соответствующие годы; если указано два года, то это обозначает, что взяты вторая половина первого года и первая половина второго года.

года (N — 1) и за первую половину данного (N) года, а дебит кяризов за будущий (N + 1) календарный год.

При построении кривой II осадки по той же метеорологической станции взяты за данный (N) календарный год и дебит кяризов за будущий (N + 1) год.

Рассмотрение кривых рис. 22 показывает, что кривая I дает бо́льшую точность, чем кривая II, так как рассеяние точек в первом случае меньше, чем во втором. Найденная зависимость позволяет давать прогноз дебита кяризов за полгода вперед,

что имеет весьма важное значение для хозяйства Туркменской ССР.

В качестве примера исследования по методу корреляции разберем связь максимального годового дебита одного из ключей горной части юга СССР и осадков в области питания по данным метеорологической станции. Максимальные дебиты за каждый год даны в табл. 16.

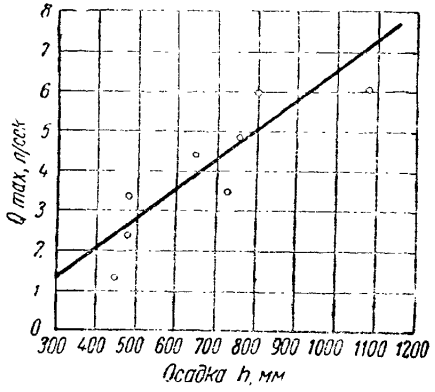



Рис. 23. Прямая регрессии связи максимального дебита ключа с осадками.

В связи с наличием материала только за 1927—1935 гг. для исследования пришлось взять 9 лет; так как такое число наблюдений близко к 10, то анализ по методу корреляций возможен.

Для исследования воспользуемся прямолинейной корреляцией.

Учитывая значительный дефицит влажности в летние, последние весенние и первые осенние месяцы, для корреляции максимального годового дебита ключа и осадков возьмем последние за X, XI и XII месяцы предыдущего года и за I, II, III и IV месяцы данного года[1].

Таблица 16

| Годы | $Q$ Максимальный годовой, *л/сек* | $h\Sigma$ осадков за предыдущие годы X, XI, XII месяцы и за I, II, III, IV месяцы настоящего года | $Q - Q_0$ | $h - h_0$ | $(Q - Q_0)^2$ | $(h - h_0)^2$ | $(Q - Q_0) \cdot (h - h_0)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1927 | 2,40 | 473 | —1,89 | —221,89 | 3,57 | 49235,17 | 419,37 |
| 1928 | 3,45 | 729 | —0,83 | +34,12 | 0,69 | 1164,17 | —28,32 |
| 1929 | 6,05 | 1073 | +1,77 | +378,10 | 3,13 | 142959,61 | 669,23 |
| 1930 | 1,35 | 443 | —2,94 | —251,89 | 8,64 | 63448,57 | 740,56 |
| 1931 | 5,95 | 806 | +1,67 | +111,11 | 2,79 | 12345,43 | 185,55 |
| 1932 | 6,75 | 854 | +2,45 | +159,11 | 6,05 | 25315,99 | 391,41 |
| 1933 | 4,40 | 643 | +0,12 | —51,89 | 0,014 | 2692,57 | —6,23 |
| 1934 | 4,85 | 455 | +0,57 | +60,12 | 3,25 | 3614,41 | 34,27 |
| 1935 | 3,35 | 478 | —0,93 | —216,89 | 0,86 | 47041,27 | 201,71 |
| | $\Sigma = 38,56$<br>$Q_0 = 4,28$ | $\Sigma = 6254$<br>$h_0 = 694,88$ | $\Sigma = 0$ | $\Sigma = 0$ | $\Sigma = 29,12$ | $\Sigma = 347\,817,79$ | $\Sigma = 2\,607,55$ |

[1] Здесь исследовалась связь максимального дебита с осадками и за другие месяцы, но коэфициент корреляции получился меньше, следовательно связь получилась хуже.

Основные данные для расчета сводятся в табл. 16. Коэфициент корреляции получится следующий:

$$r = \frac{\Sigma (Q - Q_0)(h - h_0)}{\sqrt{\Sigma (Q - Q_0)^2 \Sigma (h - h_0)^2}} = \frac{2607{,}55}{\sqrt{29{,}12 \times 347817{,}19}} = 0{,}818.$$

Ошибки коэфициента корреляции будут:

$$\sigma = \frac{(1 - r^2)}{\sqrt{n}} = \frac{1 - 0{,}818^2}{3} = 0{,}110,$$

следовательно, $r = 0{,}818 \pm 0{,}110$.
Таким образом связь имеется удовлетворительная.
Находим коэфициент регрессии:

$$R_{Q/h} = r \frac{\sigma_Q}{\sigma_h} = r \sqrt{\frac{\Sigma (Q - Q_0)^2}{\Sigma (h - h_0)^2}} = 0{,}818 \sqrt{\frac{29{,}12}{347817{,}79}} = 0{,}00748.$$

Тогда уравнение регрессии будет:

$$(Q - Q_0) = R_{Q/h}(h - h_0).$$

Подставляя значения, получим

$$Q - 4{,}28 = 0{,}00748\,(h - 694{,}88).$$

Отсюда

$$Q = 0{,}00728\,h - 5{,}19 + 4{,}28$$

$$Q = 0{,}00748\,h - 0{,}91.$$

По этому уравнению на рис. 23 нанесена прямая регрессии $Q$ по $h$ и фактические наблюдения (точки) связи максимального дебита с осадками.

На рис. 23 видно, что точки наблюдаемых данных имеют отклонения от прямой регрессии. Эти отклонения могут определяться теоретически как средняя ошибка связи по формуле:

$$\sigma_{св} = \pm \sigma_0 \sqrt{(1 - r^2)} = \pm \sqrt{\frac{\Sigma (Q - Q_0)^2}{n - 1}} \cdot \sqrt{(1 - r^2)}; \qquad (91)$$

$$\sigma_{св} = \sqrt{\frac{29{,}12}{8}} \cdot \sqrt{(1 - 0{,}818^2)} = 1{,}88 \cdot 0{,}576 = 1{,}073\ л/сек.$$

Вводя среднюю ошибку связи в уравнение регрессии, получаем зависимость максимального дебита от осадков с учетом отклонений от средних значений

$$Q = 0{,}00748\,h - 0{,}91 \pm 1{,}073.$$

Последнее уравнение определяет коррелятивную связь максимального дебита ключа с осадками.

Подобными исследованиями по методу корреляций можно выявить связь разных характеристик дебита ключей с факторами, определяющими изменчивость величины этих характеристик дебита.

## 39. Определение характеристики ключей по методу аналогий

При исследовании дебита ключей часто приходится встречаться с наличием непродолжительных наблюдений. В этом случае можно воспользоваться аналогами с длительными наблюдениями. Под аналогами следует понимать ключи, которые сравнительно с исследуемым ключом находится примерно в подобных же (близких) гидрогеологических условиях — характеристики дебита их близки и условия питания примерно аналогичны. Непосредственный перенос характеристик дебита возможен лишь при наиболее благоприятных условиях аналогии, которая, в частности, может быть оценена коэфициентом корреляции указанных характеристик исследуемого ключа и аналога. В остальных случаях перенос следует производить с помощью поправочных коэфициентов; для этого можно воспользоваться уравнением вида

$$M_x = a M_a, \tag{92}$$

где $M_x$ — искомая характеристика за многолетний период;
$M_a$ — характеристика аналога за многолетний период;
$a$ — поправочный коэфициент.

Поправочный коэфициент $a$ определяется по формуле

$$a = \frac{X_x}{X_a}, \tag{93}$$

где $X_x$ — характеристика исследуемого ключа за короткий период наблюдений;
$X_a$ — характеристика аналога за тот же короткий период наблюдений.

Исследование связи изучаемого ключа с аналогом, можно делать не только по элементарному уравнению (92), но также по методам, изложенным в § 38 и 40. Голлер (Holler) для предсказания минимального дебита ключа с малым периодом наблюдений рекомендует использование данных длительных наблюдений по аналогу. Определение минимума дебита Голлер рекомендует делать по логарифмическому графику. Это вполне целесообразно, так как в таком случае дается общее графическое решение, которое будет удовлетворять большинству зависимостей. В качестве примера приводится определение минимального дебита ключа в Фуксштадте по более продолжительным наблюдениям в Зоммерхаузене.[1]

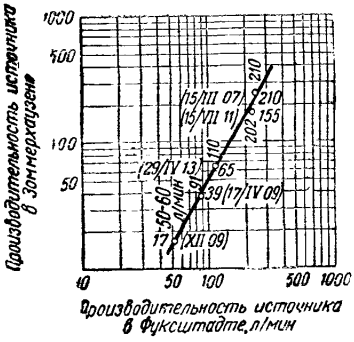



Рис. 24. Логарифмический график связи дебитов ключей в Зоммерхаузене и Фуксштадте.

Данные фактических замеров приводятся в табл. 17.

Логарифмический график связи дебитов приведен на рис. 24.

[1] Исследования показали, что ключ в Зоммерхаузене может быть принят как аналог для ключа в Фуксштадте.

Таблица 17

| Время измерения | Дебит, *л/мин* | |
|---|---|---|
| | Зоммерхаузен | Фуксштадт |
| 15 марта 1907 г. . . . . | 210 | 210 |
| 17 апреля 1909 г. . . . . | 39 | 91 |
| Декабрь 1909 г. . . . . | 17 | Отсутствует |
| 5 июля 1911 г. . . . . | 155 | 202 |
| 29 апреля 1913 г. . . . . | 65 | 110 |

По минимуму дебита ключа в Зоммерхаузене (17 *л/мин.* в декабре 1909 г.), определяется по графику рис. 24 минимум ключа в Фуксштадте — около 50 *л/мин.* Уравнение (92) для данного случая применить нельзя, так как прямолинейной связи между дебитами ключей нет.

## 40. Расширение периода наблюдений

При наличии короткого ряда наблюдений построение выводов по методам математической статистики влечет за собой значительные ошибки.

В связи с этим весьма важным является расширение периода или ряда наблюдений.

Это можно сделать следующими приемами.

Пусть мы имеем короткий период наблюдений за дебитом ключа и длинный период наблюдений за метеорологическими элементами (осадки, температура и дефицит влажности), которые определяют в нашем случае питание ключа.

Вычислим коэфициент корреляции между исследуемой характеристикой дебита ключа для имеющегося ряда наблюдений и соответствующими этому ряду метеорологическими элементами. Если связь надежная, то по методу корреляции определяют зависимость характеристики дебита от метеорологического элемента.

При прямолинейной корреляции в общем виде получается уравнение

$$x = ay + b, \tag{94}$$

где $x$ — характеристика дебита ключа;
$y$ — метеорологический элемент;
$a$ — коэфициент;
$b$ — постоянная.

Уравнение (94) есть уравнение прямой регрессии, не проходящей через начало координат.

Для частного случая постоянная $b = 0$ и тогда мы получим уравнение прямой, проходящей через начало координат

$$x = ay. \tag{95}$$

При криволинейной корреляции следует сначала получать уравнение прямой регрессии логарифмической анаморфозы

$$\lg x = a \lg y + b \tag{96}$$

и затем от него (потенцированием) переходить к уравнению степенных функций

$$x = cy^a, \tag{97}$$

где

$$\lg c = b.$$

Таким образом, устанавливается связь между исследуемой характеристикой дебита и метеорологическими элементами.

Затем по метеорологическим данным за весь период можно определить искомую характеристику дебита по уравнениям (94)—(97).

Таким образом мы переходим от короткого ряда наблюдений к большому.

При наличии аналога и длительных за ним наблюдений можно короткий ряд наблюдений исследуемого ключа привести к длинному, соответствующему по периоду наблюдений аналогу.

## 41. Определение минимального расхода ключа по методу Майэ и Губера

Минимальный расход ключа можно определить по формулам

$$Q = Q_н e^{-\alpha (t - t_0)} \tag{98}$$

и

$$Q = \frac{Q_н}{[1 + \alpha (t - t_0)]^2}, \tag{99}$$

где $Q$ — искомый минимальный расход в конце интервала для времени $t - t_0$;

$Q_н$ — расход в начальный период времени $t_0$;

$e$ — основание натуральных логарифмов;

$\alpha$ — постоянная для каждого источника.

Уравнение (98) справедливо при значительной мощности водоносного слоя и при режиме, „не испытывающем постороннего влияния".

При небольшой мощности водоносного слоя можно пользоваться уравнением (99).

При логарифмировании уравнения (98) и переходе к десятичным логарифмам получаем следующее уравнение, которое удобнее для пользования:

$$\lg Q = \lg Q_н - 2{,}3\,(t - t_0)\,\alpha. \tag{100}$$

$\alpha$ определяется по формуле

$$\alpha = \frac{\lg Q_н - \lg Q}{2{,}3\,(t - t_0)}. \tag{101}$$

Уравнения (99) и (100) можно представить графически (см. рис. 25). Логарифмическая зависимость по уравнению (100) на графике получена, как следовало предполагать, в виде прямой.

Вероятный минимум определяется следующим путем.

Во время отсутствия питания в водоносном горизонте определяется в какое-то время $t_0$ расход $Q_н$; затем через интервал (например в несколько десятков дней) во время $t$ замеряется расход $Q$. По этим данным вычисляется постоянная $\alpha$. Лучше, конечно, величину определить на основании многократных замеров. По ним можно графически построить логарифмическую зависимость дебита от времени и найти графическим путем величину $\alpha$, как тангенс угла наклона линии к оси абсцисс $\varphi$, разделенного на 2,3. При многократных наблюдениях возможно также применить и аналитическое вычисление. Затем по метеорологическим (а, если нужно, то и гидрологическим) данным определяется период $(t - t_0)$ режима ключа, не испытывающего постороннего влияния. Зная расход перед этим периодом, можно, по указанным выше методам, вычислить минимальный расход.

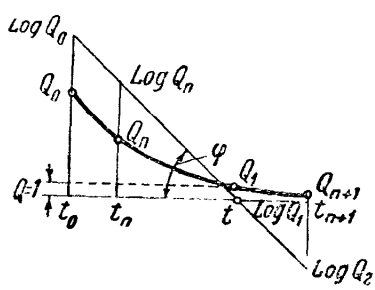



Рис. 25. Логарифмическая прямая зависимости изменения дебита ключа при режиме, „не испытывающем постороннего влияния".

Период режима „ключа, не испытывающего постороннего влияния", следует определять с учетом гидрогеологических условий, так как формальное выделение его по метеорологическим, например, данным может повлечь за собой ошибки. Следует отметить, что формулы, применяемые Майэ и Губером, являются частным случаем криволинейной связи уравнений степенных функций и уравнения прямой регрессии логарифмической анаморфозы (см. § 38).

## 42. Оценка методов по определению ресурсов нисходящих ключей

Вопрос об оценке ресурсов нисходящих ключей сводится к определению степени обеспеченности дебита при эксплоатации ключа. Это делается на основании анализа гидрогеологических условий и тех изменений, которые произойдут при устройстве каптажа ключа, а также анализа по данным наблюдений за изменчивостью дебита.

При оценке ресурсов ключей для любого периода должен входить анализ гидрогеологических условий и соображения о влиянии устройства каптажа. Затем делается анализ наблюдений за изменчивостью дебита.

Методика оценки изменчивости дебита выбирается в зависимости от количества наблюдений за дебитом ключа, от элементов, которые влияют на дебит, наличия аналогов, а также от требуемой точности, которая, в частности, определяется потребностью в воде.

Наиболее упрощенной оценкой ресурсов ключей является составление таблиц по дебитам и хронологических графиков с выборкой минимальных и максимальных дебитов (см. § 35). Такая оценка является приближенной.

При длительном ряде наблюдений составляются эмпирические кривые распределения и обеспеченности; такой метод дает возможность более точно оценить изменчивость и обеспеченность дебитов ключей (см. § 36).

Еще бо́льшую уверенность в вероятности обеспеченности дебита дает построение теоретической кривой обеспеченности, что возможно при длительном ряде наблюдений (см. § 37).

Построение эмпирической и теоретической кривых обеспеченности дает возможность математически исследовать вероятность различной обеспеченности дебита.

Более углубленный анализ изменчивости дебитов ключей получается при сопоставлении данных наблюдений за дебитами с данными по элементам, влияющим на дебит (осадки, влажность, гидрогеологические элементы и проч.); это сопоставление особенно целесообразно применять при коротком ряде наблюдений за дебитами и длинном ряде наблюдений за элементами, от которых зависит изменение этих дебитов ключей. Такой анализ можно делать по методу корреляций и по методу расширенного периода наблюдений.

При наличии аналога с длинным рядом наблюдений целесообразно оценить изменчивость дебита по методу аналогии аналитическим и графическим способами.

Для определения минимальных дебитов, кроме методов, отмеченных выше, можно применять методы Майэ и Губера.

Так как все указанные выше методы применялись мало, то необходимо в соответствующих случаях пользоваться оценкой ресурсов ключей по различным методам.

## ГЛАВА VIII

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ ВОСХОДЯЩИХ КЛЮЧЕЙ

### 43. Зависимость дебита от понижения

При анализе дебита восходящих ключей необходимо иметь данные о гидрогеологических условиях водоносного горизонта, питающего ключ, и в особенности детальные данные об условиях выхода ключа. Восходящие ключи могут являться выходами воды только части подземного потока, например в г. Белгороде (рис. 26), или же полностью дренировать водоносный горизонт, например по схеме, данной на рис. 27.

В первом случае при понижении уровня в ключе (например путем откачки) можно рассчитывать на устойчивое увеличение дебита. Во втором случае, когда один ключ или группа их дренируют полностью водоносный горизонт, получить устойчивое увеличение дебита мало вероятно.

Ключ может выходить непосредственно из породы водоносного горизонта в виде сосредоточенной струи или через толщу рыхлых пород. В последнем случае часть воды из водоносного слоя (иногда значительная) растекается по указанной толще рыхлой породы, не выходя на поверхность земли. Понижение уровня в ключе в этом случае не только увеличивает поступление воды из водоносного горизонта, но также привлекает воду, растекающуюся по толще рыхлой породы.

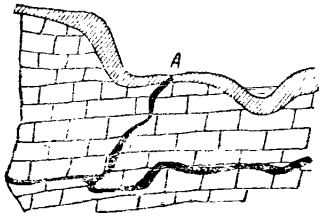



Рис. 26. Схема восходящего ключа из трещиноватых мелов в г. Белгороде.

*A* — место выхода ключа.

Увеличение дебита восходящего ключа для указанных выше условий можно полу-

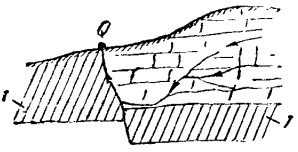



Рис. 27. Ключ, вытекающий из сбросовой трещины с полным дренажем района питания.

*Q* — ключ; *1* — водонепроницаемая порода.

чить путем расчистки выхода или (что обычно является более рациональным) путем вертикального каптажа (шахтный колодец или буровая скважина). Такое устройство каптажа уменьшает сопротивление при движении воды и фактически действует как понижение уровня воды в колодце.

Таким образом при расчете ресурсов восходящих ключей нужно сначала решить вопрос о гидрогеологических условиях, которые позволяют сделать прогноз о возможности увеличения естественного дебита, и затем решать задачу о закономерностях увеличения дебита при различных понижениях уровня воды.

Эта задача решается так.

По данным о дебите при различных понижениях строится кривая дебита или составляется уравнение дебита.

При прямолинейной зависимости дебита $Q$ от понижения $S$ можно применять уравнение

$$Q = qS, \tag{102}$$

где $q$ — удельный дебит.

При параболической зависимости,

$$S = aQ + bQ^2, \tag{103}$$

где $a$ и $b$ — параметры уравнения.

Для степенных функций в общем виде

$$S = aQ^c, \tag{104}$$

где $a$ и $c$ — постоянные для искомой зависимости.

Или в виде логарифмической анаморфозы

$$\lg S = C \lg Q + b, \tag{105}$$

где

$$b = \lg a.$$

Для построения кривых дебита или составления уравнений рекомендуется иметь не менее трех точек.

При гидрогеологических условиях, когда при выходе ключа часть воды теряется на подземное растекание, построение кривых дебита и уравнений следует вести с учетом изменения количества растекающейся воды.

Необходимо иметь в виду, что гидравлический режим может меняться в зависимости от величины расхода. Поэтому любое из уравнений может быть справедливо в пределах каких-то понижений и удовлетворять с меньшей степенью точности или совсем не удовлетворять за пределами этих понижений.

### 44. Обеспеченность дебита восходящих ключей

Для восходящих ключей, которые полностью дренируют водоносный горизонт, расчет обеспеченности ресурсов следует делать как для нисходящих ключей.

Для восходящих ключей, которые являются выходом части воды подземного потока, анализ обеспеченности дебита следует делать по методу, изложенному в §§ 27 и 28.

## ГЛАВА IX

# О ТОЧНОСТИ ПОДСЧЕТА РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И КЛЮЧЕЙ

### 45. Изученность гидрогеологических условий

Важнейшим элементом, определяющим точность оценки ресурсов подземных вод, является изученность геологических условий. Особенно важны для определения ресурсов данные по мощности водоносной толщи, площади распространения водоносного горизонта и водопроводимости.

При наличии фациальных изменений водоносной толщи, ее кровли и подошвы, необходимо иметь данные об этих изменениях, так как один и тот же стратиграфический горизонт может изменять свой литологический состав.

Например, нижнесарматские отложения причерноморской впадины на восток от Днепра состоят, главным образом, из темных глинистых отложений, мало водоносных: на запад от

Днепра вместо черных глин появляются известняки и темно-зеленые глины с прослоями песков и известняков, содержащие воду.

В Керченской мульде, которая имеет ширину поперек оси около 5 *км*, известняковая фация понта приурочена к крыльям мульды, тогда как глинистая и песчаная фации преобладают в осевой части мульды.

В пролювиальных, флювиогляциальных и аллювиальных водоносных горизонтах мы нередко наблюдаем большую пестроту механического состава и мощности слагающих их пород. Изменение механического состава, как известно, сильно влияет на водопроводимость породы. Поэтому при изучении, например, поперечного сечения подземного потока (мощность, водопроводимость) в указанных отложениях необходимо дать такое количество разведочных и опытных скважин, по которому можно было бы установить закономерность изменения мощности и водных свойств отложений. На рис. 28 показана схема поперечного сечения аллювиального подземного потока при различном расположении разведочных скважин. На этом рисунке видно, что при расположении скважин по схеме II, мы увеличиваем площадь поперечного сечения на 45%, а при расположении по схеме III — уменьшаем на 22%.

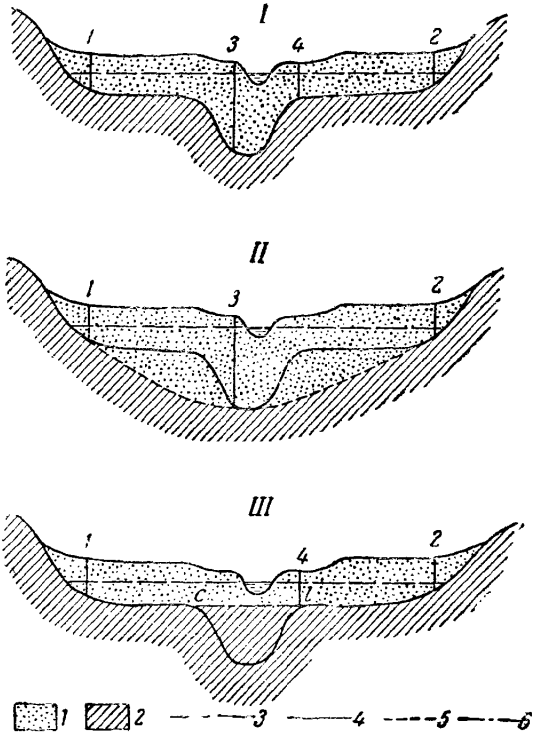



Рис. 28. Схема аллювиального водоносного горизонта при разном расположении разведочных скважин.

*I* — схема фактического распределения отложений; *II* — схема при скв. № 1, 2 и 3; *III* — схема при скв. № 1, 2 и 4; *1* — аллювиальные отложения; *2* — водонепроницаемые коренные породы; *3* — уровень подземных вод; *4* — фактическая граница между аллювиальными и коренными отложениями; *5* — граница между аллювиальными и коренными отложениями по схеме *II*; *6* — граница между аллювиальными и коренными отложениями по схеме *III*.

В трещиноватых и карстовых породах величина трещин и пустот по мощности и площади распространения породы меняется. В мергельно-меловой толще верхнего мела ($Cr_2^{t+Sn}$) в Курской области и в северо-восточной части УССР трещиноватость обычно значительно больше около рек и меньше по

водоразделам; в районе же Полтавы эта толща безводна. Для оценки ресурсов по площади распространения мергельно-меловой толщи, конечно, необходимы сведения о закономерностях распределения трещиноватости.

Влияние тектоники на водоносность общеизвестно.

Наличие складок, в особенности синклинальных, является важнейшим фактором для развития артезианских водоносных горизонтов. При сбросах нередко теряется связь между отдельными частями одного и того же стратиграфического горизонта, и в то же время может установиться гидравлическая связь между разными стратиграфическими горизонтами. Изученность тектонических условий является также необходимым элементом при подсчете ресурсов подземных вод.

Чем больше геологическая изученность, тем большую надежность будут иметь выводы по ресурсам подземных вод.

## 46. Ошибки, случайность наблюдений и определение их количества

Точность определения любого явления и связи его с другими явлениями зависит от количества наблюдений, но для разных явлений и в различных условиях количество наблюдений, потребных для одной и той же точности, будет различно. Если мы замеряем, например, расход ключа, то величина этого расхода зависит от точности водомерного приспособления; чтобы убедиться в правильности данных по наблюдениям на водомерном приспособлении для одного и того же расхода, достаточно сделать 2—3 наблюдения; для внимательных наблюдений совершенно достаточно двух наблюдений, да и при одном наблюдении ошибка бывает весьма редко. Если в дальнейшем для вычисления указанного расхода применяется формула, то для точности определения, конечно, должны учитываться еще и погрешности этой формулы.

Если же мы определяем вероятный многолетний минимум дебита ключа, то при этом мы имеем наличие не только ошибок отдельных замеров расходов, но также и элемент случайности замера во времени, что вносит в выводы погрешности совсем другого порядка.

Если мы определяем средний коэфициент фильтрации или средний коэфициент водоотдачи водоносной толщи по площади ее распространения, а закономерность распределения отдельных отклонений величин этих элементов не имеет системы (на данном этапе наших знаний она не ясна), то такие отклонения мы можем отнести к случайным (нам неизвестным). В таких условиях подсчет среднего значения по полученным данным отличается от истинной середины на величину, которую можно подсчитать по теории вероятностей по формуле (73) для средней ошибки $\sigma_0$ и по формуле (78) для вероятной ошибки $\Delta x_0$:

$$\sigma_0 = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

и

$$\Delta x_0 = \pm 0{,}67\frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где $\sigma$ — стандартная вариация и

$n$ — число наблюдений; при $n > 30$ вместо $n-1$ ставится $n$.

$\sigma$ определяется по формуле (74), приведенной на стр. 86.

Предельную ошибку можно принять равной учетверенной вероятной ошибке.

Для получения необходимой точности среднего арифметического число наблюдений случайных явлений определяется по формуле (76)

$$n = \frac{10^4 C_v^2}{(\sigma^0/_0)^2},$$

где $C_v$ — коэфициент вариации, определяемый по формуле

$$C_v = \frac{\sigma}{x} = \sqrt{\frac{\Sigma_1^n \left(\frac{x_i}{x} - 1\right)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\Sigma_1^n (k_i - 1)^2}{n-1}},$$

и $\sigma^0/_0$ — задаваемая точность ошибки в процентах.

В табл. 18 приведено число наблюдений для заданной точности (от $\pm 4$ до $\pm 20^0/_0$) и для $C_v$ от 0,15 до 0,60 (при небольшой асимметричности ряда).

Таблица 18

| $C_v$ | Число наблюдений при точности (в процентах) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ±4,0 | ±5,0 | ±6,0 | ±7,0 | ±8,0 | ±9,0 | ±10,0 | ±20,0 |
| 0,15 | 14 | 9 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 0,20 | 25 | 16 | 11 | 8 | 6 | 5 | 4 | 1 |
| 0,25 | 39 | 25 | 17 | 18 | 10 | 8 | 6 | 2 |
| 0,30 | 56 | 36 | 25 | 19 | 14 | 11 | 9 | 2 |
| 0,35 | 76 | 49 | 33 | 25 | 19 | 15 | 12 | 3 |
| 0,40 | 100 | 64 | 44 | 33 | 25 | 20 | 16 | 4 |
| 0,45 | 126 | 81 | 55 | 42 | 32 | 25 | 20 | 5 |
| 0,50 | 156 | 100 | 69 | 50 | 39 | 31 | 25 | 6 |
| 0,55 | 189 | 121 | 83 | 62 | 47 | 38 | 30 | 8 |
| 0,60 | 225 | 144 | 99 | 74 | 56 | 45 | 36 | 9 |

Таким образом, при исследовании наблюдений, их можно разделить на случайные, когда при других условиях величина явления будет другая (изменение дебита ключа во времени,

изменение пористости по площади и проч.), и на наблюдения не случайные, когда величина явления не зависит от времени и до известной степени от места.

## 47. Точность определения гидравлического уклона

В качестве примера точности определения отдельных гидрогеологических элементов ниже даются указания относительно точности определения гидравлического уклона.

Точность определения гидравлического уклона зависит от точности отсчета уровней воды, от точности нивеллировки и

Таблица 19

| Уклоны в тысячных (*м/км*) при точности определения уклонов (в процентах) | | | Расстояние, *км* при нивеллировке IV разряда ($в = \pm 15 мм$) при точности отсчета уровня воды *а* | | при нивеллировке III разряда ($в = \pm 8$ *мм*) при точности отсчета уровня воды *а* | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10% | 5% | 2% | 5 *мм* | 10 *мм* | 5 *мм* | 10 *мм* |
| 0,025 | 0,050 | 0,125 | 41,5 | 46,6 | 15,3 | 19,9 |
| 0,030 | 0,060 | 0,150 | 29,5 | 33,5 | 11,3 | 15,0 |
| 0,035 | 0,070 | 0,175 | 22,1 | 25,5 | 8,77 | 11,8 |
| 0,040 | 0,080 | 0,200 | 17,5 | 20,8 | 7,07 | 9,90 |
| 0,045 | 0,090 | 0,225 | 14,0 | 17,0 | 5,85 | 8,60 |
| 0,050 | 0,100 | 0,250 | 11,6 | 14,1 | 4,96 | 7,08 |
| 0,060 | 0,120 | 0,300 | 8,50 | 10,5 | 3,75 | 5,90 |
| 0,070 | 0,140 | 0,350 | 6,80 | 8,10 | 2,97 | 4,38 |
| 0,080 | 0,160 | 0,400 | 5,15 | 6,60 | 2,44 | 3,65 |
| 0,090 | 0,180 | 0,450 | 4,20 | 5,50 | 2,05 | 3,10 |
| 0,100 | 0,200 | 0,500 | 3,50 | 4,62 | 1,76 | 2,72 |
| 0,125 | 0,250 | 0,625 | 2,47 | 3,30 | 1,29 | 2,05 |
| 0,150 | 0,300 | 0,750 | 1,85 | 2,47 | 1,00 | 1,61 |
| 0,175 | 0,350 | 0,875 | 1,42 | 1,92 | 0,81 | 1,32 |
| 0,200 | 0,400 | 1,000 | 1,17 | 1,64 | 0,68 | 1,12 |
| 0,225 | 0,450 | 1,125 | 0,980 | 1,38 | 0,58 | 0,98 |
| 0,250 | 0,500 | 1,250 | 0,830 | 1,20 | 0,51 | 0,86 |
| 0,300 | 0,600 | 1,500 | 0,630 | 0,960 | 0,40 | 0,69 |
| 0,350 | 0,700 | 1,750 | 0,505 | 0,780 | 0,33 | 0,57 |
| 0,400 | 0,800 | 2,000 | 0,417 | 0,670 | 0,28 | 0,49 |
| 0,450 | 0,900 | 2,250 | 0,350 | 0,580 | 0,24 | 0,43 |
| 0,500 | 1,000 | 2,500 | 0,307 | 0,520 | 0,21 | 0,38 |
| 0,600 | 1,200 | 3,000 | 0,235 | 0,400 | 0,19 | 0,31 |
| 0,700 | 1,400 | 3,500 | 0,185 | 0,320 | 0,14 | 0,26 |
| 0,800 | 1,600 | 4,000 | 0,156 | 0,270 | 0,12 | 0,22 |
| 0,900 | 1,800 | 4,500 | 0,132 | 0,240 | 0,10 | 0,20 |
| 1,000 | 2,000 | 5,000 | 0,120 | 0,207 | 0,095 | 0,18 |
| 1,250 | 2,500 | 6,250 | 0,088 | 0,158 | 0,073 | 0,14 |
| 1,500 | 3,000 | 7,500 | 0,070 | 0,127 | 0,060 | 0,11 |
| 1,750 | 3,500 | 8,750 | 0,058 | 0,107 | 0,052 | 0,094 |
| 2,000 | 4,000 | 10,000 | 0,051 | 0,093 | 0,047 | 0,081 |
| 2,250 | 4,500 | 11,250 | 0,045 | 0,081 | 0,041 | 0,071 |
| 2,500 | 5,000 | 12,500 | 0,040 | 0,072 | 0,038 | 0,064 |

от горизонтального расстояния между точками. Пусть точность отсчета уровня будет $a$ (в *мм*), точность нивеллировки — $b$ (в *мм*), гидравлический уклон (истинный) — $I$ (в тысячных), ошибка определения уклона $C$ (в %). Тогда необходимое расстояние $L$ (в *км*) между точками (скважина, шурф) можно определить по формуле

$$L = \left[\frac{b \pm \sqrt{b^2 + 56{,}4CIa}}{20CI}\right]^2. \qquad (106)$$

Из этой формулы можно вычислить также точность определения уклона $C$ при принятых $L$, $I$, $a$ и $b$.

В табл. 19 приведены расстояния между точками при точности отсчета уровня воды в 5 и 10 *мм*.

Из табл. 19 можно, например, видеть, что при точности замера уровня в 10 *мм* (обычная точность), при нивеллировке IV разряда, при расстоянии в 207 *м* и при истинном уклоне 0,001, ошибку определения этого уклона получаем в 10%; при меньшем же расстоянии ошибка увеличится.

## ГЛАВА X

# О ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ

### 48. Особенности определения ресурсов подземных вод и ключей в условиях вечной мерзлоты

При определении ресурсов подземных вод и ключей в районах вечной мерзлоты необходимо особенно тщательно учитывать температурные условия и возможность их изменения. Это вызывается тем, что на различных участках подземных вод и их выходах в разные сезоны года, а также и через ряд лет может происходить повышение или понижение температуры, что вызывает оттаивание или замерзание водоносных слоев.

Для примера на рис. 29 показаны условия изменения места выхода ключа в связи с промерзанием зимой активного слоя: летом, осенью и в начале зимы ключ выходит ниже по склону, а зимой и весной выше.

Таким образом в районах вечной мерзлоты нужно учитывать возможность изменения дебита и места выхода ключей в связи с промерзанием. Каптаж ключа, безусловно, необходимо заглублять ниже активного слоя.

В некоторых случаях происходит промерзание водоносного слоя. В 1933—1934 гг. производились изыскания на подрусловые воды для водоснабжения г. Якутска. Температурные наблюдения этих изысканий показали, что на глубинах даже свыше 10 *м* под влиянием изменения режима поверхностного водного потока началось промерзание таликов.

В других случаях происходит постепенное оттаивание глубоких мерзлотных слоев.

При расчетах ресурсов подрусловых вод в районе вечной мерзлоты следует учитывать изменение площади поперечного сечения подземного потока. На рис. 30 показана схема подрусловых вод в районе вечной мерзлоты. Очевидно, что площадь поперечного

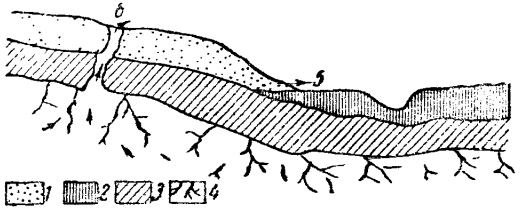



**Рис. 29. Изменение места выхода ключа в районе вечной мерзлоты в связи с промерзанием деятельного слоя.**

*1*—активный слой (зимнее промерзание)—пески с гравием; *2*—активный слой (зимнее промерзание)—глинистые породы; *3*—слой вечной мерзлоты; *4*—трещиноватые водоносные породы (с положительной температурой); *5*—выход ключей летом, осенью и в начале зимы; *6*—выход ключа зимой и весной.

сечения подруслового потока — талика с водой будет меняться как по сезонам одного года, так и за ряд лет.

Величина ресурсов глубоких (подмерзлотных) вод также может меняться в связи, например, с изменением положительных и

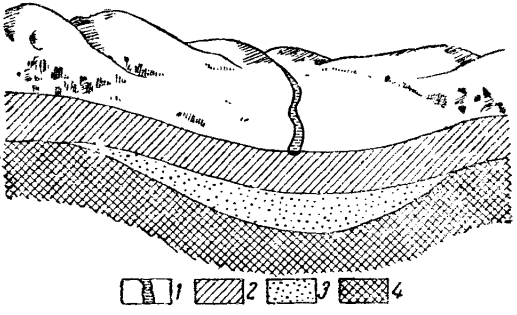



**Рис. 30. Подрусловые воды в районе вечной мерзлоты.**

*1*—река; *2*—активный слой (зимнее промерзание); *3*—талик с водой—подрусловой поток; *4*—вечная мерзлота.

отрицательных температур пород, через которые фильтруется поверхностная вода в области питания указанных подмерзлотных вод.

Таким образом в районах вечной мерзлоты одним из важнейших факторов при оценке надежности ресурсов подземных вод является температурный режим: постоянство температуры подзем-

ных вод создает уверенность в обеспеченности ресурсов; уменьшение температуры вызывает опасение в надежности ресурсов в связи с возможностью перемерзания водоносного горизонта или его части.

В условиях вечной мерзлоты наиболее надежными являются подмерзлотные и подрусловые воды, менее надежны межмерзлотные. Воды надмерзлотные в активном слое могут быть использованы лишь для временного мелкого водоснабжения на летний и осенний периоды.

При оценке ресурсов подземных вод в условиях вечной мерзлоты должны быть приведены тщательные данные по температуре не только водоносных горизонтов, но также и пород, залегающих над водоносными пластами и желательно под ними.

## ГЛАВА XI

# О КАЧЕСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

### 49. Оценка качества подземных вод для водоснабжения. Оценка возможности изменения состава воды

При оценке ресурсов подземных вод для целей водоснабжения необходимо рассматривать не только количество, но также и качество этих подземных вод.

Оценка качества воды делается по данным анализов (состав анализов см. § 4, гл. II, часть первая) с учетом гидрогеологических условий. При этом должна быть разобрана возможность изменения состава воды. Это изменение зависит от гидрогеологических условий, санитарного состояния в области питания и эксплоатации подземных вод, степени изменения режима подземных вод при эксплоатации, а также от различных технических мероприятий (устройство поглощающих скважин, неудовлетворительная изоляция в скважинах и проч.).

Для оценки изменения качества воды особо важны данные анализов воды, полученные при эксплоатации за ряд лет.

При расчете на береговую инфильтрацию следует рассчитывать время движения воды от реки до каптажных сооружений, чтобы предотвратить проникновение бактерий в зону каптажных сооружений.

При понижении уровня воды в подземных водах, дренирующихся в море или соленые озера, нельзя допускать уклон от моря, так как в этом случае произойдет засолонение водоносного горизонта. Такое явление произошло в районе водосборов водопровода одного из заводов УССР в районе Азовского моря. В водоносном горизонте, приуроченном к известнякам среднего сармата, в 500—800 *м* от берега, был устроен водосбор из скважин. Из этих скважин откачивалось в 1939 г. 4500 $м^3$/*сутки* воды; при этом отметка уровня воды в центре депрессионной воронки снизилась почти до —2,0 *м* абс. высоты (на 3,8 *м* ниже против

прежнего). Так как отметки уровня воды Азовского моря колеблются от +1,2 до —1,1 *м* абс. высоты, то гидравлический уклон получился от моря к водосборам. В связи с этим резко увеличилась минерализация подземных вод, что видно из табл. 20.

На примере эксплоатации среднесарматского водоносного горизонта видно, что допустимое понижение (а следовательно и эксплоатационные ресурсы) определяются также условиями изменения качества воды.

Таблица 20

| Компоненты | Годы | |
|---|---|---|
| | 1934—1935 | 1939 |
| Общая жесткость в немецких градусах | 20—30 | 40—70 |
| Cl, *мг/л* | 200 | 360—500 |
| $SO_4$, *мг/л* | 350 | 700—1500 |
| Сухой остаток, *мг/л* | 940—1200 | около 2000 |

Если между двумя водоносными горизонтами имеется близкая связь и при эксплоатации уровень воды в одном из водоносных горизонтов по сравнению с уровнем воды другого горизонта понижается, то начнется приток воды из последнего водоносного горизонта в первый.

Например, в районе г. Брянска, в верхнем водоносном горизонте девонских известняков минерализация меньше, чем в лежащем ниже, но между ними имеется сообщение. В скважине (из верхнего горизонта) общая жесткость увеличилась за время с 1905 по 1927 г. с 6,5 до 11,5 нем. градусов, что получилось в связи с притоком воды из лежащего ниже горизонта в верхний.

Зная состав воды обоих водоносных горизонтов, можно учесть изменение качества воды в эксплоатируемом горизонте.

При проектировании понижения уровня воды в неглубоких горизонтах нужно учитывать также изменения в зоне аэрации.

Например, резкое изменение качества воды произошло во флювиогляциальном водоносном горизонте Мытищинского водопровода. Там каптаж ключей для водоснабжения Москвы был устроен в самом начале XIX столетия; затем в конце этого века перешли к более глубокому понижению уровня воды путем устройства трубчатых колодцев. В 1902 г. дебит был доведен до 43 000 $м^3$/*сутки*; уровень воды при этом снизился и минерализация в колодцах южной части водосбора сильно возросла; в частности, содержание $SO_3$ за время с 1901 до 1907 г. увеличилось от 50 до 500 *мг/л*, а общая жесткость с 15 до 50 нем. градусов.

Между тем в северной части водосбора минерализация изменилась слабо. Такое явление объясняется отсутствием болот в северной части водосбора и наличием их в южной части, где, в связи с понижением уровня воды, условия окислительных процессов резко улучшились; при наличии пирита в водоносном

слое появлялось значительное количество серной кислоты с последующим образованием легко растворимых солей. При дальнейшей инфильтрации воды через осушенную зону вновь полученные соединения растворялись, и вода с увеличенной минерализацией поступала затем в водопровод.

Требования к качеству воды определяются ее назначением.

Вода для хозяйственно-питьевого водоснабжения должна удовлетворять следующим требованиям: быть безвредной для здоровья, иметь приятный вкус и не оказывать вредного влияния на хозяйственно-бытовые процессы. Безвредность воды определяется отсутствием патогенных бактерий и ядовитых (в недопустимом количестве) веществ.

Бактериологическая оценка воды делается на основании анализов по показателям общего содержания бактерий (в 1 *см*$^3$) и коли-тест [1].

Бактериологически безвредной по стандарту $\frac{\text{СТ}}{\text{НККХ и НКЗ РСФСР}}$ считается вода со следующими показателями:

| Показатели | Для городов РСФСР | Для Москвы |
|---|---|---|
| Количество бактерий в 1 *см*$^3$ | Не более 100 | Не более 20 |
| Коли-тест | „ „ 3 | „ „ 2 |

Отмечается, что эти нормы не являются предельными, и требования к воде могут быть повышены.

Для подземных вод нормы вышеуказанного стандарта являются низкими и могут быть повышены примерно в 2 раза, т. е. можно требовать такие показатели: количество бактерий в 1 *см*$^3$ не более 10 и коли-тест не более 1 (или даже 0).

Из химических признаков, указывающих на загрязнение, показателями могут быть: присутствие аммиака, нитритов и нитратов, повышенная окисляемость, наличие сероводорода, повышенное содержание хлора и натрия. При наличии указанных показателей необходимо оценить источник их происхождения. Если перечисленные компоненты связаны с происходящими в недрах земли процессами (в основном минерального происхождения), то наличие этих компонентов не должно опорачивать чистоту воды. Если же указанные компоненты связаны с поверхностным происхождением, то это указывает на загрязнение подземных вод.

Требования к минерализации воды для различных мест различны: для районов, обеспеченных водой, они более высокие, а для районов с недостатком пресной воды — пониженные. Так, например, в засушливых районах Средней Азии для питья исполь-

[1] Коли-тест — количество кишечных палочек в 1 *л* воды.

зуют воды с сухим остатком до 3000—5000 *мг/л*. Такая вода в районах средней полосы Европейской части СССР будет признана негодной для питья.

Обычно пригодной для хозяйственно-питьевого водоснабжения считается вода с минерализацией не более 500—1000 *мг/л*.

Для отдельного противопожарного водоснабжения требования к качеству воды весьма скромны: можно ограничиться лишь отсутствием значительной взвеси, которая может портить насосы и засорять сеть.

Для противопожарного водоснабжения, объединенного с хозяйственно-питьевым, требования к воде предъявляются те же, что и для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Для промышленного и транспортного водоснабжения требования определяются целевым использованием: в одних случаях требования предъявляются к отдельным компонентам солевого состава, в других случаях (например для охлаждения) важнейшее значение имеет температура воды.

При оценке качества воды следует определять корродирующее влияние ее на водопроводные сооружения и насосы, а для парового хозяйства и промышленного водоснабжения также и на аппаратуру.

Затем необходимо оценивать возможность выпадения осадков в системе водопровода, а для парового хозяйства и промышленного водоснабжения — также и в аппаратуре.

Если вода не удовлетворяет предъявляемым к ней качествам, то следует учесть экономическую целесообразность ее улучшения.

## ЛИТЕРАТУРА


1. Агаджанов А. М. Расчет дебитов взаимодействующих в артезианском потоке скважин. „Разведка недр", № 3, 1938.
2. Альтовский М. Е. Временная инструкция по расчету взаимодействующих артезианских скважин. Госгеолиздат, М. — Л., 1940.
3. Богомолов Г. В. К методике определения производительности пластов откачкой. Гидротехгеоинститут, вып. 18, М., 1933.
4. Бутов П. И. Определение мощности подземных потоков. Госгеолиздат, М. — Л., 1931.
5. Водоснабжение железных дорог в районах вечной мерзлоты. Трансжелдориздат, М., 1935.
6. Игнатович Н. К. О методике подсчета запасов подземных вод артезианского бассейна. „Разведка недр" № 8, 1937.
7. Каменский Г. Н. Основы динамики подземных вод, ч. II, ОНТИ, М. — Л., 1935.
8. Маков К. И. К методике подсчета запасов подземных вод крупных гидрогеологических районов. „Разведка недр" № 8, 1937.
9. Маков К. И. О методике подсчета запасов подземных вод артезианского бассейна. „Разведка недр" № 23, 1936.
10. Малишевский Н. Г. Новый способ определения мощности подземных потоков. Труды I Всесоюзного (XIII) водопроводного и санитарно-технического съезда в г. Баку в 1925 г., вып. 4, ч. 2, М., 1928.
11. Павловский Н. П. Неравномерное движение грунтовых вод. Кубуч, Л., 1932.
12. Плотников Н. А. Водоснабжение промышленных предприятий и населенных мест. ч. I, ОНТИ, М. — Л., 1938.
13. Плотников Н. А. Водоснабжение на железнодорожном транспорте, ч. I, ГТЖИ, М., 1940.
14. Плотников Н. А. Расчет расхода напорного подземного потока по методу пьезометрии. „Разведка недр", № 4, 1937.
15. Плотников Н. А. Расчет ресурсов подземных вод по методу депрессионных воронок. „Водоснабжение и санитарная техника", № 3, 1936.
16. Принц Е. Гидрогеология. Сельхозгиз, М. — Л., 1932.
17. Принц Е. и Кампе Р. Гидрогеология I, II, источники. Сельхозгиз, М., 1937.
18. Саваренский Ф. П. Гидрогеология. Гос. горн.-геол.-нефт. издат., Новосибирск, 1934.
19. Тамм Е. Ф. О методике подсчета запасов артезианских вод. „Разведка недр", № 11, 1937.
20. Тамм Е. Ф. Расчет дебитов взаимодействующих артезианских скважин. „Водоснабжение и санитарная техника" № 9, 1939.
21. Толстой М. П. О методике подсчета ресурсов подземных вод артезианского бассейна. „Разведка недр" № 8, 1937.

Ответственный редактор *Богомолов Г. В.* Техредакторы: *Красновская А. И.* и *Циклова А. С.*

Сдано в набор 31/V-45 г. Подписано к печати 5/I-46 г.

Печ. листов $7^1/_4$ Учетно-авт. листов 7,57 Тираж 1000 экз.

М 00802 Цена 11 руб. Формат бумаги $60\times92^1/_{16}$

4-я типография им. Евг. Соколовой треста «Полиграфкнига» ОГИЗа при СНК РСФСР, Ленинград, Измайловский пр., 29.

## ОПЕЧАТКИ

| Стр. | Строка | Напечатано | Следует читать | По чьей вине |
|---|---|---|---|---|
| 9 | Таблица, графа 3 | Верхние три строки текста относятся к категории В | | техн. редактора |
| 32 | Рис. 2., подпись | $2R$ — ширина зоны питания | $2R$ — ширина зоны влияния | редактора |
| 32 | 4 сверху | первых | парных | » |
| 33 | 4 снизу | $K_{cp}$ и $F_{cp}$, | $K_{cp} \times F_{cp}$, | издательства |
| 54 | Рис. 9 подпись | независимыми | пересекающимися | редактора |
| 54 | Рис. 10 | пересекающимися | независимыми | » |
| 58 | 2 сверху | $\lg \frac{2b}{2}$ | $\lg \frac{2b}{r}$ | » |
| 62 | 15 снизу | приведенное в табл. 5, в понижение | в понижение, приведенное в табл. 5, | » |
| 65 | 7 сверху | $\frac{0{,}2109}{0{,}2058}$ | $\sqrt{\frac{0{,}2109}{0{,}2058}}$ | » |
| 90 | 2 снизу | $= \frac{E\,Q_{min}}{Q}$ | $k = \frac{E\,Q_{min}}{Q}$ | » |

Плотников Зак. 1275.