

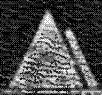
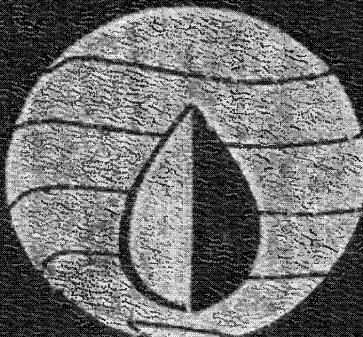
ОХРАНА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

В.А. МИРОНЕНКО
В.Г. РУМЫНИН

ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГЕОЭКОЛОГИИ

том 2

Опытно-
миграционные
исследования





**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**РЕДАКЦИОННЫЙ
СОВЕТ**

Председатель
Л.А. ПУЧКОВ

Зам. председателя
Л.Х. ГИТИС

Члены редсовета
И.В. ДЕМЕНТЬЕВ

А.П. ДМИТРИЕВ

Б.А. КАРТОЗИЯ

В.В. КУРЕХИН

М.В. КУРЛЕНЯ

В.И. ОСИПОВ

Э.М. СОКОЛОВ

К.Н. ТРУБЕЦКОЙ

В.В. ХРОНИН

В.А. ЧАНТУРИЯ

Е.И. ШЕМЯКИН

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

*ректор МГГУ,
чл.-корр. РАН*

*директор
Издательства МГГУ*

академик РАН

академик РАН

академик РАН

академик РАН

академик РАН

академик МАН ВШ

академик РАН

профессор

академик РАН

академик РАН

ОХРАНА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

**В.А. МИРОНЕНКО
В.Г. РУМЫНИН**

**ПРОБЛЕМЫ
ГИДРО-
ГЕОЭКОЛОГИИ**

том 2

**ОПЫТНО-МИГРАЦИОННЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ**

Издание 2-е, стереотипное

МОСКВА

**ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

2 0 0 2



УДК 622:502

Издание осуществлено при поддержке Российского Фонда
фундаментальных и прикладных исследований по проекту 98-05-78006

Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогоеэкологии. В 3-х т.
Т. 2. Опытно-миграционные исследования. — 2-е изд., стер. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. — 394 с. ISBN 5-7418-0123-4

В монографии рассматриваются теоретические основы миграционных процессов, разрабатываются концептуальные (на базе исследования краевых задач) модели массопереноса в типовых гетерогенных водоносных системах с учетом физико-химических преобразований вещества; обосновываются эффективные алгоритмы решения миграционных задач методами математического (численного) моделирования; излагаются методы планирования и расчетные схемы интерпретации полевых индикаторных опробований, развиваются количественные подходы к постановке и обработке данных мониторинга качества подземных вод на участках их техногенного загрязнения, обосновываются модели для прогнозирования миграции высокоплотных солевых растворов, нефтепродуктов, радионуклидов и некоторых других веществ и компонентов, представляющих угрозу для подземной гидросферы на участках загрязнения; оценивается эффективность различных методов реабилитации качества подземных вод; обосновываются водоохраные мероприятия, рассматриваются особенности практической реализации предлагаемых исследований авторов на различных объектах (горнодобывающие районы, водозaborы подземных вод, участки складирования высокотоксичных, в том числе радиоактивных, отходов, атомные электростанции и др.).

УДК 622:502

ISBN 5-7418-0123-4

© В.А. Мироненко, В.Г. Румынин, 1999
© Издательство МГГУ, 1999
© В.А. Мироненко, В.Г. Румынин, 2002
© Издательство МГГУ, 2002

Содержание

ТОМ 1

| | |
|------------------|----|
| Предисловие..... | 27 |
| Введение..... | 29 |

| | | |
|----------------|--|-----------|
| ЧАСТЬ 1 | Гидродинамические основы теории массопереноса в подземных водах и породах зоны аэрации..... | 34 |
|----------------|--|-----------|

| | |
|--|-----------|
| Глава 1. Основные физические механизмы массопереноса в водоносных породах и его математическая формализация | 36 |
|--|-----------|

| | |
|--|----|
| 1.1. Формы переноса и рассеяния вещества | 36 |
| 1.1.1. Конвективный перенос | 36 |
| 1.1.2. Диффузионный перенос | 43 |
| 1.1.3. Дисперсионный перенос | 45 |
| 1.1.4. Осмос и наведенные им процессы..... | 53 |
| 1.1.5. Основные представления о миграции многофазных жидкостей..... | 59 |
| 1.2. Базовые уравнения и краевые условия для мате- матического описания миграционных процессов..... | 64 |
| 1.2.1. Общее уравнение массопереноса и его основные дифференциальные представления | 64 |
| 1.2.2. Уравнения миграционного потока перемен- ной плотности | 68 |
| 1.2.3. Краевые условия | 71 |

| | |
|---|------------|
| Глава 2. Анализ физико-математических моделей миграции в гомогенных водоносных породах | 78 |
| 2.1. Расчетная схема поршневого вытеснения | 79 |
| 2.2. Квазиодномерная расчетная схема продольной микродисперсии | 82 |
| 2.3. Пространственные модели миграции в гомогенных водоносных породах | 92 |
| 2.3.1. Поперечная микродисперсия в одномерном фильтрационном потоке | 92 |
| 2.3.2. Особенности пространственного рассеяния в условиях неодномерного фильтрационного поля | 103 |
| Глава 3. Анализ физико-математических моделей миграции (макродисперсии) в гетерогенных водоносных комплексах | 117 |
| 3.1. Модели миграции в упорядоченном стратифицированных пластах | 121 |
| 3.1.1. Двухслойные системы..... | 122 |
| 3.1.2. Многослойные водоносные пласти | 131 |
| 3.1.3. О значимости вертикальной конвекции в водоносных и разделяющих пластах | 137 |
| 3.2. Комплексы трещиновато-пористых пород | 141 |
| 3.2.1. Принципиальные модели массопереноса ... | 143 |
| 3.2.2. О параметрической тождественности расчетных моделей миграции | 151 |

| | |
|---|-----|
| 3.2.3. Об аналогии между процессами массо- и теплопереноса | 153 |
| 3.2.4. Некоторые обобщенные решения и их анализ..... | 154 |
| 3.3. Анализ миграции в неупорядоченно-неоднородных системах на базе стохастических моделей макродисперсии | 157 |
| 3.3.1. Общие представления о стохастических моделях | 157 |
| 3.3.2. Анализ принципиальных результатов изучения трехмерной макродисперсии в неоднородных средах..... | 162 |
| 3.3.3. Стохастический анализ некоторых частных задач миграции в макронеоднородных средах | 169 |
| 3.3.3.1. Макродисперсия при площадной инфильтрации..... | 169 |
| 3.3.3.2. Макродисперсия при плотностной конвекции..... | 172 |
| 3.4. Макродисперсия в стохастически неоднородных средах с двойной пористостью | 176 |
| 3.5. Основные выводы теоретического анализа | 179 |
| Глава 4. Основные представления о переносе влаги и загрязнений через зону аэрации..... | 192 |
| 4.1. Теоретические основы влагопереноса в горных породах при неполном водонасыщении | 193 |
| 4.1.1. Общая энергетическая характеристика процесса влагопереноса..... | 193 |
| 4.1.2. Закон движения влаги..... | 197 |

| | |
|--|------------|
| 4.1.3. Влияние гетерогенности ненасыщенных сред на влагоперенос | 203 |
| 4.1.4. Математические основы вертикального влагопереноса | 210 |
| 4.2. Основные представления о массопереносе в ненасыщенных грунтах..... | 215 |
| 4.2.1. Перенос в гомогенных грунтах..... | 215 |
| 4.2.2. Особенности массопереноса в ненасыщенных гетерогенных средах..... | 219 |
| ЧАСТЬ 2 Гидрогохимические основы миграции подземных вод..... | 226 |

| | |
|--|------------|
| Глава 5. Гидрогохимическое описание условий и процессов, контролирующих качественный состав подземных вод | 226 |
| 5.1. Естественный гидрогохимический фон и его роль в проявлениях буферных свойств водоносной системы..... | 227 |
| 5.1.1. Общие сведения о качественном составе подземных вод | 227 |
| 5.1.2. Определяющие минеральные равновесия .. | 231 |
| 5.2. Основные процессы физико-химического преобразования вещества в подземных растворах (без учета фильтрации) | 236 |
| 5.2.1. Межфазовые сорбционные и ионообменные взаимодействия | 237 |
| 5.2.1.1. Равновесная сорбция (адсорбция) | 237 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.1.2. Модель поверхностного комплексообразования..... | 246 |
| 5.2.1.3. Равновесный ионный обмен..... | 248 |
| 5.2.1.4. Модель кинетики сорбционных и ионообменных взаимодействий | 255 |
| 5.2.2. Термодинамика и кинетика процессов растворения-осаждения | 257 |
| 5.2.3. Гомогенные (внутрифазовые) взаимодействия..... | 262 |
| 5.2.3.1. Комплексообразование | 262 |
| 5.2.3.2. Исходные представления о коллоидных формах переноса загрязнителей..... | 264 |
| 5.2.3.3. Деструкция химических соединений | 267 |
| Глава 6. Миграционные модели физико-химических трансформаций | 281 |
| 6.1. Миграция активных компонентов в гомогенных породах..... | 281 |
| 6.1.1. Сорбционные и ионообменные взаимодействия..... | 281 |
| 6.1.1.1. Равновесная сорбция..... | 281 |
| 6.1.1.2. Особенности проявления кинетики сорбционных процессов | 286 |
| 6.1.1.3. Ионообменные взаимодействия в потоке подземных вод | 288 |
| 6.1.2. Закономерности миграции компонентов, участвующих в процессах растворения-осаждения | 292 |
| 6.1.2.1. Простейшие расчетные схемы..... | 293 |

| | |
|---|-----|
| 6.1.2.2. Процессы равновесного растворения-осаждения вещества применительно к растворам сложного состава на подвижных гидрогеохимических барьерах | 299 |
| 6.1.3. Влияние внутрифазных реакций на интенсивность массопереноса и характер концентрационных фронтов..... | 309 |
| 6.1.3.1. Расчетные схемы, учитывающие роль комплексообразования в сорбционных и ионообменных процессах | 309 |
| 6.1.3.2. Модель миграции радиоактивных растворов, содержащих коллоидные частицы | 315 |
| 6.1.3.3. Деструкция мигрантов..... | 318 |
| 6.2. Модели миграции неконсервативных компонентов в гетерогенных водоносных системах..... | 325 |
| 6.2.1. Сорбция в стратифицированных пластах ... | 326 |
| 6.2.2. Сорбция в стохастически неоднородных системах | 330 |
| 6.2.3. Миграция в трещиновато-пористых породах. | 333 |
| 6.2.3.1. Особенности межфазовых взаимодействий..... | 333 |
| 6.2.3.2. Коллоидный транспорт вещества в трещиновато-пористых породах | 335 |
| 6.2.3.3. Описание деструкции вещества в трещиновато-пористых породах | 340 |
| 6.2.3.4. Обобщенный аналитический подход к исследованию миграции в гетерогенные системах..... | 344 |

| | | |
|--|--|------------|
| ЧАСТЬ 3 | Численное моделирование процессов загрязнения подземных вод | 352 |
| Глава 7. Анализ принципов и методов численного моделирования процессов загрязнения подземных вод | | |
| 353 | | |
| 7.1. Общие представления о численных методах решения задач массопереноса и принципах построения численных схем | 354 | |
| 7.1.1. Краткая характеристика методов конечных разностей и конечных элементов | 354 | |
| 7.1.2. Построение поля напоров | 356 | |
| 7.1.3. Свойства конечно-разностных аппроксимаций одномерных уравнений переноса | 357 | |
| 7.1.4. Поперечная численная дисперсия | 365 | |
| 7.1.5. Аппроксимация временной производной ... | 367 | |
| 7.1.6. Особенности задания граничных условий .. | 369 | |
| 7.1.7. Принципы решения матричных уравнений . | 370 | |
| 7.1.8. Основы метода характеристик и метода случайных блужданий | 373 | |
| 7.1.9. Обобщающие выводы | 375 | |
| 7.2. Принципы построения численных алгоритмов для решения задач миграции подземных вод | 380 | |
| 7.2.1. Расщепление дифференциальных операторов в уравнениях переноса | 380 | |
| 7.2.2. Схема аппроксимации составляющих переноса | 382 | |
| 7.3. Специфика численных моделей и схем при анализе различных механизмов миграции | 392 | |

| | |
|---|------------|
| 7.3.1. Алгоритмы численного моделирования миграции с учетом физико-химических взаимодействий | 292 |
| 7.3.1.1. Общие принципы моделирования миграции многокомпонентных растворов | 393 |
| 7.3.1.2. Особенности моделирования кинетических процессов (на примере сорбции) | 401 |
| 7.3.2. Особенности численного моделирования миграции подземных вод переменной плотности и некоторые частные результаты | 405 |
| 7.3.3. Особенности моделирования миграции в трещиновато-пористых средах | 412 |
| Глава 8. Исследование процессов миграции на численных моделях | 422 |
| 8.1. Исследование на математических моделях мас-сопреноса в гетерогенных водоносных пластах..... | 422 |
| 8.1.1. Анализ закономерностей макродисперсии .. | 423 |
| 8.1.2. Анализ чувствительности на стохастических моделях гетерогенных сред с неупорядоченной структурой | 429 |
| 8.2. Исследование на математических моделях прос-тейших физико-химических взаимодействий при миграции подземных вод | 436 |
| 8.2.1. Ионообменные процессы | 437 |
| 8.2.1.1. Ионный обмен при миграции в комплексах гомогенных пород..... | 437 |
| 8.2.1.2. Ионный обмен при миграции в комплексах гетерогенных пород..... | 442 |

| | |
|---|-----|
| 8.2.2. Исследование процессов комплексообразования..... | 448 |
| 8.3. Исследование на математических моделях некоторых особенностей радионуклидного транспорта в подземных водах | 449 |
| 8.3.1. О точности сеточных решений высокогradientных задач массопереноса..... | 449 |
| 8.3.2. Исследование миграции радионуклидов в составе многокомпонентных растворов..... | 451 |
| 8.4. Исследование миграции несмешивающихся жидкостей в ненасыщенной зоне | 459 |
| 8.5. Некоторые замечания о состоянии исследований по численному моделированию миграции | 461 |
| ЧАСТЬ 4 | |
| Принципы и методы прогноза процессов загрязнения подземных вод..... | 467 |

Глава 9. Схематизация миграционных процессов .469

| | |
|---|-----|
| 9.1. Исходные предпосылки схематизации | 469 |
| 9.2. Схематизация геофильтрационных условий массопереноса | 471 |
| 9.2.1. Схематизация пространственной изменчивости и анизотропии фильтрационных свойств водоносных пластов | 471 |
| 9.2.2. Схематизация пространственной структуры фильтрационного потока | 473 |

| | |
|---|-----|
| 9.2.3. Схематизация условий питания (разгрузки) водоносных пластов по площади их распространения | 477 |
| 9.2.4. Заключительные выводы..... | 479 |
| 9.3. Схематизация процессов массопереноса (собственно миграционная схематизация) | 480 |
| 9.3.1. Схематизация влияния массопереноса на расчетную схему фильтрации | 481 |
| 9.3.2. Схематизация гидродинамических процессов миграции (на примере физически и химически нейтральных компонентов) | 484 |
| 9.3.2.1. Выявление значимости отдельных механизмов конвективно-дисперсионного переноса и схематизация структуры миграционного потока (в гомогенных породах) | 484 |
| 9.3.2.2. Схематизация граничных условий миграции..... | 489 |
| 9.3.2.3. Особенности схематизации миграционного процесса в гетерогенных водоносных комплексах | 493 |
| 9.3.3. Особенности схематизации миграционного потока в условиях плотностной конвекции | 495 |
| 9.3.4. Схематизация физико-химических условий и процессов миграции неконсервативных компонентов..... | 498 |
| 9.4. О значении схематизации для расширения границ применимости аналитических методов | 503 |
| Глава 10. О возможностях прогноза процессов загрязнения в водоносных пластах аналитическими методами | 508 |

| | |
|--|-----|
| 10.1. Прогноз концентрационных полей на участках размещения поверхностных бассейнов промстоков и других локальных (сосредоточенных) источников загрязнения | 510 |
| 10.1.1. Плановые миграционные модели | 510 |
| 10.1.2. Профильные миграционные модели..... | 515 |
| 10.1.2.1. Локальный источник загрязнения в двухслойном пласте..... | 516 |
| 10.1.2.2. О роли поперечной (профильной) гидродисперсии | 522 |
| 10.1.2.3. Об учете плотностной конвекции.... | 527 |
| 10.2. Прогноз качества подземных вод при их площадном загрязнении инфильтрацией или нисходящим перетеканием | 528 |
| 10.2.1. Постановка задач прогноза | 528 |
| 10.2.2. Плановые миграционные модели | 531 |
| 10.2.2.1. Основные балансовые уравнения для пласта с инфильтрацией и их решения.... | 531 |
| 10.2.2.2. Проявление гетерогенных свойств комплексов трещиновато-пористых пород.... | 536 |
| 10.2.2.3. Роль диффузионных процессов при миграции загрязненных вод через покровные и разделяющие слои..... | 538 |
| 10.2.3. Профильные двумерные модели..... | 538 |
| 10.3. Прогноз загрязнения, вызванного подземными источниками некондиционных вод | 542 |
| 10.3.1. Субвертикальное подтягивание глубоких некондиционных вод к водозаборным скважинам | 543 |

| | |
|---|----------------|
| 10.3.1.1. Вариант отсутствия относительного водоупора между пресными и солеными во- дами | 543 |
| 10.3.1.2. Вариант наличия разделяющего водоупора между пресными и солеными во- дами | 549 |
| 10.3.2. Субгоризонтальная миграция от подзем- ного источника некондиционных вод..... | 552 |
| 10.4. О прогностических возможностях стохастичес- ких моделей миграции | 555 |
| 10.5. Краткая характеристика базовых компьютер- ных программ | 561 |
| 10.5.1. Численная модель трехмерной фильтрации подземных вод — программа MODFLOW | 561 |
| 10.5.2. Численная модель трехмерного массопе- реноса и дисперсии в подземных водах — програм- ма MT3D | 563 |
| 10.5.3. Численная модель двумерного массопере- носа и дисперсии в подземных водах — програм- ма MOC | 564 |
| 10.5.4. SUTRA — численная модель фильтрации и массо-теплопереноса в водоносных пластах (с уче- том переменной плотности подземных вод и на- личия ненасыщенной зоны) | 566 |
| 10.5.5. Программа HT3D | 569 |
| 10.5.6. Программа FLOWPATH | 571 |
| 10.5.7. Программа FLOWNET | 572 |
| Глава 11. Прогнозные оценки роли аэрации в развитии процессов загрязнения подземных вод | 576 |

| | |
|---|-----|
| 11.1. Общая характеристика основных прогнозных ситуаций и методических подходов к их анализу | 576 |
| 11.1.1. Постановка задач для исследования и их типизация | 577 |
| 11.1.2. Оценка по предлагаемым участкам размещения поверхностных бассейнов промстоков..... | 581 |
| 11.1.3. Оценки защитных свойств зоны | 584 |
| 11.2. Особенности прогноза миграции загрязнений, вносимых в водоносные пласты с площадной инфильтрацией | 593 |
| 11.3. О прогнозных оценках развития процессов загрязнения в породах зоны аэрации | 595 |
| 11.4. Численная модель влаго- и массопереноса в зоне аэрации — VS2DT | 606 |

ТОМ 2

| | |
|----------------|----|
| Введение | 28 |
|----------------|----|

| | |
|----------------|---|
| ЧАСТЬ 5 | Опытно-миграционные опробования в водоносных |
| | пластах 33 |

| | |
|--|--|
| Глава 12. Анализ эффективности лабораторных | |
| экспериментов как альтернативы опытным | |
| опробованиям 34 | |

| | |
|--|--|
| 12.1. Общие положения и предпосылки к дифферен- | |
| циации экспериментальных схем 34 | |

| | |
|---|--|
| 12.2. Определение параметров сорбции и ионного | |
| обмена 37 | |

| | |
|--|--|
| 12.3. Изучение диффузионных параметров 43 | |
|--|--|

| | |
|--|--|
| Глава 13. Анализ целесообразных схем и условий | |
| постановки опытно-миграционных опробований . 49 | |

| | |
|--|--|
| 13.1. Общие представления об индикаторных | |
| экспериментах 49 | |

| | |
|---|--|
| 13.1.1. Задачи и направленность индикаторных | |
| опробований (ИО) 49 | |

| | |
|--|--|
| 13.1.2. Сравнительная характеристика основных | |
| экспериментальных схем..... 52 | |

| | |
|---|--|
| 13.2. Взаимоотношение опытно-миграционных | |
| опробований с другими видами работ при гидрогое- | |
| логической разведке 57 | |

| | |
|--|----|
| 13.3. О масштабных эффектах и целесообразных условиях проведения ОМО | 61 |
| Глава 14. Обоснование расчетных моделей для опытно-миграционных опробований 69 | |
| 14.1. Исходные предпосылки схематизации и основные аналитические решения 69 | |
| 14.1.1. Исходные предпосылки к построению расчетных моделей | 69 |
| 14.1.2. Общая математическая постановка задачи миграции в плоскорадиальном потоке | 73 |
| 14.1.3. Особенности математического описания миграции индикатора при дуплетном опробовании квазигомогенных пород | 75 |
| 14.1.4. О возможном несоответствии структуры миграционного потока модельным представлениям | 81 |
| 14.2. Частные решения для квазигомогенных сред | 87 |
| 14.2.1. Приближенные решения для плоскорадиальной миграции и их сравнительная характеристика | 87 |
| 14.2.2. Представление решений для дуплетного опробования | 90 |
| 14.2.3. Решение для индикаторных опытов при откачке | 91 |
| 14.2.4. Односажинный эксперимент | 93 |
| 14.3. Частные решения для макротетерогенных пород | 95 |

| | |
|--|------------|
| 14.3.1. О расчетных схемах для опытов в комплексах стратифицированных пород..... | 95 |
| 14.3.2. Решение радиальных задач переноса в пласте гетерогенных трещиновато-пористых пород | 99 |
| 14.3.3. Тепловое воздействие на трещиноватый пласт..... | 105 |
| 14.3.4. Представление решений для дуплетного опробования..... | 109 |
| 14.3.5. О расчетных оценках при индикаторных опытах с откачкой..... | 112 |
| 14.3.6. Решения для односкважинной схемы опробования..... | 113 |
| 14.4. Анализ гидрохимической инерционности наблюдательных скважин | 116 |
| 14.5. Гидрохимическая инерционность запускных скважин, используемых в опытах при откачках | 121 |
| 14.6. Исследование некоторых задач индикаторного опробования на математических моделях | 123 |
| 14.6.1. Оценка эффективности дуплетного индикаторного опробования водоносных пластов | 123 |
| 14.6.2. О надежности интерпретации односкважинных трассерных экспериментов | 135 |
| Глава 15. Планирование и проведение опытно-миграционных опробований..... | 144 |
| 15.1. Рекомендации к планированию общей схемы миграционного эксперимента и опытного куста | 145 |

| | |
|---|------------|
| 15.1.1. Предпосылки к выбору опытных участков и схем опробования | 145 |
| 15.1.2. Предварительное обоснование пространственно-временного масштаба опробования..... | 147 |
| 15.1.3. Обоснование интервалов опробования и конструкций скважин | 150 |
| 15.1.4. Стохастическая интерпретация практических рекомендаций..... | 154 |
| 15.1.5. Об информации, привлекаемой к планированию ОМО..... | 157 |
| 15.2. Предпосылки и выбор индикатора | 159 |
| 15.3. Расчетное обоснование опытной схемы с выбором контролирующих показателей и дополнительных трассеров | 165 |
| 15.4. Проведение индикаторных опробований | 174 |
| 15.4.1. Предварительное опробование скважин опытно-миграционных кустов..... | 174 |
| 15.4.2. Запуск трассера и наблюдения за его миграцией | 178 |
| Глава 16. Интерпретация индикаторных опробований..... | 181 |
| 16.1. Диагностика опытных результатов и выбор расчетной модели | 181 |
| 16.1.1. Комплексы пористых пород..... | 181 |
| 16.1.2. Комплексы трещиноватых пород | 183 |
| 16.2. Методика количественной интерпретации и анализа опытных результатов | 189 |
| 16.2.1. Опыты в квазигомогенных средах | 189 |

| | |
|---|-----|
| 16.2.2. Опыты в гетерогенных средах..... | 194 |
| 16.2.3. Анализ чувствительности индикаторных кривых..... | 200 |
| 16.2.4. О привлечении математических моделей к планированию и интерпретации ОМО | 204 |
| 16.3. Примеры интерпретации индикаторных опробований..... | 205 |

ЧАСТЬ 6 | **Опытно-миграционные наблюдения (ОМН)
в водоносных пластах** 218

| | |
|---|-----|
| Глава 17. Задачи и условия проведения ОМН..... | 218 |
| 17.1. Роль и задачи ОМН | 218 |
| 17.2. Типизация условий проведения ОМН | 221 |

Глава 18. Принципы и методы теоретического анализа в связи с интерпретацией опытно-миграционных наблюдений

229

| | |
|--|-----|
| 18.1. Миграция трассеров от поверхностных источников загрязнения | 230 |
| 18.1.1. Профильные модели для гетерогенных систем..... | 230 |
| 18.1.2. Планово-двумерные квазигомогенные модели преноса (для ореолов рассеяния) | 235 |
| 18.1.3. Значение и учет структуры фильтрационного поля..... | 237 |
| 18.1.4. Значение погрешностей наблюдений | 239 |

| | |
|---|------------|
| 18.2. Миграция реальных стоков от поверхностных источников загрязнения | 242 |
| 18.2.1. Общий подход к построению расчетных моделей | 242 |
| 18.2.2. Простейшие схемы интерпретации данных наблюдений за миграцией стоков | 245 |
| 18.2.3. Особенности анализа условий миграции разноплотностных жидкостей | 249 |
| Глава 19. Постановка и методика проведения опытно-миграционных наблюдений..... | 254 |
| 19.1. Общие положения | 254 |
| 19.2. Принципы размещения пунктов гидрохимического контроля в водоносных пластах | 257 |
| 19.2.1. Загрязнение от поверхностных источников | 258 |
| 19.2.2. Загрязнение от подземных бассейнов некондиционных вод | 264 |
| 19.3. О дополнительных требованиях к оборудованию наблюдательных скважин | 267 |
| 19.4. Гидрохимическое опробование при наблюдениях и его достоверность | 278 |
| 19.4.1. Показатели, контролирующие качество подземных вод | 278 |
| 19.4.2. О требованиях к качеству гидрохимического опробования..... | 280 |
| 19.5. Изучение миграции минерализованных стоков методами поверхностной геофизики | 284 |

| | | |
|--|--|------------|
| ЧАСТЬ 7 | Опытное изучение условий фильтрации индикаторными методами в связи с оценкой процессов загрязнения подземных вод..... | 291 |
| Глава 20. Использование индикаторных методов при опытно-фильтрационных опробованиях..... 291 | | |
| 20.1. Использование индикаторов для детализации фильтрационного процесса при опытных откачках (нагнетаниях) 293 | | |
| 20.1.1. Предварительное опробование индикатор- ными методами скважин опытно-фильтрацион- ных кустов..... | 293 | |
| 20.1.2. Изучение профиля проницаемости водо- носного пласта | 296 | |
| 20.1.3. Изучение раскрытия индивидуальных трещин..... | 301 | |
| 20.1.4. Об эффективности фильтрационного опробования пластов по дуплетной схеме | 302 | |
| 20.1.5. Оценка плановой фильтрационной анизо- тропии | 306 | |
| 20.1.6. Об использовании естественных трассеров | 308 | |
| 20.2. Использование трассеров при изучении опы- тыми опробованиями вертикальной проницаемости и профильной фильтрационной анизотропии | 309 | |

| | |
|---|------------|
| Глава 21. Опытное изучение условий и параметров фильтрации индикаторными методами при проведении режимных наблюдений | 318 |
| | |
| 21.1. Использование глобальных техногенных индикаторов для калибрации гидрогеологических моделей | 319 |
| 21.1.1. Общие сведения о глобальных индикаторах..... | 319 |
| 21.1.2. О расчетных моделях | 324 |
| 21.1.3. Пример интерпретации данных тритиевого опробования подземных вод..... | 331 |
| 21.1.4. Теоретические основы тритий-гелий (-3) метода датирования возраста подземных вод | 333 |
| 21.2. Применение индикаторных гидрофизических методов для изучения фильтрационных потоков вблизи поверхностных водоемов и водотоков | 335 |
| 21.2.1. Определение скорости фильтрации резистивиметрией наблюдаемых скважин | 335 |
| 21.2.2. Гидрогеотермические наблюдения | 337 |
| 21.3. Оценка условий и параметров фильтрации по данным гидрохимических наблюдений за подтягиванием минерализованных вод из подземных бассейнов | 343 |

| | | |
|---|---|------------|
| ЧАСТЬ 8 | Опытное изучение условий переноса загрязнений через зону аэрации | 348 |
| | | |
| Глава 22. Опытное опробование пород зоны аэрации..... | | 349 |
| | | |
| 22.1. Опытная оценка вертикальной проницаемости покровных отложений и искусственных глинистых экранов | 350 | |
| 22.1.1. Об эффективности опытных наливов в шурфы | 351 | |
| 22.1.2. Лабораторная оценка проницаемости грунтов, экранирующих бассейны промстоков .. | 353 | |
| 22.2. Изучение водопроводящих свойств зоны аэрации опытными опробованиями в скважинах | 351 | |
| 22.2.1. Опробование вблизи поверхности грун- товых вод | 358 | |
| 22.2.2. Опробование зон разреза, удаленных от поверхности грунтовых вод | 359 | |
| 22.3. О целесообразных границах применения опыт- ных опробований для оценки параметров мас- сопереноса пород зоны аэрации | 372 | |
| | | |
| Глава 23. Опытные наблюдения для изучения условий переноса загрязнений через зону аэрации | | 379 |
| | | |
| 23.1. Задачи, состав и проведение наблюдений | 379 | |
| 23.2. Интерпретация результатов наблюдений | 386 | |

| | |
|---|------------|
| 23.2.1. Общие интерпретационные подходы..... | 386 |
| 23.2.2. Простейшие схемы интерпретации на примере лизиметрических наблюдений | 389 |
| 23.2.3. Интерпретация результатов наблюдений за глобальными трассерами | 390 |

Введение

В глобальной проблеме охраны геологической среды заметное место отводится защите от загрязнения важнейшего ее компонента — подземных вод. Вместе с тем, из накопленного опыта хорошо известно, что во многих случаях имели место и возникают вновь тяжелые экологические ситуации с загрязнением подземных вод, ни в коей мере не предполагавшиеся при проектировании тех или иных инженерных объектов (в частности, питьевых водоизаборов, горных дренажей, городской свалок, подземных хранилищ отходов и др.). Помимо чисто субъективных причин, подобные просчеты проектов во многом объясняются и объективным фактором принципиального свойства — их недостаточным информационным обеспечением. Применительно к гидрогеологии, речь здесь идет прежде всего об исходной информации для надежных оценок и прогнозов процессов техногенного загрязнения подземных вод: главное место в ней занимают сведения о механизмах и параметрах миграции загрязнений.

В этой связи, данный — второй — том нашего монографического исследования ориентирован на анализ и дальнейшее развитие научно-методической базы полевой гидрогеологии, ответственной за информационное обеспечение оценок и прогнозов загрязнения подземных вод. Основу этих работ составляют опытно-миграционные работы (ОМР) — индикаторные опробования и наблюдения, ориентированные на изучение механизмов и параметров миграции, т.е. на снижение информационного барьера, являющегося сейчас главным препятствием для адекватных взаимоотношений теории и практики.

* Напомним, что первый том посвящен проблемам теории геомиграционных процессов.

Несмотря на очевидную потребность практики, такого рода работы ставятся пока в весьма ограниченном объеме и обычно без должного методического обоснования; так, единичные полевые индикаторные эксперименты чаще всего носят исследовательский характер, а принятые в широкой практике схемы и методы наблюдений за загрязнением подземных вод лишь в редких случаях позволяют использовать их результаты для детального анализа собственно миграционных процессов.

Такое положение дел объясняется рядом причин: слабой разработанностью теоретических и методических основ упомянутых работ, часто неверно понимаемых возможностями отдельных их видов; отсутствием тесного сочетания традиционно разобщенных в гидрогеологии методов исследований — гидродинамических, гидрохимических и гидрогеофизических; слабой увязкой миграционных экспериментов с существующей практикой гидрогеологической разведки; недооценкой значимости подобного рода работ, без которых зачастую невозможно обоснование эффективных инженерно-экономических решений в системе управления подземными водами. Эти решения недостаточно обеспечены требуемой информацией, методикой ее определения и соответствующей квалификацией инженерного персонала.

В период разведки главным видом ОМР являются полевые опытно-миграционные опробования (ОМО) пластов с помощью индикаторов в сочетании с лабораторными экспериментами. Будучи основным инструментом оценки миграционных параметров трещиноватых водоносных пород, индикаторные запуски могут оказаться и полезным дополнением к геофильтрационным опробованиям, когда перед последними ставится задача повышенной детализации фильтрационных характеристик пластов; чаще всего такая необходимость возникает именно при исследовании миграционных процессов.

Поскольку водоносным комплексам всегда свойственна гетерогенность, учет ее приобретает принципиальное значение при проведении ОМР: с нею связываются пространственно-временные эффекты, которые во многом предопределяют методические принципы, а иногда и саму целесообразность этих работ. С этой точки зрения, реализация ОМО всегда предполагает сознательное упрощение опытной схемы с целью исключения ряда нежелательных эффектов, которые, однако, в прогнозных расчетах могут приобретать особый вес. Так, круг экспериментально определяемых в полевых условиях параметров намеренно сужается до того минимального предела, который в лучшем случае может служить основой простейших прогнозных моделей.

Неизбежная ограниченность возможностей изучения механизмов переноса вещества и миграционных параметров опытным опробованием и лабораторными экспериментами вынуждает искать дополнительные источники информации для решения этой проблемы. Очевидно, наиболее эффективным здесь оказывается целенаправленное использование данных режимных наблюдений за процессом миграции при строительстве и эксплуатации инженерного объекта. По аналогии с опытно-фильтрационными наблюдениями (ОФН), направленными на изучение гидродинамического режима, эти наблюдения можно называть опытно-миграционными (ОМН), подчеркивая тем самым их ориентацию на обоснование модели переноса и оценку миграционных параметров. Будучи важной составной частью мониторинга подземных вод, и в частности, источником необходимых данных для корректировки исходных проектных прогнозов, ОМН лежат в основе разрабатываемой авторами концепции контролируемого загрязнения подземных вод. Эта концепция исходит из того, что в подавляющем большинстве случаев предварительные прогнозы процессов загрязнения подземных вод недостаточно надежны и нуждаются в последовательном

уточнении, согласно общим принципам адаптации и обратной связи.

Особое внимание уделяется тщательному планированию ОМН, без которого они зачастую оказываются на практике вообще бесполезными. В вопросах интерпретации ОМН авторы ориентировались на простейшие аналитические построения и, учитывая повышенную сложность изучаемых процессов в сочетании с ограниченностью исходной информации, отказались от подробного рассмотрения возможных здесь приложений математического моделирования. Сказанное, естественно, не исключает его целесообразности, особенно при планировании ОМН.

К сожалению, реализация опытных функций режимных наблюдений, требующая глубокого проникновения в сущность миграционных процессов, наталкивается и на принципиальные трудности субъективного характера, связанные с недостаточной подготовленностью специалистов-гидрогеологов в области теории массопереноса.

Если учесть также практически полное отсутствие специальной литературы по этому вопросу, то становится понятным, что для коренного улучшения качества режимных наблюдений за процессами загрязнения подземных вод необходимо, прежде всего, последовательное построение научно-методических основ ОМН как путем обобщения имеющихся теоретических представлений о миграционных процессах, так и на базе специальных новых разработок. Последние касаются применения не только сугубо гидрогеологических, но и соответственно направленных гидрофизических методов, тем более что постановка геофизических исследований в гидрогеологии носит часто формальный характер.

В работе над составлением данного тома монографии принимали также участие: П.К.Коносавский (разд. 14.1, 16.2, 16.3, 20.2), В.К.Учаев (разд. 16.3, 21.2), Н.С.Петров (гл. 22 и 23), Г.Н.Гензель (разд. 21.2), Ф.Г.Атрощенко

(разд. 20.2), Е.В.Мольский (разд. 19.2, 19.4), В.В.Щемилинин (разд. 19.4, 21.2), С.П.Поздняков (разд. 14.6).

Излагаемые здесь научно-методические основы полевой гидрогоеэкологии нашли свое применение при решении широкого круга инженерных задач, которые рассмотрены в заключительном (третьем) томе, посвященном прикладным исследованиям.

Весьма полезными для этого исследования были творческие контакты с В.М.Шестаковым, В.М.Гольдбергом, Б.В.Боревским, С.П.Поздняковым, Г.Е.Ершовым, а также представителями многих производственных организаций. В последние годы особенно плодотворными были совместные исследования с геологическим управлением АО «Татнефть», которое является спонсором настоящего издания.

Авторы с вниманием и благодарностью примут советы и критические замечания по существу работы.

Опытно-миграционные опробования в водоносных пластах

В данном разделе дается обоснование постановки, методов проведения и интерпретации полевых индикаторных опробований (ИО), рассматриваемых в качестве главного инструмента изучения миграционных параметров трещиноватых и трещиновато-пористых пород при гидрогеологических изысканиях, а также в качестве эффективного дополнения к геофiltрационным опробованиям, проводимым на участках возможного загрязнения подземных вод. Индикаторные эксперименты, имеющие целью оценку возможных моделей и параметров миграции, будем далее именовать *опытно-миграционными опробованиями* (ОМО).

ГЛАВА 12

Анализ эффективности лабораторных экспериментов как альтернативы опытным опробованиям

12.1. Общие положения и предпосылки к дифференциации экспериментальных схем

Лабораторные методы изучения массопереноса имеют как самостоятельное значение, т.е. их результаты могут непосредственно использоваться при построении моделей и в прогнозных расчетах, так и вспомогательное — при расшифровке данных полевых экспериментов и наблюдений. Важно подчеркнуть, что в целом роль лабораторных испытаний в общем комплексе экспериментальных работ здесь намного заметнее, чем при геофильтрационных исследованиях. Более того, лабораторные опыты миграционной направленности подчас могут рассматриваться как эффективная альтернатива полевым экспериментам. В частности, они обычно являются базовыми для оценки физико-химических взаимодействий в пористых образованиях, массовое изучение которых полевыми опробованиями мало реально.

Перед лабораторными исследованиями ставятся несколько взаимосвязанных задач: определение миграционных параметров для нейтральных стоков; выявление физико-химической природы процессов преобразования сточных растворов; оценка параметров, контролирующих протекание межфазовых физико-химических реакций; изучение диффузионных и осмотических процессов; изучение влияния состава стоков и напряженного состояния пород на фильтрационные свойства последних. Опы-

ты осуществляются с несцементированными гранулярными породами водоносных горизонтов, с глинистыми породами разделяющих пластов, с пористыми блоками трещиноватых коллекторов и с естественными и техногенными отложениями, экранирующими бассейны промстоков. При опытах с породами первой из упомянутых категорий можно, согласно разд. 2.2, пытаться ориентироваться на дисперсионно-конвективный режим массопереноса в образце, а в большинстве остальных случаев — на молекулярно-диффузионный режим, по крайней мере при коэффициентах фильтрации, меньших 0,1 м/сут. Эксперименты в слабопроницаемых породах могут, однако, заметно усложняться из-за необходимости достаточно тонких способов индикации, не смещающих существенно заданных или замеряемых условий на торцах образца: время накопления объема пробы должно быть намного меньше общего времени регистрации расчетного участка опытной кривой. Поэтому, в частности, может представиться целесообразным применение косвенных (без отбора проб) методов непрерывного прослеживания — резистивиметрического, потенциометрического, фотометрического и т.п.

Нужно подчеркнуть, что при общепринятых способах замера концентрации и лабораторных экспериментах определяется ее объемное значение в образце C_v , а не значение C_p , отвечающее расходу через какое-то его сечение (в частности, входное или выходное). Соответственно, и граничные условия следует задавать функцией C_r , а не C_p , что имеет существенное значение при $Pe < 10-20$ (разд. 1.2.3, 2.2); при поддержании постоянных концентраций в камерах на торцах колонки, это означает задание граничного условия первого рода.

На первом этапе проводятся опыты с инертными компонентами. Полученные результаты используются при анализе экспериментов, направленных на оценку параметров физико-химических взаимодействий реальных

сточных растворов с породами. Соответствующие эксперименты могут вестись в «статическом» (без конвекции) или динамическом режиме, однако последние нередко приводят к неудовлетворительным результатам. Во-первых, при форсированных динамических режимах емкостные (а также сорбционные или ионообменные) характеристики, как правило, оказываются заниженными (разд. 1.1.1). Во-вторых, в динамических опытах максимально проявляется кинетика гетерогенных процессов (оценка которой сама по себе часто не является обязательной), что снижает надежность определения параметров, характеризующих равновесную стадию этих процессов. Дополнительные сложности связаны с наложением микродисперсионных эффектов продольного рассеяния в фильтрационной колонне — механизма, также не представляющего самостоятельного интереса. Наконец, в динамических экспериментах труднее поддерживать постоянство опытных условий.

По этим причинам динамические миграционные эксперименты (и то в режиме фильтрации, близком к прогнозному) могут представлять какой-то интерес лишь для гомогенных песчано-гравийных грунтов — при оценке их массообменных характеристик. Что же касается емкости этих пород по отношению к трассерам, то она достаточно надежно контролируется определяемыми известными методами значениями пористости (см. также разд. 1.1.1).

Для иллюстрации сказанного сошлемся на результаты опытов [1] со среднезернистыми песками, в которых четко прослеживалось асимптотическое приближение расчетной активной пористости (n) к значению общей пористости ($n = 0,4$) по мере уменьшения скорости фильтрации; при $v = 43 \text{ м/сут}$ $n = 0,3$; при $v = 8 \text{ м/сут}$ $n = 0,32$; при $v = 3 \text{ м/сут}$ $n = 0,34$; при $v = 1,5 \text{ м/сут}$ $n = 0,38$. Другой иллюстрацией гетерогенного поведения таких пород при динамических испытаниях

могут служить результаты «вымывания» содержащихся в них нефтепродуктов [4]: предел растворения при этом никогда не достигается.

В любом случае, достоверность получаемых результатов во многом определяется сохранностью естественной структуры грунтов. Если же образцы ненарушенной структуры отобрать не удается, то необходимо по крайней мере их предварительное уплотнение под «бытовыми» нагрузками*; при этом для глинистых пород важно обеспечить состав поровых вод, примерно идентичный естественному. Опыты на «порошках» из твердых пород или на глинистых «пастах» часто оказываются непредставительными. Подчеркнем поэтому, что не следует отождествлять рекомендуемые ниже «статические» модификации опытов с экспериментами на порошках (т.наз. batch tests): подготовка образца, создавая дополнительные свободные поверхности для сорбции, резко увеличивает ее и/или делает необратимой [5].

12.2. Определение параметров сорбции и ионного обмена

В условиях статического эксперимента с зернистыми материалами концентрации компонента в растворе (C_i) и на твердой фазе (q_i) связаны в виде:

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = -\frac{M}{v} \frac{dq_i(t)}{dt}, \quad (12.1)$$

где v — объем раствора, M — исходная масса вещества, $q_i|_{t=0} = 0$, $C_i|_{t=0} = C_{0i}$.

* И это, однако, не гарантирует от серьезных погрешностей.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ КАК АЛЬТЕРНАТИВЫ ОПЫТНЫМ ОПРОБОВАНИЯМ

Строго говоря, в сорбции и ионном обмене опосредованно принимают участие диффузионные процессы. Сначала (условно-мгновенно) диффузия идет через пограничный слой (пленку), окружающий частицу грунта, а затем вещество диффундирует внутрь частицы; для шаровых частиц радиуса R

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{3K_f M}{R \nu \rho} (C_i - C_{si}), \quad (12.2)$$

где C_{si} — концентрация в растворе, равновесная концентрации на твердой фазе (на внешней поверхности частицы), имеющей плотность ρ , K_f — «пленочный» коэффициент массообмена. Концентрация C_{si} вводится через уравнение изотермы как функция от C_i ,

При опробовании хорошо проницаемых песчаных грунтов для оценки параметров изотермы *сорбции* опыт заключается в медленной фильтрационной пропитке образца исследуемым раствором до установления физико-химического равновесия между адсорбатом и адсорбентом — до тех пор, пока на выходе из образца не фиксируется постоянная концентрация, равная входной.

Формула оценки концентрации вещества на породе (в единице ее объема) q , равновесной заданной концентрации раствора C , имеет вид

$$q = (C V - \sum C_i V_i) / V_o - nC, \quad (12.3)$$

где V_o и V — объем фильтрационной колонны и раствора, поступившего в нее за время опыта; C_i — текущая концентрация (в пределе стремится к значению C), непрерывно измеряемая на выходе из колонны в порциях объемом V_i . Активная пористость n может быть определена по аналогичной схеме с инертным индикатором (его входная концентрация C_n):

$$n = V / V_o - (\sum C_{ni} V_i) / (C_n V_o). \quad (12.4)$$

Если насыщение происходит достаточно медленно, так что кинетикой сорбции допустимо пренебречь*, то по сдвигу выходных кривых на индикаторных графиках ($c \div t$), построенных для инертного и сорбирующегося компонентов, может быть непосредственно оценен параметр распределения $K_d = \rho K_d$ (линейная изотерма). Для точки $\bar{c} = 0,5$ этот сдвиг составляет

$$\Delta t_{0,5} = LK_r/v, \quad (12.5)$$

где L — длина опытной колонны; v — скорость фильтрации.

Здесь необходимо, однако, еще раз предупредить о недопустимости проведения опытов в форсированном фильтрационном режиме. Иллюстрацией важности этого требования могут служить результаты изучения сорбции на песчано-гравийных грунтах фторидов из техногенных растворов, накапливаемых в хвостохранилище комбината «Фосфорит». Опыты выявили достаточно четкую зависимость коэффициента распределения K от скорости фильтрации v : при изменении v от 0,2-0,5 до 20-40 м/сут происходило уменьшение K , от 0,5 до 0,2 — в разнозернистых песках и от 0,2 до 0,03 — в гравийных отложениях, хотя активная пористость пород возрастила при этом — за счет донасыщения застойных зон — всего лишь на 10-20 %.

Дополнительные сложности могут возникнуть в связи с проявлением при опыте кинетики сорбции (разд. 5.2.1.4), которое деформирует опытную кривую и внешне идентично гидродисперсионному рассеянию; совместное влияние этих факторов заметно затрудняет интерпретацию опыта, что, опять-таки, является доводом против форсированного опытного режима.

* Подтверждением тому должна служить параллельность кривых, полученных для сорбируемого и инвертного индикаторов.

С другой стороны, неоднократно отмечена неопределенность результатов «динамических» испытаний в колонках, что объясняется влиянием гетерогенности на поле скоростей (см. выше) или, например, несоблюдением условий подобия для кинетики гетерогенных физико-химических взаимодействий* [6]. В итоге, время установления равновесия в полевых условиях может быть гораздо большим, нежели в лабораторных.

Критерий установления такого равновесия для условий непрерывного запуска — должен оцениваться не по значениям времени, а в виде $(Ln/V) P_D$, где P_D — показатель скорости кинетики, что в общем равноценно использованию числа Дамколера (разд. 5.2.1.4). Для импульсного запуска время установления равновесия зависит еще и от критерия $\frac{\delta n}{Vt}$, который должен быть менее 0,1. Все эти эффекты приводят к тому, что коэффициент задержки (распределения) растет во времени.

В слабопроницаемых глинистых грунтах или в пористых блоках трещиноватых пород эксперименты осуществляются в режиме длительной (обычно несколько десятков суток) молекулярно-диффузной пропитки образца, что позволяет обычно пренебречь влиянием кинетики сорбции. При этом глинистые породы, а также образцы сцепментированных, но набухающих (с большим содержанием глинистых минералов) пород помещают в жесткую кассету, препятствующую разрушению их структуры.

Количество вещества, идущего на насыщение образца (объемом V_o) и характеризующее сорбционную способность (при данной концентрации), определяется по разности между исходной C_o и равновесной C концентрациями раствора

$$q = V (C_o - C) / V_o - n_o c, \quad (12.6)$$

* Уместно отметить, что оценка параметров кинетики даже в лабораторных экспериментах сильно зависит от опытных условий и трудно поддается однозначной интерпретации.

где n_o — общая (доступная для диффузии) пористость.

Для повышения чувствительности опыта рекомендуется, чтобы емкость свободного раствора не слишком сильно превышала емкость порового пространства образца. Так, в статических экспериментах отмечен рост коэффициента распределения с уменьшением отношения объемов твердой фазы и раствора [6]. Объясняется это, в частности, тем, что некоторая доля твердой фазы остается в растворе в коллоидной форме.

По аналогичной схеме, но с инертным компонентом, рассчитывается пористость пород:

$$n_o = V(C_{on} - C_u) / (V_o c_u) \quad (12.7)$$

впрочем, чаще всего можно ограничиться оценкой параметра n_o весовым способом.

Достаточно тривиальной является схема статистических экспериментов по изучению поверхностной сорбции, характеризующей концентрирование веществ на стенках трещин в комплексах трещиноватых и трещиновато-пористых пород (разд. 5.2.1.1). Оценка прироста массы вещества на поверхности образца Δq ($\text{г}/\text{см}^2$) при замеренном изменении концентрации вещества в растворе Δc ($\text{г}/\text{см}^3$) позволяет рассчитать показатель сорбционного распределения $K_a = \Delta q / \Delta c$ (см). Основные сложности связаны с отбором и подготовкой представительных образцов, поверхность которых отражала бы состав вторичных минералогических образований, покрывающих стеки трещин реальных коллекторов подземных вод.

Во всех рассмотренных вариантах опыты при различных исходных концентрациях позволяют установить вид и параметры изотермы сорбции $q = f(c)$.

Обратим внимание, что традиционная методика лабораторных испытаний не делает различий между сорбией и осаждением.

При исследовании *ионного обмена* прежде всего определяют общую емкость поглощенного комплекса и его компонентный состав — по результатам обработки образцов стандартными растворами метиленового голубого, софронина-Т или солями аммония. Для того, чтобы учесть привнос катионов за счет растворения солей, необходимо параллельно определять содержание в породе хорошо растворимых соединений — методом водной вытяжки. Подготовительный этап опытов заканчивается «восстановлением» ионообменного комплекса испытуемых образцов, т.е. замещением разнообразных катионов, входящих в состав емкости поглощения, катионами одного элемента. Это позволяет в дальнейшем заметно упростить интерпретацию опытных результатов, используя балансовые оценки.

При изучении параметров ионообменных реакций оптимальным является опытный режим с поддержанием постоянной ионной силы раствора: в этих условиях коэффициенты активностей катионов в различных растворах, которыми обрабатываются образцы, остаются постоянными, что позволяет пользоваться при расчетах величинами аналитически определяемых концентраций C_i и q_i . Постоянство значений коэффициента $K_{1,2}$, оцениваемых в различных диапазонах изменения концентраций C_i , свидетельствует о корректности опытной схемы. При этом дополнительно рассчитывается кажущийся коэффициент распределения $K_r = f(C_i)$, колебания которого характеризуют степень нелинейности процесса. Возможно, однако, искажение опытных результатов, обусловленное наложением физической сорбции и растворения. В этом смысле, безусловные преимущества имеет учет суммарного вклада ряда подобных обменных механизмов через эмпирические константы изотермы обмена. Эксперимент заключается в обработке образцов растворами с различной концентрацией исследуемого компонента. По результатам строится график зависимости содержания компонента в предварительно восстановленной твердой фазе от содержания его в растворе и определяются параметры полученной изотермы.

Как и в сорбционных опытах, при изучении ионообменных процессов недопустимо нарушение естественной структуры образца; например, использование стандартной методики на порошках приводит к получению параметров, характеризующих обменные свойства пород с существенным завышением. Для регистрации содержания компонентов в растворе рекомендуется пользоваться ионоселективными электродами, так как они удобны в обращении, надежны, а главное, позволяют проводить анализ в очень малых объемах исследуемого раствора, что особенно важно при изучении обменных процессов в блоках пористых пород ненарушенного сложения.

12.3. Изучение диффузионных параметров

В настоящее время схемы опытов по определению значений коэффициента молекулярной диффузии, инвариантных к исследуемому диапазону изменения концентраций, достаточно разработаны [3]. Наиболее простые и доступные из этих схем ориентируются на использование лабораторных установок типа диффузионной ячейки. В зависимости от схемы опыта и его временных диапазонов, могут достигаться различные характерные режимы массопереноса через образец — нестационарный, квазистационарный и стационарный.

С этой точки зрения, достаточно универсальной является двухкамерная лабораторная установка. Например, она позволяет поддерживать в течение всего опыта постоянную концентрацию индикатора C_{01} на входной границе образца, в то время как в регистрационной камере (объемом V_{K2}), где накапливается индикатор, производится фиксация текущих его концентраций C_2 — любым методом, не требующим отбора проб. Результаты опыта — при легко осуществимом условии $C_{01} \gg C_2$ — должны отвечать линейной зависимости

$$\bar{C} = C_2 / C_{01} = \beta (D_M t / L_o^2 - n_o / 6), \quad (12.8)$$

где $\beta = F_o L_o / V_{K2}$ — постоянная прибора (L_o и F_o — длина образца и площадь его поперечного сечения); $t_{ac} = L_o^2 n_o / (2D_m)$. Отсюда по тангенсу угла φ наклона прямой к оси времени на графике $\bar{t} + t$ находится параметр

$$D_m = L_o^2 \operatorname{tg} \varphi / \beta.$$

Возможна и другая модификация опыта, предполагающая проведение наблюдений за изменением концентрации в обеих камерах, в одну из которых в начальный момент инъецируется фиксированная масса индикатора. Обработку опыта (при достижении квазистационарного режима переноса в образце) проводят путем нанесения экспериментальных точек на график в координатах $\ln \left(\frac{C_{01} - C_{02}}{C_1 - C_2} \right) + t$,

где C_{01} и C_{02} — исходная (в запускной камере) и фоновая концентрации компонентов, а C_1 и C_2 — текущие значения концентрации в камерах. Для достаточно больших значений времени график должен иметь линейный вид: по тангенсу угла φ наклона прямой к оси времени определяется искомый параметр [3]:

$$D_m = A \operatorname{tg} \varphi, \quad (12.9)$$

где $A = (V_{K1} + V_{K2}) L_o / F_o$ — постоянная прибора; L_o и F_o — длина и площадь поперечного сечения образца; V_{K1} и V_{K2} — объемы камер.

Наконец, стационарная постановка опыта предполагает поддержание на обеих границах образца постоянных концентраций, а расчет параметра D_m производится по установившемуся значению массового потока через образец (в соответствии с законом Фика).

Недостатком рассмотренных опытов является наложение на их результаты осмотического процесса, обусловленного движением растворителя (воды) через образец навстречу диффундирующему солям (разд. 1.1.4). Вместе с тем, интенсивность осмоса может быть резко снижена, если в опыте использовать растворы с близким физико-химическими параметрами. Для этого в регистрационную камеру заливается электролит, не содержащий маркирующей метки (аниона), но имеющий ионную силу, близкую к таковой исследуемого раствора; подобны-

ми эквивалентами могут служить, например, растворы солей NaI и NaNO_3 одинаковой молярности.

В опытах с твердыми разностями пород (пористыми блоками) целесообразно ориентироваться на режим молекулярно-диффузионного насыщения образца, погруженного в сосуд с раствором (объемом V , соизмеримым с объемом $n_o V_o$ порового пространства). Жидкость в сосуде в процессе опыта постоянно перемешивается, и поэтому текущая концентрация вещества в растворе C равна концентрации вещества на верхности образца. Для опытных оценок используют результаты наблюдений за уменьшением концентрации (от исходного значения C_o) компонентов в жидкости, окружающей образец, — по датчикам, не требующим отбора проб. В качестве расчетной используется формула [2]

$$C = C_o \exp(-\alpha^2 t) \operatorname{erfc}(\alpha t^{1/2}), \quad (12.10)$$

справедливая при $D_M t / (m_B^2 n_o) < 0,02$; $\alpha = \omega (D_M n_o)^{1/2} / V$ (ω — площадь поверхности образца). При $\alpha^2 t < 0,1$ функция C имеет асимптотическое представление:

$$C = C_o (1 - 2 \alpha \sqrt{t/\pi}), \quad (12.10, a)$$

позволяющее обрабатывать опытные результаты по графику зависимости $(1 - C/C_o) \div t^{1/2}$, который должен иметь прямолинейный вид. По тангенсу угла φ наклона прямой к оси абсцисс рассчитывается коэффициент молекулярной диффузии: $D_M = \pi V \operatorname{tg}^2 \varphi / (4\omega^2 n_o)$.

Дополнительную информацию об интенсивности молекулярной диффузии дает оценка концентрации индикатора в поровых растворах, экстрагируемых из блоков после прекращения опыта [1].

При изучении закономерностей миграции вод с повышенной минерализацией необходимо считаться с возможной зависимостью интенсивности диффузии от суммарного содержания солей в растворе, т.е. с нелинейностью

процесса*. Использование методик, ориентированных на изменения концентрации солей в исходных растворах, ограничено малой чувствительностью существующих способов регистрации компонентов при высоком содержании последних. Предпочтительными здесь оказываются экспериментальные схемы, обеспечивающие измерения концентрации в условиях достаточно высокой степени разбавления диффундирующих компонентов; такой, в частности, является схема опыта, ориентированная на измерение концентрации вещества внутри самого образца (после экстрагирования поровых растворов); дополнительное преимущество такого опыта заключается в возможности фиксации резко нестационарной фазы процесса, при которой наиболее рельефно проявляется его нелинейный характер.

Малоразработанным остается вопрос о влиянии на конечные результаты подобных опытов осмотических процессов, проявление которых неизбежно при миграции рассолов через слабопроницаемые образцы; по сути дела, при этом определяется некоторый фиктивный коэффициент диффузии (разд. 1.1.4), неинвариантный по отношению к задаваемым опытным условиям**. Понятно, что в этой ситуации исследование осмоса приобретает самостоятельное значение.

Если осмотические процессы рассматриваются вне связи с их влиянием на напряженное состояние испытуемых пород, т.е. без учета их возможной осмотической консолидации (разд. 1.1.4), то эти процессы целесообразно изучать в стационарной постановке. При этом можно использовать ту же двухкамерную установку, регистрационная камера которой дооснащается капилляром; по

* Для сорбционных и ионообменных процессов эта зависимость уже находит отражение в обобщенных показателях изотермы обмена (разд. 5.2.1)

** Не исключено, что сама нелинейность изучаемого диффузионного процесса может оказаться в значительной степени наведенной осмосом.

движению ΔL_k мениска в нем за фиксированный промежуток времени Δt определяется скорость осмотической фильтрации:

$$v_{осм} = \Delta L_k F_k / (\Delta t F_o) = K_{осм} \Delta C / L_o, \quad (12.11)$$

где F_k и F_o — площади поперечного сечения капилляра и образца; $K_{осм}$ — коэффициент осмотической фильтрации ($K_{осм} \equiv L_{vs} \frac{RT}{CM}$ — разд. 1.1.4); ΔC — постоянная разность концентраций в инъекционной и регистрационной камерах. Отсюда находится коэффициент $K_{осм}$, позволяющий рассчитать истинный (парциальный) коэффициент диффузии D_m' растворенного вещества на основе ранее полученного (по обычной расчетной схеме) коэффициента эффективной диффузии D_m :

$$D_m' = D_m - K_{осм} C. \quad (12.11, a)$$

Расчетным путем при известных значениях $v_{осм}$ ($K_{осм}$) может быть найден и коэффициент D'' , характеризующий встречную диффузию молекул воды [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 12

1. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л., Недра, 1980, 320 с.
2. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. М., Недра, 1983, 357 с.
3. Ропаль А.А. Методы определения миграционных параметров. Обзор ВИЭМС, сер. «Гидрогеология и инженерная геология», 1980, 62 с.
4. Mercer J.W. Cohen R.M. A review of immiscible fluids in the subsurface. - Journal of Contaminant Hydrology, 1990, N6, p.p.107-163.

5. Siegel V.D., Leckie J.O., Phillips S.L., Kelly W.R. Development of a methodology of geochemical sensitivity analysis for performance assessment. - Proceeding of the Conference on Geostatistical, Sensitivity, and Uncertainty Methods for Ground-Water Flow and Radionuclide Transport Modeling. San-Francisco, September 15-17, 1987, p.p.189-211.
6. Transport and Mass-Exchange Processes in sand and Gravel Aquifers. Proc. of the International Conference. AECL Research 1990, 1370 p.

В настоящее время индикаторные опробования пластов проводятся, в основном, как единичные эксперименты исследовательского (реже производственного) характера и никак не могут считаться массовым видом гидрогеологических работ. Между тем, быстро растет число объектов гидрогеологических изысканий, требующих обоснованного решения задач охраны подземных вод и, соответственно, оценки необходимых для этого исходных гидрогеологических данных уже в период разведки. Понятно, что целесообразность включения индикаторных экспериментов в общий комплекс массовых гидрогеологических изысканий во многом определяется разработкой эффективных схем опробований и обоснованием разумных пределов их применения.

13.1. Общие представления об индикаторных экспериментах

13.1.1. Задачи и направленность индикаторных опробований (ИО)

В основе рассматриваемого комплекса опытных работ лежат запуски в водоносные горизонты химических, радиоактивных или тепловых индикаторов с последующим прослеживанием за их миграцией. Таким образом изучаются миграционные параметры, отражающие емкостные и рассеивающие (дисперсионные) свойства опробуемых пластов. Наряду с этим, индикаторные запуски могут дополнять опытные геофiltрационные опробования

(ОФО), особенно когда перед последними ставятся повышенные требования к детальности фильтрационного расчленения водоносных толщ.

Постановка и проведение ИО должны увязываться с особенностями предполагаемой прогнозной задачи. С этой точки зрения следует различать эксперименты, направленные на определение:

1) параметров, отражающих *плановую миграцию загрязнений* (в основном от поверхностных техногенных источников);

2) параметров, характеризующих *субвертикальную миграцию растворов* (преимущественно из подземных бассейнов некодационных вод естественного происхождения в условиях их техногенной разгрузки в вышележащие водоносные горизоны); вторая задача включает в себя экспериментальную оценку показателей, контролирующих развитие в пласте процессов плотностной конвекции при внедрении в него извне растворов с повышенной плотностью. Соответственно, при опробованиях должны воспроизводиться условия либо плановой миграции, либо преимущественного переноса вскрест напластования.

Следует учесть, что возможности ИО отнюдь не безграничны: часто эти сравнительно кратковременные и мелкомасштабные эксперименты принципиально не способны определить некоторые важные характеристики пластов. В значительной степени подобные ограничения обусловлены масштабными эффектами. Отметим пока в этой связи наиболее общие моменты, определяющие целесообразность и эффективность ИО, и в частности ОМО.

Прежде всего, в опытных условиях максимально проявляется гетерогенность горных пород, так что миграционный процесс на разных его стадиях контролируется

различными масштабами гетерогенности* и кинетическими механизмами переноса; следовательно, расшифровка опытных результатов требует независимой оценки ряда показателей, в том числе и тех, которые могут оказаться несущественными при дальнейших прогнозах. Поэтому мало реально изучение с помощью ОМО неравновесных физико-химических процессов (например, сорбционных), так как наложение кинетических эффектов на процесс миграции, имеющий и без того сложный гетерогенный характер, делает опыты практически неинтерпретируемыми. Здесь можно рассчитывать лишь на экспериментальную оценку коэффициента распределения для равновесных сорбционных процессов, — если она не может быть получена в лабораторных условиях (в первую очередь, это касается трещиноватых пород). Отсюда, в частности, следует, что чаще всего лучше применять химически нейтральные индикаторы. В то же время, для устранения влияния плотностной конвекции в опытных условиях индикаторы должны быть и физически нейтральными. Наконец, опытное возмущение носит обычно существенно одномерный характер, что практически исключает оценку параметров поперечной дисперсии, — за исключением специально поставленных крупномасштабных экспериментов.

Таким образом, по данным ОМО реально оцениваются преимущественно параметры, характеризующие емкость и продольную дисперсию при миграции физически и химически нейтральных стоков — трассеров. Тем не менее, эти данные зачастую являются исключительно важными для проведения первоочередных инженерных прогнозов.

* Которые могут, к тому же, заметно различаться для ОМО и ОФО.

13.1.2. Сравнительная характеристика основных экспериментальных схем

По техническим условиям проведения эксперимента ОМО дифференцируются прежде всего, в зависимости от фильтрационного режима опыта и характера поступления индикатора в пласт; соответственно подразделяются и интерпретационные схемы.

По типу фильтрационного режима выделяются опыты в естественных и возмущенных потоках. Во всех вариантах режим фильтрации в зоне продвижения индикатора должен быть стационарным (квазистационарным) или близким к таковому — условие вполне реальное ввиду небольших значений скоростей переноса по сравнению со скоростями распространения фильтрационных возмущений.

Об информативности опытов в естественных потоках. Здесь наибольшее распространение получили опыты с двумя скважинами — запускной и наблюдательной, расположенной ниже по потоку. Однако эти эксперименты обладают существенными недостатками, которые связаны с необходимостью самостоятельной оценки гидродинамических параметров водоносных горизонтов и с трудностями определения точного направления и градиента потока; кроме того, малые скорости естественной фильтрации не позволяют охватить опробованием достаточно представительные по размерам области, что ведет к проявлению трудноучитываемых масштабных эффектов.

Теоретически, фильтры обеих скважин должны располагаться на одной линии тока, но на самом деле всегда существует опасность, что основная масса индикатора пройдет мимо наблюдательной скважины. Если при этом будут уловлены следы индикатора, обусловленные проявлением поперечной плановой дисперсии, то интерпретация будет крайне ненадежной. Так, пренебрежение поперечной дисперсией в трещиноватых породах ведет к тому,

что расчетное время и, соответственно, активная трещиноватость, оцениваемые по характерным точкам индикаторного графика, оказываются сильно завышенными. Условия проведения опыта заметно улучшаются, если использовать линейный ряд наблюдательных скважин (вкrest потока), однако это практически целесообразно лишь при малых глубинах запуска.

Проведение опытов в естественных потоках дополнительно усложняется в связи с необходимостью оценки гидродинамического несовершенства ("скин-эффекта") как запускной, так и наблюдательной скважины, а также условий разбавления индикатора в последней (см. разд. 14.4). В целом, такие эксперименты целесообразны только в тех случаях, если они ориентируются на уже пробуренные скважины иного целевого назначения. Специального обсуждения заслуживает, правда, вопрос о возможности оценки длительными опытами в естественном потоке параметра поперечной (плановой) дисперсии.

Анализ схем опробования пластов в возмущенных потоках. Создание возмущенного фильтрационного режима, и особенно, совмещение миграционных и опытно-фильтрационных работ, устраниет основные недостатки, свойственные опытам в естественных потоках. Наиболее распространены опыты по схеме нагнетания (налива) индикатора в центральную скважину с последующим прослеживанием за его миграцией по наблюдательным скважинам (далее она кратко именуется как *опробование при наливе*). Серьезными недостатками схемы являются: 1) ограниченность информации о реальном распределении индикатора по различным траекториям фильтрации, что вынуждает ориентироваться на предпосылку о равномерном его распределении; 2) возможное сильно проявление несоответствия между масштабами индикаторного и опытно-фильтрационного опробования (см. разд. 13.3); 3) резкая неравномерность поля скоростей с быстрым падением их по мере удаления от центральной скважины,

что нередко затрудняет ограничение масштабных эффектов, а также усиливает влияние естественного потока в краевых зонах. Кроме того, необходимо учитывать гидрохимическую инерционность наблюдательных скважин, а также степень совместимости нагнетаемой воды с пластовой.

Резкое улучшение ситуации с этих позиций может быть достигнуто проведением опыта по двухскважинной — дуплетной схеме: перед запуском индикатора создается установившийся фильтрационный поток между нагнетательной (запускной) и откачивающей (улавливающей индикатор) скважинами, который в гидродинамическом отношении интерпретируется весьма просто и надежно, причем масштабы фильтрационного и миграционного возмущения совпадают. Главное же достоинство такого опыта заключается в «свертке» всей информации о распределении трассера и, соответственно, в высокой степени осреднения результирующих параметров как вдоль, так и поперек наведенного фильтрационного потока.

Дуплетная схема намного сокращает требуемый для опыта объем бурения и является наиболее эффективной при опробовании глубоко залегающих пластов, когда оперативный отбор гидрохимических проб связан со значительными техническими трудностями. Кроме того, преимущества дуплетной схемы заключаются в более равномерном распределении скоростей на опробуемом участке (что сравнительно снижает влияние уклона естественного потока) и в наиболее рациональном использовании индикатора; при этом отпадают вопросы об источниках воды для нагнетания и о ее «совместимости» с условиями в пласте. Относительная надежность и эффективность схемы возрастают, если рассеивающие параметры пород (трещиноватых и трещиновато-пористых) велики.

Весьма распространенным вариантом является миграционный опыт с одной откачивающей скважиной, когда индикатор запускается в близрасположенную наблюда-

тельную скважину (*опробование при откачке*). Такие индикаторные запуски значительно повышают информационность опытно-фильтрационных работ, однако, с точки зрения надежности получаемых миграционных параметров, эту схему можно рекомендовать только для весьма ориентировочных оценок емкостных показателей: по сути дела, при этом характеризуется лишь сугубо локальная, узкая зона пласта вдоль субрадиальной траектории, соединяющей наблюдательную и центральную скважины.

Следует отметить также *односекважинное опробование* пластов по схеме «налив-откачка» [1, 2], согласно которой одна и та же опытная скважина последовательно используется в качестве инъекционной и откачивающей (регистрационной). Несмотря на то, что информативность односекважинных экспериментов относительно невысока, подобные опыты могут оказаться незаменимыми при изучении процессов массо- и теплопереноса на весьма больших глубинах, особенно для гетерогенных трещиновато-пористых пород с низкими массообменными свойствами. В частности, в последнем случае эффективна опытная схема с выставлением индикатора в пласте, когда после кратковременного нагнетания индикатора гидродинамические воздействия прекращают; по прошествии определенного времени, в течение которого индикатор из трещин диффундирует в блоки, проводят интенсивную откачку. Иногда аналогичный эксперимент осуществляют при параллельном отборе проб из наблюдательной скважины. Точность результатов такого опыта в средах с ярко выраженным поглощающими свойствами (типичные трещиновато-пористые породы) достаточно высока, ибо она сравнительно мало зависит от влияния профильной фильтрационной неоднородности: при откачке индикатора время его обратного подтягивания к скважине оказывается примерно одинаковым для всех зон пласта и изменения концентрационной функции определяются в основном микродисперсией и кинетикой внутрипласто-

вых обменных процессов. Главные погрешности здесь возникают за счет сноса части «выстаивающихся» индикаторов естественным фильтрационным потоком или при наличии заметной вертикальной компоненты скорости фильтрации*.

Приведенный материал относится, в основном, к опытам, проводимым в плановом потоке. Для изучения параметров субвертикальной миграции растворов можно использовать кусты рядом расположенных опытных скважин, фильтры которых устанавливаются на различных отметках опробуемого пласта; иногда этот опыт осуществим и с одной скважиной (разд. 20.2).

О режимах индикаторного опробования пластов. При вводе трессера в пласт возможны следующие концентрационные режимы: 1) мгновенный подъем концентрации и поддержание ее неизменного значения в течение всего опыта; 2) «пакетный» запуск — поддержание постоянной концентрации только в течение ограниченного времени; 3) «импульсный» запуск — создание в скважине больших концентраций индикатора за весьма малый промежуток времени, в течение которого весь индикатор поступает в пласт.

Для опробований при наливе обычно применяются первые два режима, для которых необходимо приготовление больших объемов индикаторного раствора стабильной концентрации на поверхности и его равномерное распределение по фильтровому сечению запускной скважины. В опытах по дуплетной схеме эти операции, естественно, не требуют больших дополнительных объемов раствора. Третий режим чаще сопутствует опробованиям при откачке, когда трудно добиться постоянной концентрации индикатора во времени и равномерного его распределения в области фильтра — при одновременном требовании

* Подобный эксперимент может быть полезным и для изучения сорбции компонентов на поверхностях трещин в гомогенных породах.

минимального искажения фильтрационного потока вблизи наблюдательной (инъекционной) скважины.

От типа входного индикаторного сигнала в значительной степени зависят информативность опыта, простота и надежность обработки данных. В частности, при применении пакетного и, особенно, импульсного режимов в условиях больших разбавлений индикатора (опробования при откачках), а также в средах с высокими рассеивающими или поглощающими свойствами (например, в трещиновато-пористых породах) надежность опыта резко падает и существенно ограничивается чувствительностью способов индикации.

При использовании в качестве индикатора тепловой метки также следует ориентироваться на длительное поддержание неизменной (повышенной или пониженной) температуры в запускной скважине, так как эффекты теплового рассеяния индикатора в пласте всегда весьма ощущимы.

13.2. Взаимоотношение опытно-миграционных опробований с другими видами работ при гидрогеологической разведке

Информация, получаемая при проведении традиционного комплекса геологических, гидрогеологических и геофизических изысканий, а также специальных лабораторных испытаний, играет важную роль для предварительной схематизации опытных условий, выбора оптимальных технических схем ОМО и анализа их результатов.

Буровые работы являются основой для первичного литолого-структурного расчленения опробуемых комплексов. Широкое привлечение результатов анализа кернового материала, а также опережающего гидродинамического и гидрогеофизического опробования при бурении

(по всей совокупности скважин опытного участка) является достаточно естественным подходом и к детализации профильной фильтрационной схемы опыта. Можно утверждать, что для данной сферы гидрогеологических исследований вполне уместна аналогия с опытом разведки нефтяных месторождений, где детальность анализа и опробования кернового материала гораздо выше обычно принятой при гидрогеологических работах. В этой связи подчеркнем особую значимость отбора ненарушенных образцов из пластов песчано-глинистых пород, на базе которых вырабатываются основные представления о схемах и параметрах миграции. Это создает предпосылки для обоснования внедрения в практику стохастических моделей миграции (см. разд. 3.2.1, 3.3.1): в стратифицированных породах повышается надежность определения вертикального масштаба корреляции по проницаемости l_z . В твердых породах по выходу керна, а также по характеру циркуляции жидкости и интервалам ее поглощения устанавливается изменение плотности горизонтально секущих трещин по глубине, хотя информация о системах крутопадающих трещин остается весьма бедной. Для трещиновато-пористых пород дополнительные требования к качеству кернового материала обусловлены необходимостью последующей лабораторной оценки миграционных параметров пористых блоков.

Выбираемые способы бурения опытных скважин должны обеспечивать минимальное искажение проницаемости в прифильтровой зоне. Соблюдение этого требования имеет особенно важное значение при проходке скважин, регистрирующих индикатор. В частности, рабочие интервалы скважин, пройденные на глинистом растворе, оказываются далеко не всегда пригодными для постановки ОМО.

Лабораторное изучение физических характеристик керновых проб дает весьма полезную информацию о степени неоднородности опробуемых толщ и о возможных

механизмах внутрипластовых массообменных процессов. Для пористых пород исходными могут быть сведения о колебаниях гранулометрического состава и проницаемости образцов по и вкрест напластованию, но наиболее важный определяемый показатель — общая пористость. В некоторых случаях для оценки значений активной пористости и коэффициента дисперсии выполняются (обычно при форсированных режимах) лабораторные миграционные опыты, хотя польза их здесь невелика (см. разд. 12.1). Для трещиноватых пород в лабораторных условиях устанавливаются проницаемость и пористость породных блоков, а также коэффициент молекулярной диффузии в них.

В лаборатории специально изучается возможность сорбции индикатора и его «совместимость» с подземными водами. Как правило, именно лабораторные испытания являются основными при изучении физико-химических обменных процессов и превращений применительно к предполагаемым загрязняющим компонентам.

Геофизические методы скважинного каротажа предоставляют широкие возможности для расшифровки разрезов исследуемых толщ. К особой — гидрогеофизической — группе относятся расходометрический, резистивиметрический и термометрический методы, значимость которых для индикаторных опробований трудно переоценить: достаточно упомянуть о выделении рабочих интервалов, об оценке качества опытных скважин, о прослеживании индикатора *in situ*. Вместе с тем, стандартные модификации гидрогеофизического каротажа зачастую не учитывают отрицательного влияния ряда прискважинных эффектов, резко снижающих надежность информации. Кроме того, в пористых породах разрешающая способность перечисленных методов довольно низкая, причем часто изучается заметно измененная прискважинная зона пласта. Для выбора участков постановки ОМО с учетом плановой фильтрационной изменчивости весьма полезными оказываются и методы поверхностной геофизики;

**АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫХ СХЕМ И УСЛОВИЙ
ПОСТАНОВКИ ОПЫТНО-МИГРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЙ**

иногда их можно эффективно использовать непосредственно при проведении ОМО (в частности, метод заряженного тела).

Опытно-фильтрационные работы (ОФР) имеют исключительное значение для планирования и интерпретации ОМО: структура опытно-фильтрационных кустов и результаты ОФР во многом предопределяют выбор схемы и масштаба миграционных экспериментов. В то же время ОФР в стандартных вариантах позволяют составить лишь очень грубые (с точки зрения требований ОМО) представления о возможной изменчивости фильтрационных свойств по разрезу; фильтрационными опробованиями не оценивается, за редким исключением, важный показатель профильной анизотропии фильтрующих пород. Более того, зоны опробования при фильтрационных и миграционных экспериментах на одних и тех же опытных кустах могут различаться по своим масштабам на порядок, а то и вообще оказаться неперекрывающимися; последняя ситуация типична при интерпретации ОФО способом временного прослеживания, дающим фильтрационные параметры пород вне области квазистационарного режима, т.е. за пределами той прискважинной зоны, которую характеризует индикаторное опробование. Все это приводит, в конечном счете, к тому, что именно дефицит информации о фильтрационной структуре участка является чаще всего основным препятствием к достоверной интерпретации ОМО.

По этой причине целесообразно искать дополнительные пути для существенного улучшения качества фильтрационного опробования на участках, намеченных для проведения ОМО*. В частности, индикаторные запуски могут проводиться специально для повышения информативности ОФР (см. разд. 20.1).

* Или наоборот, проводить ОМО на участках фильтрационных кустов, где такое качество было обеспечено.

В целом, сделаем еще раз важнейшее предостережение: эффективность ОМР решающим образом зависит от фильтрационной основы, т.е. от надежности идентификации поля скоростей фильтрации на участке эксперимента. Подчеркнем, что эта задача отнюдь не эквивалентна идентификации фильтрационных параметров: даже весьма надежное определение последних может не обеспечить более или менее достоверного представления поля скоростей фильтрации при проведении миграционного опыта.

13.3. О масштабных эффектах и целесообразных условиях проведения ОМО

Характер проявления масштабных эффектов при ОМО всецело определяет надежность оценки параметров массопереноса и возможность их экстраполяции на прогнозные условия, т.е. саму целесообразность постановки данного вида работ. Масштабные эффекты могут сводиться, в частности:

- 1) к малой репрезентативности области индикаторного воздействия, слабо отражающей региональную изменчивость фильтрационных свойств *пористых* пород;
- 2) к невыполнению предпосылки о сплошности опробуемой *трещиноватой* среды, особенно с учетом «каналового» механизма фильтрации и массопереноса в ней, что особенно важно для трещинно-жильных и трещинно-карстовых водоносных пластов;
- 3) к несоответствию масштабов, охваченных опытно-миграционными опробованиями, с одной стороны, и опытно-фильтрационными с другой;
- 4) к резким различиям в характерных репрезентативных масштабах (временах) проявления отдельных механизмов массопереноса, таких, например, как конвекция в трещинах и диффузия в пористые блоки;

5) к сильной зависимости результатов от характера поступления индикатора в пласт и его отбора из скважины, — чем ближе он к «точечному», тем больше вероятность сильных неинтерпретируемых флуктуаций, и наоборот. Однако, увеличение объема пробы и, соответственно, осреднение замера также имеет разумные пределы, так как оно означает снижение разрешающей способности эксперимента.

Таким образом, масштабные эффекты затрудняют или делают вовсе невозможным перенесение миграционных параметров, определяемых при опробовании локальных участков, на прогнозные условия.

Исходя из теоретического анализа процессов массопереноса, а также возможной детальности изучения последних в рамках традиционного комплекса гидрогеологических работ (см. разд. 13.2), можно утверждать, что условия проведения и эффективность ОМО наиболее резко различаются в комплексах пористых пород, с одной стороны, и существенно трещиноватых — с другой. Это вытекает из различий емкостных свойств, действительных скоростей фильтрации и значимости дисперсионных эффектов. В частности, с учетом реальных скоростей переноса и продолжительности опробований, характерный масштаб области влияния эксперимента в пористых породах измеряется первыми метрами, а в трещиноватых — десятками метров. Не менее важны и отличия в возможностях имитации натурных условий переноса в лабораторных экспериментах. Наряду с отмеченными, существуют и другие различия принципиального характера, которые будут рассмотрены ниже.

Пористым породам всегда свойственна сильно выраженная гетерогенность на микро- и макроуровне. Материалы предварительных изысканий (см. разд. 13.2) обычно позволяют выделить достаточно крупные макроЗлементы пласта с существенно различающимися литологией и фильтрационными свойствами, на основе чего выбира-

ют участок и интервалы опробования. Однако на стадии предварительной миграционной схематизации чаще всего трудно установить характер макронеоднородности в пределах выделенного интервала: для этого, как правило, не хватает данных. Поэтому, несмотря на реальную неоднородность пласта в опробуемом интервале, данные индикаторного опыта рассматриваются обычно без учета этого фактора. Что же касается неоднородности-гетерогенности на микроуровне (см. разд. 1.1.1), то хотя ее проявление априорно не вызывает сомнений, соответствующие количественные оценки в полевых условиях практически исключаются.

В результате получаемые расчетные параметры сильно зависят от технических характеристик эксперимента. Поэтому многочисленные опытные данные свидетельствуют о неэффективности ОМО в комплексах пористых пород.

Показателен, например, крупный эксперимент, описанный в работе [5]. Опыт проводился во флювиогляциальных песках в течение 120 сут. при наличии около 500 точек наблюдения по 70 пьезометрам. Однако, несмотря на масштабы эксперимента, он не позволил определить надежные значения параметров миграции; в частности, расчетный параметр продольной дисперсии оказался на два порядка меньше, чем определенный по данным эксплуатационных наблюдений.

Особенно важно, что обработка данных полевых экспериментов при невыясненном уровне неоднородности-гетерогенности может давать резко заниженные значения пористости — основного параметра, участвующего в прогнозных расчетах. Физически это объясняется тем, что при кратковременном воздействии на пласт и при повышенных скоростях фильтрации индикатор успевает попасть лишь в наиболее активные в фильтрационном отношении зоны пласта, а пассивные области (которые в условиях длительной миграции принимают равнозначное с ними участие в переносе) оказываются «выключенными»

из процесса. Полученные таким образом расчетные параметры не могут использоваться в прогнозных оценках — ни непосредственно, ни в виде экстраполированных значений: подобная экстраполяция должна учитывать масштабные эффекты, связанные с литологической и фильтрационной неоднородностью среды, а для этого опять-таки обычно отсутствуют исходные данные. Правда, роль этих эффектов можно ограничить увеличением размеров зоны опробования, но для этого необходимы эксперименты, соизмеримые по своим масштабам с эксплуатационными (прогнозными) условиями; об этом убедительно свидетельствует и теоретический анализ (см. разд. 3.3).

В то же время, лабораторные эксперименты на однородных образцах дают обычно (при правильной постановке) более высокие и реальные значения пористости, близкие к величине общей пористости грунтов, и с этой точки зрения они могут быть хорошей альтернативой полевым опытным работам. Данный вывод подтверждается и тем, что существует довольно широкий круг прогнозных задач, в которых, благодаря сглаживающему влиянию субвертикальной конвекции и профильной поперечной дисперсии, для долговременных прогнозных оценок может с успехом применяться расчетная схема поршневого вытеснения (отвечающая асимптотическому режиму в пределах водоносного пласта или его части, что определяется, преимущественно, структурой и параметрами фильтрации); при этом единственным необходимым исходным миграционным параметром является общая пористость (средневзвешенная по мощностям слоев). В таком случае достаточно установить лабораторными испытаниями значения пористости для каждого слоя.

Надежность прогноза переноса в слоистой толще будет определяться, скорее, точностью и полнотой информации о структурной и фильтрационной дифференциации разреза, а не результатами собственно индикаторных опробований. Кстати, лабораторными методами довольно

просто определяются коэффициент молекулярной диффузии и параметр межслоевой поперечной дисперсии, контролирующие, наряду с субвертикальной конвекцией*, степень насыщения трассером слабопроницаемых зон неоднородного пористого пласта. В тех же случаях, когда пренебрежение эффектами рассеяния в пределах водоносного пласта не отвечает требованиям прогнозных построений, полевые локальные эксперименты следует признать тем более неэффективными, и основные опытно-миграционные исследования необходимо ориентировать на строительно-эксплуатационный период.

Итак, при определении миграционных параметров в водоносных комплексах, сложенных пористыми (песчано-глинистыми) породами, ОМО либо неэффективны, либо не дают ощутимых преимуществ по сравнению с лабораторными определениями, за исключением тех частных вариантов, когда опробования планируются на уровне опытно-эксплуатационных работ. Этот вывод относится к опробованиям, проводимым при массовых гидрогеологических изысканиях специально для изучения возможных схем и параметров миграции, и не касается, естественно, работ исследовательского характера, а также индикаторных запусков, проводимых попутно с другими экспериментами. Такое отношение к возможностям ОМО в пористых породах должно, на наш взгляд, сохраниться до тех пор, пока не будут разработаны и внедрены в практику эффективные методы расчленения разрезов опробуемых толщ (по литологии, физическим и, главное, фильтрационным свойствам).

Специфические требования к ОМО могут выдвигаться также на участках загрязнения, подлежащих реабилитации. Например, распределение микроскоплений углеводородов, загрязняющих пористые водоносные комплек-

* Связанной, в частности, с инфильтрацией, перетеканием, гравитационными (плотностными) эффектами.

сы, предлагается [3, 4] оценивать запусками индикаторов, усваиваемых в заранее определенных соотношениях как водой, так и углеводородами. Однако, подобные эксперименты не являются пока достоянием производственной практики.

В противоположность сказанному, в трещиноватых породах для ОМО нет альтернативных возможностей. К тому же, высокие показатели гидравлического переноса и рассеяния, характерные для опытных условий, обычно сглаживают здесь влияние масштабных эффектов. При этом для описания разномасштабных процессов могут нередко использоваться достаточно идентичные и относительно несложные расчетные модели, учитывающие не только те или иные особенности режима внутрипластового массообмена, но и характерные структуры фильтрационных течений. Иначе говоря, в трещиноватых породах ОМО, дополняемые лабораторными испытаниями пористых блоков, нередко (хотя и не всегда) реально позволяют определить миграционные параметры, которые допустимо использовать в последующих прогнозах либо непосредственно, либо после их аналитической экстраполяции на прогнозные условия. Наиболее значимым исключением здесь являются «крупноблочные» породы, в которых большие расстояния между основными проводящими путями — трещинами, каналами — не позволяют удовлетворить при опробованиях условию сплошности среды: в интервале опробования размещаются лишь одна или несколько трещин — каналов.

Учитывая, что теория и практика свидетельствуют о возможностях наиболее интенсивного загрязнения подземных вод именно в комплексах существенно трещиноватых пород, можно с полным основанием сделать следующий вывод: ОМО должны включаться в круг обязательных видов гидрогеологических изысканий на тех объектах, где необходимо обеспечить охрану от загрязнения подземных вод, приуроченных к комплексам трещинова-

тых пород. Впрочем, если априорно ясно, что возможность загрязнения подземных вод на изучаемом объекте связана лишь с весьма длительными процессами — в сравнении с характерным временем молекулярно-диффузационной пропитки блоков, то при доминирующей емкости блоков (когда их пористость превышает 10-15%) можно ограничиться лабораторным изучением миграционных свойств пород*.

Особо следует отметить возможность использования трассеров для повышения информативности опытно-фильтрационных работ, которая может быть эффективно реализована в любых водоносных комплексах (см. 20.1).

Сделанные выводы о целесообразных условиях проведения индикаторных опробований дают основание для более направленной разработки последующих теоретических и методических положений; в частности, применительно к ОМО основное внимание будет уделено экспериментам в трещиноватых и трещиновато-пористых породах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 13

1. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Опытно-миграционные работы в водоносных пластах, М., Недра, 1986, 280 с.
2. Опытно-фильтрационные работы. Под ред. В.М.Шестакова и Д.М. Башкатова. М., Недра, 1974. 203 с.
3. Gin E.C., Huang E.T. The effect of rock wettability on water leaching during miscible displacement. - SPE Res. Eng., 1990, v.5. N2, p.p. 205-218.
4. Jin M., Delshad M., Dwarakanath V., McKinney D.C., Pope G.A., Sepehrnqri K., Tilburg C.E., Jackson R.E. Partitioning tracer test for detection, estimation, and

* Конечно, при условии, что загрязняющие компоненты усваиваются пористой матрицей.

**АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫХ СХЕМ И УСЛОВИЙ
ПОСТАНОВКИ ОПЫТНО-МИГРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЙ**

remediation performance assessment of subsurface nonaqueous phase liquids. - Water Res. Res., 1995, v.31, N5, p.p. 1201-1211.

5. Sudicky E.A., Cherry J.A., Frind E.O. A natural gradient dispersion test. - J. Hydrology, 1983, v. 63, 1/2, p.p. 81-108.

14.1. Исходные предпосылки схематизации и основные аналитические решения

14.1.1. Исходные предпосылки к построению расчетных моделей

Обоснование расчетных моделей дается здесь, за редкими исключениями, лишь применительно к наиболее эффективным схемам опробования — в возмущенных фильтрационных потоках. В общем случае масштабы опробования предполагаются удовлетворяющими условиям континуума. В противном случае, когда общее число основных водопроводящих трещин (каналов) в зоне опробования оказывается слишком малым, рассматриваемые ниже расчетные модели позволяют получить лишь некоторые условные значения параметров, пригодность которых для последующего прогноза определяется в основном степенью соответствия профильной структуры миграционного потока (в частности, вскрытого интервала) в опытных условиях, с одной стороны, и в прогнозных — с другой.

Модели для интерпретации ОМО дифференцируются в зависимости от характера гетерогенности опробуемых пород, типа индикатора (химический или тепловой) и схемы эксперимента. Предполагается, что во многих реальных ситуациях опробуемые комплексы трещиноватых и трещиновато-пористых пород ведут себя как гетерогенная среда: интенсивность конвекции индикатора по тре-

шинам (каналам) сдерживается его диффузионным оттоком в межтрецинное (поровое) пространство блоков. Такой миграционный процесс описывается в рамках моделей макродисперсии (разд. 3.2.1), разработанных для сред с двойной емкостью. Априорно пренебречь указанным обменным механизмом можно только при рассмотрении комплексов гомогенных («скальных» — изверженных или сильно метаморфизованных осадочных) пород с характерными значениями общей связной пористости блоков до первых процентов. Анализ сравнительно кратковременных процессов в такой среде может базироваться на модели микродисперсии (разд. 2.2).

На практике, однако, обращение к последней модели при интерпретации индикаторных опробований происходит довольно часто ввиду ограниченного пространственно-временного масштаба опытов, недостаточного для проявления эффекта двойной пористости на выходных кривых. Естественно, что расчетная схема микродисперсии является основной и при анализе переноса специальных индикаторов, слабо усваиваемых пористой матрицей. Необходимость их применения может диктоваться как требованиями исследования поведения отдельных групп загрязнителей (например, высокомолекулярных органических веществ), так и необходимостью четкого выделения механизмов чисто конвективно-гидродисперсионного характера при опытном опробовании.

Фильтрационный режим опыта считается стационарным (квазистационарным), причем основные решения даются применительно к *плановой* структуре фильтрационного течения при отсутствии ощутимой плановой неоднородности*. Считается, что расположение рабочих интервалов скважин исключает возможность сильного про-

* Наличие сильного тренда проводимости в пределах области влияния индикаторного эксперимента, особенно в направлении, нормальном доминирующем траекториям фильтрации, делает опыт крайне ненадежным [34].

явления вертикальной конвекции, а малая концентрация индикатора не допускает плотностной дифференциации раствора.

Для наиболее распространенной схемы — опробования при наливе (нагнетании), когда достаточно четко выражен плоскорадиальный характер миграционного потока, обычно удается получить простые и удобные для интерпретации одномерные аналитические решения. Более сложный (планово-двумерный) характер миграции при дуплетном опробовании делает целесообразным графическое представление решений. Далее, ввиду невысокой информативности опробований при откачке для них достаточно ограничиться простейшими балансовыми оценками, позволяющими определить пористость (трещиноватость) опробуемых пород. Наконец, для односкважинного опробования практический интерес могут представлять лишь самые приближенные аналитические оценки.

С точки зрения индикаторного сигнала, ниже будут рассматриваться в основном решения для случая непрерывного ввода; зависимости для пакетного запуска можно легко получить методом суперпозиции. Решения для импульсного сигнала, ввиду его резко пониженной информативности, за некоторыми исключениями, специально не рассматриваются. Во всех случаях считается, что экспериментальная схема отвечает достаточно большим числам Пекле, а это позволяет задавать на входе индикатора в пласт граничное условие первого рода (см. разд. 1.2.3) и не учитывать влияния отбора индикатора на режим миграции. Вместе с тем, сказанное не исключает необходимости специального анализа вопроса о дополнительном разбавлении индикатора в наблюдательной скважине, т.е. о ее гидрохимической инерционности (см. разд. 14.4).

В экспериментах, отвечающих малым числам Пекле, необходимо делать различия между замерами концентрации в откачивающих и наблюдательных скважинах. Если опыты по схеме налива (нагне-

тания) индикатора с его отбором в наблюдательных скважинах имеют дело с объемной локальной (resident) концентрацией c_r , то в опытах с откачкой используется «потоковая» (flux) концентрация c_f через то или иное входное (выходное) сечение:

$$vc_f = vc_r - D_L \frac{\partial c}{\partial l}.$$

По сути дела, здесь — это проблема задания верных граничных условий по концентрационной функции. Если вспомнить, что само понятие коэффициента дисперсии D_L носит статистический характер, то вряд ли его вообще допустимо использовать вблизи входной границы и наиболее корректно здесь задание ГУ первого рода с функцией c_r . Тем самым устраняется и известный артефакт — дисперсия (не диффузия!) вверх по потоку от источника. Кстати, лабораторные опыты [30] подтвердили ошибочность использования функции c_f для их интерпретации. При $Re = 10-20$ разница между величинами c_f и c_r становится мало ощутимой. Однако, вблизи входных и выходных границ (скважин) она может усиливаться или ослабляться за счет наличия свободного объема в скважине и состояния ее прифильтровой зоны. Для запускной скважины первый фактор находит отражение в коэффициенте $\beta = \frac{V_w}{\omega} \cdot \frac{\nu}{D_L} \approx \frac{V_w}{\omega D_L}$ (V_w и ω — объем смешения

и его поперечное сечение — по отношению к потоку): чем он меньше, тем большее разница между c_f и c_r , которая становится несущественной при $\beta > 10$. В том же направлении оказывается и кольматация прискважинной зоны в запускной скважине. Кроме того, расхождения оказываются меньше для условий непрерывного запуска — в сравнении с пакетным или импульсным.*

Для простоты и общности изложения материала, исходные соотношения далее зависят для случая химического индикатора, так как аналогия между процессами массо- и теплообмена позволяет при необходимости

* В этом легко убедиться, соединяя представленное выше с балансовым уравнением на скважине: $V_w \frac{dc_f}{dt} = -\omega |\nu| c_{fc}$ [30].

легко перейти к описанию теплового воздействия на пласт (см. разд. 1.2.1 и 3.2.3).

Наконец, продолжительность эксперимента считается примерно отвечающей характерной длительности опытно-фильтрационных опробований (первые сутки, реже первые десятки суток).

14.1.2. Общая математическая постановка задачи миграции в плоскорадиальном потоке

Общее уравнение плоскорадиального миграционного потока имеет вид:

$$n \frac{\partial c}{\partial t} + v_r \frac{\partial c}{\partial r} - \frac{1}{\partial r} \left(D_r r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + W_s = 0 \quad (14.1)$$

(см. разд. 1.2.1), где для случая гомогенного пласта $W_s = 0$. Пренебрегая молекулярной диффузией, представим коэффициент гидродисперсии D_r в виде:

$$D_r = \delta_L v_r = \frac{\delta_L q}{2\pi r}, \quad (14.2)$$

где q — удельный расход налива. Это приводит уравнение (14.1) к форме:

$$n \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{q}{2\pi r} \frac{\partial c}{\partial r} - \frac{\delta_L q}{2\pi r} \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + W_s = 0. \quad (14.3)$$

При краевых условиях:

$$c \Big|_{t=0} = 0; \quad c \Big|_{r=r_0} = 1; \quad c \Big|_{r \rightarrow \infty} = 0 \quad (14.4)$$

ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ОПЫТНО-МИГРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЙ

и линейной зависимости между трансформантами \tilde{c} и W_s ($W_s = G_p \tilde{c}$)^{*} получаем задачу в преобразованном по Лапласу виде:

$$\frac{d^2 \tilde{c}}{dx^2} - \frac{d \tilde{c}}{dx} - x\chi \tilde{c} = 0; \quad (14.5)$$

$$\tilde{c} |_{x=x_0} = c_o/p, \tilde{c} |_{x \rightarrow \infty} = 0, \quad (14.6)$$

где

$$x = \frac{r}{\delta_L}; \chi = \frac{\delta_L^2}{A} (p + G_p/n); x_0 = r_o/\delta_L; A = q/2\pi n, \quad (14.6a)$$

причем для гомогенного пласта $G_p = 0$ ($\chi = \delta_L^2 p/A$).

Сделаем подстановку $\tilde{c} = u e^{x\chi/2}$, которая позволяет избавиться в уравнении (14.5) от первой производной:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \left(x\chi + \frac{1}{u} \right) u = 0; \quad (14.7)$$

$$u |_{x=x_0} = \frac{c_o}{p} e^{-x_0/2}, u |_{x \rightarrow \infty} = 0. \quad (14.8)$$

Уравнение (14.7) имеет общее решение:

$$u = \xi^{1/2} \left[c_1 I_{1/3} \left(\frac{2}{3\chi} \xi^{3/2} \right) + c_2 K_{1/3} \left(\frac{2}{3\chi} \xi^{3/2} \right) \right], \quad (14.9)$$

где $\xi = x\chi + 1/4$, $I_{1/3}(z)$ и $K_{1/3}(z)$ — модифицированные функции Бесселя первого и второго рода [15], c_1 и c_2 — постоянные, определяемые из преобразованных условий на границах (14.8). Окончательное решение в изображениях имеет вид [16]:

* Это, в частности, справедливо для основных расчетных схем миграции в трещиновато-пористых породах (см. разд. 3.2).

$$\tilde{c} = \frac{c_0}{p} \left(\frac{x\chi + 1/4}{x_o\chi + 1/4} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{x - x_o}{2} \right) \frac{K_{1/3} \left[\frac{2}{3}\chi (x\chi + 1/4)^{3/2} \right]}{K_{1/3} \left[\frac{2}{3}\chi (x_o\chi + 1/4)^{3/2} \right]} \quad (14.10)$$

Переход от изображения (14.10) к оригиналу приводит к довольно неудобным для практических расчетов формулам [1, 16, 23]. Поэтому далее анализируются преимущественно приближенные решения плоскорадиальных задач, а представление (14.10) рассматривается как эталонное. При необходимости, по нему могут быть рассчитаны типовые кривые — посредством численного перехода к оригиналу [17, 29].

14.1.3. Особенности математического описания миграции индикатора при дуплетном опробовании квазигомогенных пород

Гидродинамическое поле взаимодействующих скважин — нагнетательной и откачивающей — является двумерным, так что для описания миграционных процессов должно привлекаться общее уравнение (1.20) при представлении (1.30) для оператора ∇J . Решение заметно облегчается, если трансформировать (1.30) в область комплексного потенциала (1.31), где координаты соотносятся с линиями тока Ψ и эквипотенциалами φ ; пренебрежение поперечным гидродисперсионным обменом между соседними лентами позволяет рассматривать задачу переноса в квазиодномерной постановке [6, 21, 24, 39]. При расположении скважин, как показано на рис. 14.1а, имеем [22]:

$$\Psi = \frac{q}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{ry}{r^2/4 - (x^2 + y^2)} \right]; \varphi = \frac{q}{2\pi} \operatorname{arcth} \left[\frac{rx}{r^2/4 + (x^2 + y^2)} \right] \quad (14.11)$$

а скорость фильтрации подчиняется закономерности:

$$v(\Psi, \varphi) = \frac{q}{\pi r} [ch(2\pi\varphi/q) + \cos(2\pi\Psi/q)]. \quad (14.12)$$

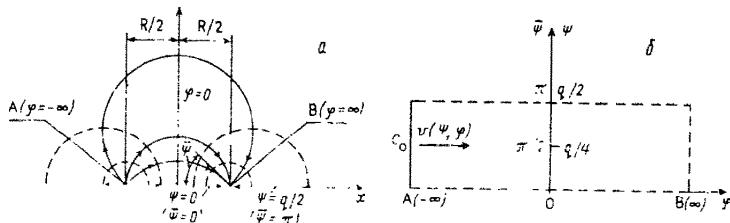


Рис. 4.1. К выводу расчетных зависимостей для опробования пластов по дуплетной схеме:

а - структура фильтрационного течения (A и B - нагнетательная и откачивающая скважины; пунктирными линиями показаны эквипотенциалы $\varphi = \text{const}$, сплошными - линии тока $\Psi = \text{const}$); б - представление фильтрационного течения на комплексной плоскости $\bar{\Psi} + i\bar{\varphi}$

При таком представлении фильтрационного течения значения функции Ψ , меняющейся от 0 до $q/2$, характеризуют долю расхода жидкости, поступающей в скважину по различным лентам тока (оконтуренным кратчайшей линией тока $\Psi = 0$ и линией с текущим значением Ψ); значения функции φ меняются от $-\infty$ (на контуре нагнетательной скважины) до $+\infty$ (на контуре откачивающей скважины). В системе криволинейных координат (φ, Ψ) область фильтрации $-\infty < \varphi < \infty, 0 \leq \Psi \leq q/2$ изображается геометрически в виде прямоугольника (см. рис. 14.1б).

В то же время, для любой линии тока Ψ (в верхней полуплоскости) может быть получена временная харак-

теристика $t(\Psi)$, отвечающая длительности нахождения частицы жидкости на соответствующей траектории Ψ [2, 22]:

$$t_o(\Psi) = n \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d\varphi}{v^2(\Psi, \Phi)} = \frac{\pi r^2 n}{q} \left(\frac{\sin \bar{\Psi} - \bar{\Psi} \cos \bar{\Psi}}{\sin^3 \bar{\Psi}} \right), \quad (14.13)$$

где $\bar{\Psi} = 2\pi\Psi/q$ ($0 \leq \bar{\Psi} \leq \pi$); при $\bar{\Psi} = 0$ (кратчайшая линия тока) $t_o = \pi r^2 n / 3q$. И наоборот, для любого времени $t = t_o$ может быть найдена функция тока $\Psi_o = \Psi(t_o)$, абсолютное значение которой отвечает половине удельного расхода меченой жидкости, поступающей в момент времени t_o в откачивающую скважину. Решение позволяет без труда учесть разновременность прихода трассера по разобщенным траекториям к откачивающей скважине и его смешение здесь с пластовой водой, не охваченной концентрационным возмущением; для этого используется интегральное представление функции концентрации индикатора в скважине:

$$c(t) = \frac{2^{q/2}}{q} \int_0^t c(t, \Psi) d\Psi, \quad (14.14)$$

где $c(t, \Psi)$ — концентрация индикатора, поступающего в эксплуатационную скважину по фиксированной линии тока Ψ в момент t . Формула смешения (14.14) представляет собой отношение удельного потока массы вещества, привносимого в скважину, к ее приведенному фильтрационному расходу q .

В том случае, когда решение сформулированной краевой задачи может быть получено в виде функции $c(t, t_o)$ двух аргументов — текущего времени t и характерного времени процесса t_o (см. формулу (14.13)) соотношение (14.14) можно записать в форме:

$$\bar{c}(t) = \frac{1}{\pi} \int_o^{\Psi^*} \bar{c}(t, t_o) d\Psi = \frac{1}{\pi} \left(\int_o^{\Psi^*} \bar{c} d\Psi + \int_{\Psi^*}^{\pi} \bar{c} d\Psi \right), \quad (14.15)$$

причем если исходить из чисто конвективного переноса ($\bar{c} = 1$ при $0 \leq \bar{\Psi} \leq \bar{\Psi}^*$ и $\bar{c} = 0$ при $\bar{\Psi}^* < \bar{\Psi} \leq \pi$), то

$$\bar{c}(t) = \frac{\bar{\Psi}^*(t_o)}{\pi}, \quad (14.16)$$

где $\bar{c}(t) = c(t)/c_o$; $\bar{\Psi} = \frac{2\pi\Psi}{q}$ — «угол захвата» линий тока, по которым в эксплуатационную скважину поступает индикатор (см. рис. 14.1а); величина $\bar{\Psi}^*(t_o)$ характеризует крайнюю из таких линий на момент $t = t_o$; для произвольного расчетного момента t угол $\bar{\Psi}^*$ может быть найден по трансцендентной формуле (14.13). Отсюда видно, что характер изменения концентрационной функции определяется величиной $r^2 n/q$.

С погрешностью не более 1-2% решение (14.16) аппроксимируется формулой [5]:

$$\bar{c} = \frac{2}{\pi} \arccos \left(\frac{t_o}{t} \right)^{1/\pi}, \quad t \geq t_o = \frac{\pi r^2 m n}{3 Q}. \quad (14.16a)$$

Эта формула удобна, в частности, для построения решений, учитывающих неоднородность (по концентрации) граничных условий.

Так, на рис. 14.2 показаны графики, отвечающие «пакетному» входному сигналу, продолжительность которого (t_n) кратна величине характерного временного масштаба ($T_n = t_n/t_o = 1, 2, 3, 4, 5$). Обращает на себя внимание резкая асимметрия графиков, выражаяющаяся в больших градиентах концентрационной функции $\bar{c}(t)$ на нисходящих ветвях.

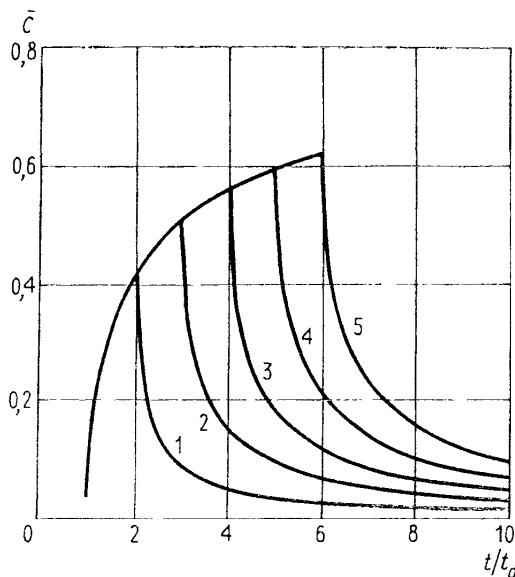


Рис. 14.2. Характер выходных кривых при «пакетном» входном сигнале (дуплетная схема опробования); цифры на графиках относятся к отношению t_n/t_o

Следующий рисунок (14.3) отражает частный результат расчета рециркуляционной двухскважинной системы. В начальный период ее функционирования отток воды из откачивающей в нагнетательную скважину сопровождается вводом дополнительного количества вещества (индикатора), обеспечивающего поддержание на входе в систему постоянной граничной концентрации \bar{c} .

Сплошная линия для рециркуляционной схемы; пунктиром дано решение для «пакетного» отходного сигнала равна 1. Затем, в момент ($t = t_o$) поступления первых порций вещества в откачивающую скважину, подача индикатора прекращается, так что характер входного концентрационного сигнала на всех последующих этапах опыта совпадает с выходной концентрационной функцией $\bar{c}(t)$. На рис. 14.3. видно, что взаимное наложение последовательных концентрационных волн приводит к нарушению монотонности нисходя-

щей ветви результирующего графика (при его построении использовалась многоуровневая суперпозиция решения (14.16 а), причем координата на оси времени каждого локального максимума отвечает значению, кратному t_0). Отметим, что в дуплетном трассерном эксперименте реализация такой, полностью замкнутой, схемы позволяет более рационально использовать индикатор.

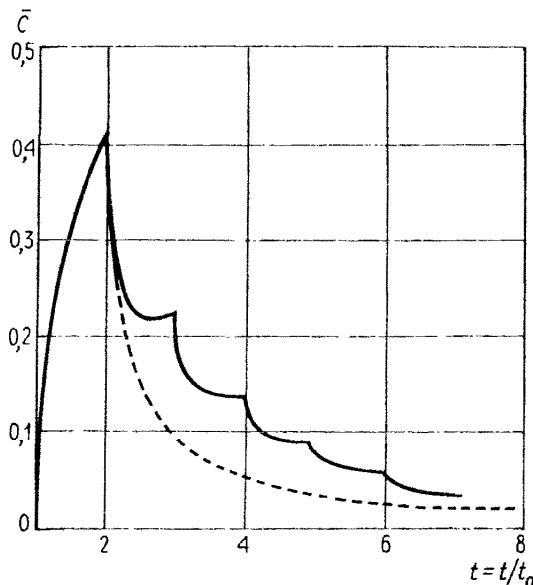


Рис. 14.3. График функции $\bar{c}(t)$ (сплошная линия - для рециркуляционной схемы; пунктиром дано решение для «пакетного» входного сигнала $\bar{t}_n = 1$)

Рассмотренные подходы могут быть распространены и на анализ миграции в гетерогенных системах (разд. 14.3.4).

14.1.4. О возможном несоответствии структуры миграционного потока модельным представлениям

Понятно, что рассмотренные теоретические модели ОМО являются существенной идеализацией реального опытного процесса. Это особенно ясно для опробования пород с сильно выраженной гетерогенностью и неоднородностью трещинного пространства, в первую очередь, крупноблочных образований или сред с каналовым механизмом миграции (разд. 1.1.1). Однако предложенные усложненные модели массопереноса в таких средах на практике обычно не могут быть обеспечены требуемой опытной информацией. Поэтому мы не видим смысла отказываться в подобных случаях от традиционных моделей, рассмотренных выше, но будет неизменно помнить об их ограниченности и необходимости различного рода контрольных процедур. При этом предпочтение будем отдавать тем опытным схемам, которые наименее чувствительны к возможным отклонениям реальной ситуации от модельной. Вместе с тем, частично такого рода отклонения могут быть эффективно учтены при планировании и интерпретации опыта, что мы и попытаемся проиллюстрировать ниже.

Анализ факторов, искажающих плановую структуру потока. Среди факторов, приводящих к искажению предполагаемой структуры миграционного потока, специального рассмотрения заслуживает влияние естественного фильтрационного потока и плановой фильтрационной анизотропии опробуемого пласта. Роль этих факторов для схемы опробования с наливом может быть учтена путем сопоставления расчетного t_o и фактического t'_o времени поршневого движения меченых частиц; относительное отклонение $\varepsilon_t = (t'_o - t_o)/t_o$ связано с относительной погрешностью оценки пористости: $\varepsilon_n = -\varepsilon_t/(1 - \varepsilon_t)$

Так, при пренебрежении естественным потоком подземных вод, имеющим скорость v_e в направлении оси x , погрешность ε_t отражается графиком (рис. 14.4), который построен на основе известного решения [16] для источника в одномерном фильтрационном потоке $\bar{v}_e = v_e r/q$; θ — угол, образованный радиусом r с направлением оси x). При анализе опытов в планово-анизотропных толщах можно воспользоваться графиком значений ε_t (рис. 14.5) [4] ($\kappa = K_x/K_y$ — коэффициент анизотропии, причем K_x — минимальное значение коэффициента фильтрации; координатные оси ориентированы по главным направлениям анизотропии; φ — угол, образованный радиусом r с направлением оси x).

Из приведенных графических зависимостей видно, что при пренебрежении естественным потоком уровень погрешностей оказывается довольно высоким уже при $\bar{v}_e > 0,05$, а проявление плановой анизотропии ощутимо искажает опытные результаты при $\kappa < 0,7 - 0,8$.*

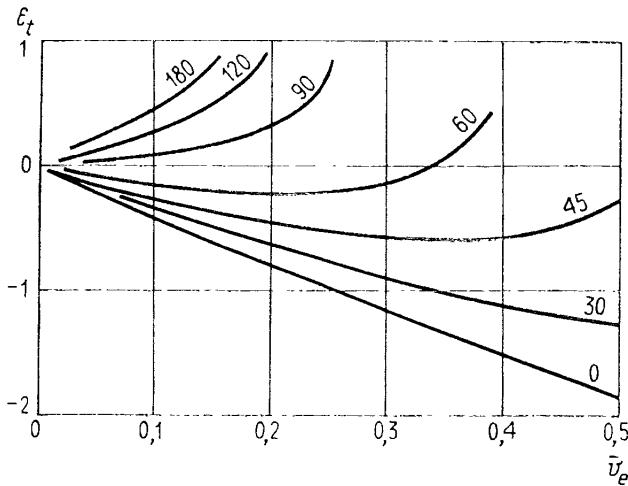


Рис. 14.4. График функции $\varepsilon_t = f(\bar{v}_e)$

* Следует заметить, что в трещиноватых породах анизотропия проницаемости сопряжена также с неэквивалентностью проявления емкостных свойств по разным направлениям (см. разд. 1.1.1).

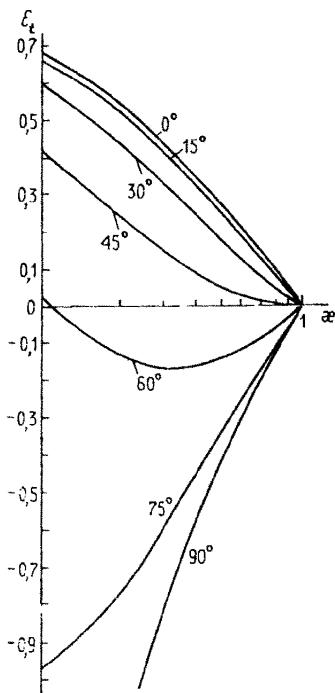


Рис. 14.5. График функции $\varepsilon_t = f(k)$; цифры кривых - значения угла ϕ (град.)

ропии [5]:

$$t'_o = \frac{\pi m n_x r^2 (\cos^2 \varphi + \kappa^2 \sin^2 \varphi)}{\kappa Q (\cos^2 \varphi + \omega^2 \sin^2 \varphi)} \quad (14.17)$$

При этом погрешность ε_n заметно несимметрична: максимальный ее уровень в оценке пористости наблюдается для расчетных точек луча, направленного против естественного потока ($\theta = 180^\circ$) или ориентированного по главным осям анизотропии ($\varphi = 0^\circ, 90^\circ$).

Строго говоря, рассмотрение соответствующих миграционных задач применительно к трещиноватым коллекторам требует введения в модель коэффициента $\kappa' = \sqrt{(K/n)_x / (K/n)_y} = \kappa / \omega$ ($\omega = \sqrt{n_x / n_y}$) характеризующего изменение истинных скоростей массопереноса по различным направлениям; при этом исходя из структурных соображений, логично предположить, что параметры K и ω имеют совпадающие главные оси анизотропии.

В этом случае из известных кинематических соотношений находится характерное время поршневого перемещения индикатора по пласту при произвольной ориентации луча скважин относительно осей анизот-

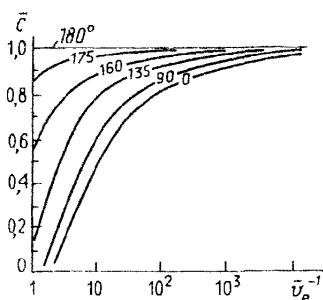


Рис. 14.6. Влияние скорости естественного фильтрационного потока на результаты дуплетного опробования (при стационарном режиме массопереноса); $\bar{c} = c_c \infty / c_{c \infty}$, $0 - 180^\circ$ — значение угла α

Более сложной оказывается оценка влияния упомянутых факторов при дуплетной схеме опробования.

Так, роль естественного потока может быть приближенно учтена на основе стационарного решения соответствующей краевой задачи миграции [20] для предельной концентрации $c_{c \infty}$ индикатора в откачиваемой скважине — по сравнению с концентрацией $\hat{c}_{c \infty}$ при отсутствии естественного потока. Графики $\hat{c}_{c \infty} = f(\alpha, v_e)$ (рис. 14.6) построены для различных значений угла α между направлением естественного потока и прямой, соединяющей опытные скважины (при $\alpha = 0^\circ$ естественный поток направлен от откачиваемой скважины к инъекционной). Особо следует отметить три предельных случая: 1) при значении $\bar{v}_e < 10^{-3}$ ($\bar{v}_e = v_e r / q$) влиянием естественного потока можно пренебречь; 2) при больших значениях \bar{v}_e и малых α индика-

где ϕ — угол между направлением на наблюдательную скважину и осью x , совпадающей с одной из главных осей анизотропии.

Реально корректирующие процедуры могут быть выполнены при независимой оценке параметра K по данным кустовой откачки; значение ω может быть подобрано при обработке индикаторного опыта также в случае наличия нескольких лучей наблюдательных пьезометров. При этом следует обратить внимание на то, что по мере увеличения масштаба опробования параметр ω будет вести себя неинвариантно, все более приближаясь к единице (за счет постепенного вовлечения в процесс систем трещин, ориентированных субнормально лучу скважин).

тор может вовсе не достигнуть регистрационной скважины; 3) при $\alpha = 180^\circ$ естественный поток слабо влияет на результаты опыта и легко учитывается. Для реальных временных диапазонов, отвечающих резконестационарной фазе миграционного процесса (когда обычно $\bar{c} < 0,5 + 0,7$), результаты получаются намного мягче, так как естественный поток искажает, преимущественно, периферийные траектории переноса трассера, отраженные в высоких значениях \bar{c} .

При известной (произвольной) ориентации оси дуплета относительно главных осей фильтрационной анизотропии выражение для оценки характерного времени $t_o'(\Psi)$, аналогичное (14.17) при $\omega = 1$, может быть представлено в форме [5, 28]:

$$t_o'(\Psi) = \frac{\pi n r^2 (\cos^2 \varphi + \kappa^2 \sin^2 \varphi)}{\kappa q} \cdot \frac{\sin \Psi - \bar{\Psi} \cos \Psi}{\sin^3 \Psi}, \quad (14.18)$$

где φ — угол между осью дуплета и направлением минимальной проницаемости. Для кратчайшей линии тока ($\Psi = 0$):

$$t_o' = \frac{\pi n r^2 (\cos^2 \varphi + \kappa^2 \sin^2 \varphi)}{3 \kappa q}. \quad (14.18a)$$

Анализ факторов, искажающих профильную структуру потока. Здесь следует отметить неоднородность пород в разрезе и профильную деформацию потока при опробовании несовершенными скважинами. Понятно, что наличие в пределах опробуемого интервала неучтенных слабофильтрующих зон приводит к пропорциональному снижению расчетной емкости пород в зонах, определяющих расход фильтрационного потока.

Другого рода искажающие эффекты в слоистых образованиях связаны с влиянием естественного фильтрационного потока [33]. Нагнетание индикаторной жидкости в профильно-неоднородный пласт может приводить в этом случае к внедрению природных вод в область, которая при планово-двумерном рассмотрении миграционной задачи считается «водораздельной»: реальная трехмер-

ность процесса приводит к конвективному размыву границы раздела между нагнетаемой и пластовой водой, что может ошибочно трактоваться как проявление внутренней гетерогенности пород.

Существенные погрешности при опробовании пластов большой мощности наливами в несовершенные скважины могут вызываться расхождением скоростей фильтрации — фактических и принимаемых в расчетной модели плоской осесимметричной миграции.

Эти расхождения могут быть оценены на основе анализа выражения, полученного для временной координаты (t'_o) фронта поршневого вытеснения [28]:

$$t'_o = \frac{4\pi l^3 n}{Q} (\Phi_o - 1) \left[\frac{1}{3} (\Phi_o^3 + \Phi_o + 1) - \Psi_o^2 \right], \quad (14.19)$$

где l — длина фильтра ($l \leq m$), Φ_o и Ψ_o — эллиптические координаты, связанные с цилиндрическими координатами z и r соотношениями:

$$\Phi_o = \left[\frac{1}{2} (1 + \bar{r}^2 + \bar{z}^2) + \sqrt{1/4 (1 + \bar{r}^2 + \bar{z}^2)^2 - \bar{z}^2} \right]^{1/2} \quad (14.19a)$$

$$\Psi_o = \left[\frac{1}{2} (1 + \bar{r}^2 + \bar{z}^2) - \sqrt{1/4 (1 + \bar{r}^2 + \bar{z}^2)^2 - \bar{z}^2} \right]^{1/2} \quad (14.19b)$$

($\bar{r} = r/m$; $\bar{z} = z/m$). Для случая профильно анизотропного пласта справедливы трансформации:

$$t''_o \rightarrow t'_o/\kappa^2, (\Phi_o, \Psi_o) \rightarrow (\kappa r, z) \text{ при } \kappa = \sqrt{K_z/K_x}.$$

Нетрудно понять, что пренебрежение реальным несовершенством нагнетательной скважины при стандартной обработке опыта приведет к завышению расчетной емкости пласта. Конечно, в однородных изотропных пластах трудности интерпретации можно обойти изменением расчетной схемы, но в реальных случаях для этого обычно не хватает исходной информации, особенно в части фильтрационных свойств. В целом, с учетом возможной неоднородности пород,

качество ОМО с использованием несовершенных скважин обычно намного ниже, чем для совершенных. К сожалению, с этим приходится мириться при опробовании мощных водоносных толщ.

14.2. Частные решения для квазигомогенных сред

При анализе индикаторных опытов в квазигомогенных средах могут использоваться решения, полученные для модели микродисперсии. Рассматривая их применительно к комплексам скальных трещиноватых пород, необходимо считаться с высоким гидродисперсионным рассеянием по трещинам: опытным условиям отвечают относительно малые (как правило, первые десятки единиц) значения характерного параметра Пекле. В крупноблочных породах приводимые решения могут давать плохие результаты из-за невыполнения предпосылки сплошности среды.

14.2.1. Приближенные решения для плоскорадиальной миграции и их сравнительная характеристика

Приближенные решения уравнения (14.1) при $W_s = 0$ получаются путем усреднения коэффициента продольной гидродисперсии D_r ,

1. Если, следуя предложению В.М.Шестакова [14], ограничиться рассмотрением дисперсии лишь вблизи концентрационного фронта ($r = r^* \equiv \sqrt{q t / \pi n}$), то, введя переменную $x = \pi r^2$, получим уравнение

$$n \frac{\partial c}{\partial t} + q \frac{\partial c}{\partial x} - \widetilde{D} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0, \quad (14.20)$$

подобное уравнению микродисперсии (с постоянными коэффициентами n , q и $\widetilde{D} = 4 \pi \delta_L q r^*/3 = const$) для плоскопараллельного переноса. При постоянной концентра-

ции на контуре нагнетательной скважины приходим к решению:

$$\bar{c} \equiv \frac{c}{c_o} = 0,5 \operatorname{erfc} \left(\frac{1 - \mu}{2\sqrt{\sigma}} \right), \quad (14.21)$$

где

$$\mu = t_r; \sigma = 4 t_r^{3/2} / 3 Pe; t_r = (r^*/r)^2; Pe = r/\delta_L; r_o \ll r. \quad (14.21a)$$

Безразмерный параметр t_r отвечает отношению текущего времени процесса t к характерной временной координате фронта поршневого вытеснения $t_o = \pi r^2 n/q$.

2. Точно к такому же результату приводит представление исходного уравнения (14.3, $W_s = 0$) в форме (2.15), предложенной К.Велти и Л.Гелхаром [39], где функции $\omega(t)$ и η (2.15a) определяются согласно выражениям:

$$\omega(t) = \frac{\bar{r}^3}{3A^2}, \eta = \frac{\bar{r}^2 - \bar{r}^2}{2A} \quad (\bar{r} = \sqrt{2At}, A = \frac{q}{2\pi n}). \quad (14.22)$$

3. Сущность другого подхода, предложенного Н.Н.Веригиным [3] заключается в усреднении коэффициента дисперсии по пространственной координате — в зоне, занятой индикатором. Решениедается в виде табулированного интеграла. Как показывают численные расчеты, при определенным образом подобранных аргументах решение Н.Н.Веригина дает хорошее совпадение с точным решением радиальной задачи и для случая линейной зависимости (14.2) коэффициента дисперсии D , от скорости фильтрации v , [7].

4. П.Раймонди с соавторами [32] предложил пренебречь влиянием дисперсии на распределение концентрации в точке наблюдения по сравнению с общим рассеянием, которое имело место в пласте до этой точки; тогда

$\partial c / \partial r \approx - (r/A \partial c / \partial t)$ и уравнение (14.3) при $W_s = 0$ примет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{A \partial c}{r \partial r} - \frac{\delta_L r \partial^2 c}{A \partial t^2} = 0 \quad (A = \frac{q}{2 \pi n}) . \quad (14.23)$$

Его решение при соответственно преобразованных краевых условиях (14.4) дается формулой:

$$\bar{c} = \frac{\operatorname{erfc}(u)}{\operatorname{erfc}(u_o)}, \quad (14.24)$$

где

$$u = (r^2/2 - At) / (4\delta_L r^3/3)^{1/2}; u_o = u |_{r=r_0} \quad (14.24a)$$

При $r_o \rightarrow 0$ решение (14.24) принимает форму (14.21) при $\mu = t$; $\sigma = 4/(3Pe)$.

Методом суперпозиции всегда могут быть найдены и приближенные зависимости, описывающие миграцию в радиальном потоке при пакетном (длительностью t_n) входном сигнале. Например, используя обобщенную формулу (14.21), получим:

$$\bar{c} = 0,5 \left[\operatorname{erfc} \frac{1 - \mu(t)}{2 \sqrt{\sigma(t)}} - \operatorname{erfc} \frac{1 - \mu(t - t_n)}{2 \sqrt{\sigma(t - t_n)}} \right]. \quad (14.25)$$

Приведенные решения для осесимметричной микродисперсии являются функциями двух безразмерных переменных (t_r и Pe), что позволяет легко провести их сопоставление. Сравнение с точным (модельным) решением [35] для широкого диапазона значений параметра Pe ($1 < Pe < 1000$) показывает, что при малых ($3 \leq Pe \leq 30$) значениях Pe наиболее точным является решение Н.Н.Веригина; однако, с ростом числа Pe оно несколько занижает длину зоны дисперсии и дает менее удовлетворительное совпадение с эталонными кривыми по сравнению, например, с расчетами по решениям В.М.Шестакова или Р.Раймонди: при $Pe > 30-40$ относительные погрешности последних решений не превышают 15% (для $\bar{c} > 0,2$).

Несколько иные оценки дает расчет времени t , при заданных величинах \bar{c} : тот же уровень погрешностей достигается при $Pe > 50\text{--}70$. Погрешности определения параметров пористости n и микродисперсии δ на основе этих решений (методом линеаризации выходной кривой) уже при $Pe > 20$ не превышают 10%.

14.2.2. Представление решений для дуплетного опробования

Основная расчетная зависимость для дуплетной схемы — первое равенство в (14.15), где подинтегральная функция $\bar{c}(t, t_o)$ дается решением уравнения микродисперсии в квазиодномерной постановке:

$$\bar{c}(t, t_o) \approx 0,5 \operatorname{erfc} \left(\frac{t - t_o}{2\sqrt{\sigma}} \right), \quad (14.26)$$

а время $t_o(\Psi)$ — выражением (14.13); σ — параметр, характеризующий отклонение фактического времени t движения меченных частиц от времени t_o , равный $\sigma = t t_o (\sin \Psi / \Psi) Pe$, Pe — характерный параметр Пекле; $\Psi = 2\pi\Psi/q$.

График зависимости концентрации \bar{c} от безразмерного времени $\tilde{t} = t/t_o$ ($t_o = \pi r^2 n / 3q$ — время движения индикатора по кратчайшей линии тока) для различных значений Pe (рис. 14.7) может использоваться как типовой при интерпретации результатов миграционных опытов. Из анализа графика следует, что изменения концентрации в регистрационной скважине во многом обусловлены разновременным приходом трассера по различным лентам тока; это затрудняет определение дисперсионных характеристик пласта (чувствительность опытных кривых к ним, особенно в диапазоне относительных концентраций $\bar{c} > 0,2$, очень низка), но зато дает более надежную усредненную оценку емкости.

Для оценки дисперсивности гораздо более пригоден импульсный запуск [39].

14.2.3. Решение для индикаторных опытов при откачке

Для обработки импульсных запусков индикатора при откачках в гомогенных породах существует несколько аналитических решений [5, 26, 39], которые однако дают достаточно близкие результаты лишь при высоких (100) значениях характерного параметра Пекле $Pe = r/\delta$. Повышенная точность описания выходной кривой в опытных условиях, характеризующихся как высокими, так и низкими значениями параметра Пекле (начиная с $Pe > 5 \div 10$), достигается с использованием решения [39]:

$$c = \frac{M}{2 \pi m n r^2 \sqrt{(4 \pi / (3 Pe)) \Psi(t_r)}} \exp \left[-\frac{(1 - t_r)^2}{\frac{16}{3 Pe} \Psi(t_r)} \right], \quad (14.27)$$

где M — масса инъецируемого вещества, $t_r = \frac{Q}{\pi r^2 m n} = t/t_o$ ($t_o = \pi r^2 m n / Q$),

$$\Psi(t_r) = 1 - (1 - t_r) |1 - t_r|^{1/2}, \quad (14.27a)$$

причем $\Psi(t_r) \approx t_r$ в интервале $0 < t_r < 2,5$.

Согласно представленной зависимости, относительное время $t_{r,\max}$ прихода «пика» концентрации (c_{\max}) индикатора в точку наблюдения (откачивающую скважину) составляет:

$$t_{r,\max} = (\sqrt{1 + Pe^2} - 1)/Pe, \quad (14.28)$$

т.е. смещение пика концентрационной кривой относительно точки $t_o = \pi r^2 n q$ может быть заметным при $Pe < 10$.

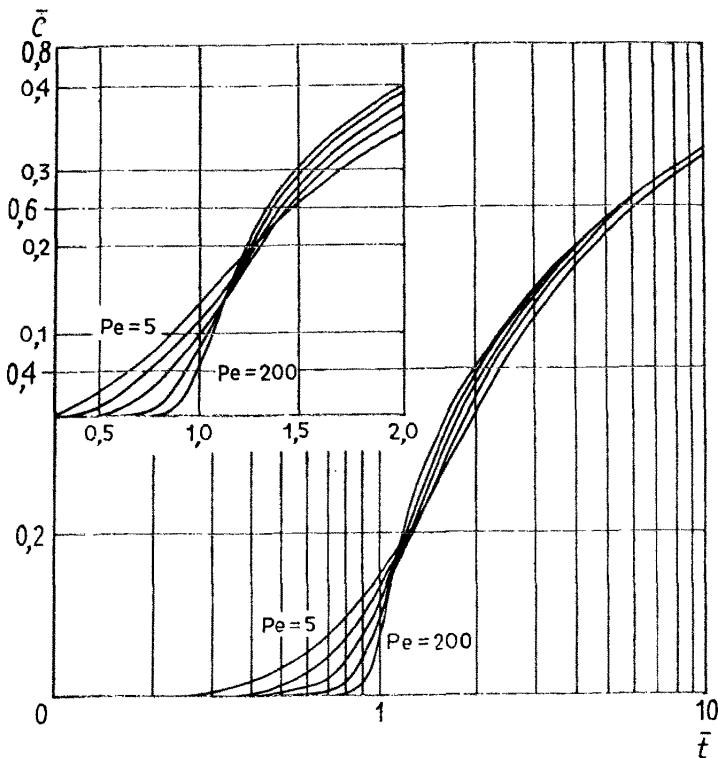


Рис. 14.7. График зависимости $c/c_0 = f(t/t_o, Pe)$ при $Pe = 5, 10, 20, 50, 200$

Дополнительная асимметрия выходной кривой, смещающая результаты интерпретации таких опытов, может быть связана с оттоком вещества в трещины, ориентированные примерно перпендикулярно направлению скорости фильтрации; однако, учет этого обстоятельства на практике мало реален. Кроме того, запуски индикатора в наблюдательную скважину, когда меченное тело имеет форму кольца, могут давать при малой дисперсии два концентрационных «пика»; естественно, стандартное решение для импульсного запуска будет давать завышенное значение

ние пористости и резко ошибочные значения дисперсивности.

Данная схема опыта рекомендуется иногда для оценки размеров пор (раскрытия трещин) b . В связи с этим полезно предостеречь от отождествления расчетных значений b_n , получаемых из фильтрационных построений, с одной стороны, и по запускам трассера (b_t) с другой: обычно $b_n \ll b_t$ (разд. 18.1.3), хотя при пересечении откачивающей скважиной крупной трещины, не вскрытой наблюдательной скважиной, возможно и обратное соотношение.

14.2.4. Односкважинный эксперимент

Соответствующая задача микродисперсии, отвечающая случаю закачки индикатора в пласт с последующей его откачкой, исследовалась в работах [1, 19], где приведены ее приближенные решения. Так, в соответствии с работой [19], выходная кривая, получаемая в процессе откачки индикатора из пласта, описывается формулой:

$$\bar{c}^* = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\xi), \quad \xi = \frac{\bar{t} - 1}{\sqrt{(16/(3 Pe^*)) \Psi(\bar{t})}}, \quad (14.29)$$

где $\bar{t} = t/t^*$, $Pe^* = r^*/\delta_L = \frac{\sqrt{Q} t^*/\pi m n}{\delta_L}$, t^* — период нагнетания, по прошествии которого сразу же начинается откачка; $\Psi(\bar{t}) = 2 - (1 - \bar{t}) \sqrt{1 - \bar{t}}$, причем $\Psi(\bar{t}) \approx 1 + \bar{t}$ при $0 < \bar{t} < 2,5$.

Если в трещиноватых породах одновременно с инертным индикатором применяется сорбируемый компонент с известным (из лабораторных опытов) коэффициентом сорбционного распределения на поверхности трещин K_a (разд. 5.2.1.1), то для интерпретации соответствующей выходной кривой в решении (14.29) следует заменить безразмерный комплекс Pe на величину:

$$Pe_{\Delta}^* = \frac{r_{\Delta}^*}{\delta_L} = \frac{1}{\delta_L} \sqrt{\frac{Q t^*}{\pi (n + \Delta n) m}}, \quad \Delta n = K_a S_b \quad (14.29a)$$

(S_b — удельная поверхность трещин). Таким образом, сорбция приводит к дополнительному вы полаживанию выходной кривой. Сопоставляя значения безразмерных параметров Pe^* и Pe_{Δ}^* , легко найти соотношение $K_a S_b / n$, полезное для последующей оценки значения S_b при известных K_a и n .

Наконец, решение (14.29) может быть трансформировано на случай реактивного (сорбируемого) трассера, когда коэффициенты линейной сорбции и десорбции различаются. В этом варианте:

$$\xi = \frac{\Phi t - 1}{\sqrt{(16/(3 Pe^*)) \Psi(t)}}, \quad (14.30)$$

где $\Phi = \Delta n / t^*$, $\Delta n = \frac{n + \Delta n_1}{n + \Delta n_2}$, $Pe^* = \frac{\sqrt{Q t^* / \pi m} (n + \Delta n_1)}{\delta_L}$, Δn_1 и Δn_2 — дополнительная сорбционная емкость пород при адсорбции и десорбции, контролируемая параметрами K_{a1} и K_{a2} .

14.2.5. Импульсный запуск индикатора в естественном фильтрационном потоке

Традиционно для интерпретации опыта используется следующее решение:

$$c = \frac{M}{m v x t} \cdot \frac{Pe}{4 \pi \sqrt{\delta_y / \delta_x}} \exp \left\{ \frac{Pe}{2} \left[1 - \frac{1}{\tau} \left(1 + \frac{\delta_x y^2}{\delta_y x^2} \right) - \frac{\tau}{2} \right] \right\}, \quad (14.31)$$

где $\tau = v_e t / x n$, $Pe = x / \delta_x$, v_e — известная скорость одномерного фильтрационного потока.

14.3. Частные решения для макротерогенных пород

14.3.1. О расчетных схемах для опытов в комплексах стратифицированных пород*

В случае детерминированной модели слоистого пласта может использоваться расчетная схема послойного переноса, т.е. справедливы решения, приведенные в разд. 14.2 (конечно, если имеющаяся информация позволит ими воспользоваться). В случаях, когда интерпретация ориентируется на стохастическую модель суммарно опробуемого слоистого пласта, реально возможны лишь усредненные оценки, строящиеся опять-таки на решениях для квазиоднородных пластов. Здесь следует специально отметить возможность использования выходной кривой для оценки коэффициента профильной вариации проницаемости $W_k = \sigma_k/k$ в опытах с солевыми индикаторами (в режиме послойного переноса) и характерного масштаба ковариационной функции проницаемости l_z при тепловом воздействии на пласт (в асимптотическом режиме). Найденные таким способом значения W_k и l_z позволяют подойти к оценке коэффициента макродисперсии (см. зависимости (3.19) и (3.20)) для асимптотических прогнозных моделей.

При интерпретации опытов в таком многослойном пласте по схеме с наливом солевого индикатора может использоваться решение уравнения плоскорадиального массопереноса (14.1) при $W_s = 0$ с расчетным коэффициентом макродисперсии $D_r = W_k^2 v_r^2 t / n$, где ($v_r = q / 2\pi r$). Это уравнение можно представить в форме (14.20), где

* Напомним, что для терригенных пористых пород характерные колебания фильтрационных параметров по мощности пласта, как правило, многократно превышают их изменчивость в плане — в пределах области индикаторного воздействия на пласт.

$D = W_k^2 q^2 t / n$; решение для усредненной по мощности пласта концентрации имеет вид [10]:

$$\bar{c} = \operatorname{erfc} \left(\frac{1 - t_r}{\sqrt{2} W_k t_r} \right) [2 - \operatorname{erfc} (1/\sqrt{2} W_k)]^{-1}, \quad (14.32)$$

где $t_r = qt/\pi r^2 n$. При $W_k < 0,5$ с погрешностью не более 4% решение (14.32) переходит в формулу:

$$\bar{c} \approx 0,5 \operatorname{erfc} \left(\frac{1 - t_r}{\sqrt{2} W_k t_r} \right). \quad (14.32a)$$

Расчетные зависимости для обработки дуплетного опыта в статистических стратифицированных средах могут быть получены из обобщенной формулы (14.15), в которой подинтегральная функция $\bar{c}(t, t_o)$ определяется решением (14.26) при $\sigma \approx W_k^2 t t_o / 2$. Графики зависимости относительной концентрации индикатора в откачивающей скважине \bar{c} от $\bar{t} = qt/\pi r^2 n$ и W_k приведены на рис. 14.8.

Выходная кривая опыта при импульсном запуске индикатора в наблюдательную скважину описывается решением [39]:

$$c = \frac{M}{2 \pi m n r^2 \sqrt{(\pi W_k^2 / 3) \Psi(t_r)}} \cdot \exp \left[-\frac{(1 - t_r)^2}{\frac{4 W_k^2}{3} \Psi(t_r)} \right], \quad (14.33)$$

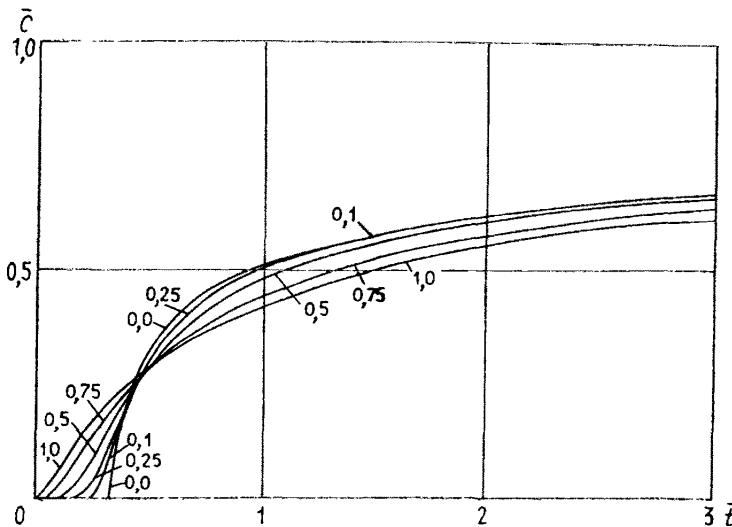


Рис. 14.8. Типовые кривые для интерпретации дуплетного опробования стратифицированного пласта в режиме послойного переноса; цифры кривых - значения параметра $W'_k = \sqrt{2} W_k$

где $t_r = qt / \pi r^2 n$, W_k — коэффициент вариации проницаемости,

$$\Psi(t_r) = 2 [1 - (1 - t_r) |1 - t_r|]^{1/2} - \frac{3}{2} [1 - (1 - t_r)^2], \quad (14.33a)$$

причем в диапазоне значений $0 < t_r < 1,2$ $\Psi(t_r) \approx 1/2$; при $t_r > 1,2 \div 1,5$ функция $\Psi(t_r)$ возрастающая, резко нелинейная, стремящаяся в пределе к $\frac{3}{2} t_r^2$. Последнее обстоятельство определяет пониженные скорости «спада» концент-

рации после фиксации в откачивающей скважине пиковых значений — так называемые «хвостовые» эффекты.

В основу интерпретации опытов при наливе теплового индикатора может быть положено фундаментальное решение для плоскопараллельной фильтрации (2.11), которое дает (при квадратической зависимости коэффициента гидродисперсии от скорости фильтрации) результаты, формально идентичные точному решению осесимметричной задачи [13]. Для этого достаточно заменить линейную координату x на радиальную r , скорость v — на эффективное значение $v_3 = q/\pi r$, пористость n — на коэффициент тепловой емкости n_m , а коэффициент гидродисперсии D — на коэффициент макродисперсии $D = (W_k^2 l_z n_t / 3a_t) v_3^2$ (где a_t — коэффициент температуропроводности пласта). Таким образом, определяется характерный масштаб l_z .

Во всех случаях полезно использовать данные о послойных расходах (Q_i) потока, если таковые имеются и не выявлено заметного влияния вертикальной составляющей скорости: при этом для суммарного опробования слоев предпочтительнее вводить средневзвешенное по расходам Q_i значение концентрации:

$$\bar{c} = \frac{1}{Q_o} \int_o^m Q(z) c(z) dz = \frac{1}{T_o} \int_o^m K(z) c(z) dz. \quad (14.34)$$

Вместе с тем, приходится еще раз напомнить, что на практике модели слоистого пласта часто не отвечают реальной геологической ситуации, и лучшие результаты дают, как правило, расчетные схемы, осредненные по мощности пласта (не имеющего выдержаных относительно водоупорных прослоев в пределах опробуемого интервала).

14.3.2. Решения радиальных задач переноса в пласте гетерогенных трещиновато-пористых пород

Приводимые далее решения пренебрегают конвективным переносом в пористых блоках по сравнению с диффузионным, что при реальном ограниченном времени опытов и не слишком больших градиентах фильтрации вполне допустимо (разд. 3.2.1).

По отношению к солевому индикатору* емкость пористых блоков можно считать неограниченной в течение длительного времени, обычно значительно превосходящего характерное время опытов. При тепловом воздействии на пласт режим теплопереноса в блоках довольно быстро оказывается квазистационарным и справедлива расчетная схема сосредоточенной емкости. Эта схема может считаться основной и в широком круге прогнозных оценок, хотя и здесь иногда предпочтительнее схема неограниченной емкости. Весьма важно подчеркнуть, что в данном варианте гетерогенной среды, в отличие от предыдущего (см. разд. 14.3.1), совокупность миграционных параметров, описывающих массоперенос, не зависит от масштабных эффектов (естественно, при опробовании объемов, отвечающих условию сплошности среды); иначе говоря, опытными работами определяются именно те параметры, которые нужны для последующего прогноза: кинетика диффузионного обмена приводит к интенсивной дисперсии концентрационного фронта, нередко более существенной, нежели под влиянием фильтрационной неоднородности трещинного пространства. Уже один этот факт является важным доводом в пользу эффективной

* Имеются в виду эксперименты с химическими индикаторами, усваиваемыми пористыми блоками и позволяющими исследовать кинетические массообменные процессы в гетерогенных средах; для случая трассеров с пренебрежимо малыми показателями молекулярной диффузии в блоках справедливы расчетные модели для гомогенных пластов, рассмотренные в разд. 14.2.

экстраполяции получаемых в опыте результатов для прогнозирования процессов загрязнения подземных вод.

Анализ решения для случая поршневого вытеснения индикатора по трещинам. Решение радиальной задачи (14.1) при постоянной входной концентрации и $D_r = 0$ дается формулой (3.31), где для характерного времени t_o справедливо соотношение (2.3). Решение (3.31), ассоциируемое с формулой Ловерье (3.8), можно переписать и в более общем виде:

$$\bar{c} = erfc(\xi), \quad \xi = \frac{t_o}{2} \sqrt{\frac{B_m}{t - t_o}}, \quad t_o = \pi(r^2 - r_o^2) n/q. \quad (14.35)$$

Приближенная модификация решения (14.35) для средней концентрации в блоках имеет вид:

$$\bar{c}_b \approx \tau^{1/2} \bar{C} \quad (\tau = B_m t); \quad (14.36)$$

она справедлива для задних точек концентрационной волны (при $t > t_o$).

Обобщенный параметр B_m характеризует массообмен и емкостные свойства пористых блоков и трещин. Вид параметра B_m зависит от модельных представлений о структуре трещинно-блочного пространства среды.

При движении индикатора по условно изолированным друг от друга трещинам с постоянным раскрытием 2b:

$$B_m = D_m n_o / b^2, \quad (14.37)$$

где D_m — коэффициент молекулярной диффузии индикатора в пористой среде (матрице), окружающей трещины; n_o — пористость этой среды. Такое представление параметра B_m оправдано при изучении слабо дезинтегрированных (крупноблочных) трещиноватых пород, когда распространение индикатора на достаточно большие расстояния (до всех наблюдательных скважин) происходит по одной или нескольким субгоризонтальным трещинам.

Чаще реализуется ситуация, когда интенсивность диффузионного оттока вещества в пористую матрицу полностью определяется удельной поверхностью блоков S_b . В этом случае:

$$B_m = S_b^2 D_m n_o / n^2 = \lambda_m / n^2, \quad (14.38)$$

где λ_m — комплексный массообменный параметр, зависящий только от коэффициентов переноса в блоках и их удельной поверхности. В дальнейшем анализе предпочтение будет отдаваться последнему представлению параметра B_m — форме (14.38).

Другое решение уравнения (14.1) при тех же предпосылках получено нами методом моментов в обобщенной интегральной форме:

$$\bar{v}_1 = \int_0^\infty \bar{c} r dr = \frac{q}{2\pi B_m n} W(B_m t), \quad (14.39)$$

$$\text{где } W(B_m t) = 2 (B_m t / \pi)^{1/2} + e^{B_m t} \operatorname{erfc}(B_m t)^{1/2}. \quad (14.39a)$$

Из анализа этого решения могут быть установлены некоторые полезные балансовые соотношения. Так, учитывая, что характеристика \bar{v}_1 непосредственно связана с количеством вещества, находящегося в системе трещин $P_m = 2\pi n c_o \bar{v}_1$, нетрудно оценить его долю в общем объеме индикатора $P_o = q c_o t$, закачанного в пласт к расчетному моменту времени t :

$$\frac{P_t}{P_o} = \frac{W(B_m t)}{B_m t}. \quad (14.40)$$

Заметим, что при

$$B_m t = \frac{\lambda_m t}{n^2} < 0,1 \quad (B_m = \lambda_m / n^2), \quad (14.41)$$

$W(B_m t) \approx B_m t$, т.е., как следует из формулы (14.40), практически все вещество находится в трещинах. Следовательно, при выпол-

нении условия (14.41) справедлива расчетная схема микродисперсии для гомогенного пласта (см. разд. 14.2). При

$$B_m t = \frac{\lambda_m t}{n^2} > 5, \quad (14.42)$$

$W(B_m t) \approx (B_m t)^{1/2}$; $P_m/P_o \approx (B_m t)^{-1/2}$ большая часть инъецируемого в пласт индикатора в этом случае идет на насыщение пористой матрицы и, следовательно, емкость трещин практически не контролирует процесс (за исключением передовой зоны концентрационной волны, характеризующейся значениями $\bar{c} < 0,15-0,2$).

Применяя принцип суперпозиции, можно получить решения для пакетного запуска продолжительностью t_n ; так, на основе зависимости (14.36) получим, что при $t > t_o + t_n$

$$c = \operatorname{erfc} \left[\frac{t_o B_m^{1/2}}{2(t - t_o)^{1/2}} \right] - \operatorname{erfc} \left[\frac{t_o B_m^{1/2}}{2(t - t_o - t_n)^{1/2}} \right]. \quad (14.43)$$

Исследование влияния гидродисперсии по трещинам. Допущение о поршневом движении индикатора в трещинах может оказаться слишком грубым для опытов с нагнетанием трассеров, когда вблизи центральной скважины создается поле повышенных и резко изменяющихся скоростей фильтрации. Влияние гидродисперсии по трещинам может быть эффективно учтено при интегральном представлении решения в форме (3.50): производная $\partial c' / \partial \Theta$ в подинтегральном выражении определяется из решения соответствующей задачи плоскорадиальной микродисперсии в эквивалентном гомогенном пласте (см. разд. 14.2.1).

Так, применение формулы Н.Н.Веригина [3], как достаточно представительной для трещиноватых сред с высокими гидродисперсионными параметрами, приводит к решению вида:

$$\bar{c}' = \frac{1}{\Gamma(Pe/2)} \int_0^t e^{-z} z^{Pe/2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\lambda_m^{1/2} \Theta}{2n(t - \Theta)^{1/2}} \right] \frac{\partial \Theta}{\Theta}, \quad (14.44)$$

где $z = \text{Pe}/2\Theta_r$; $\Theta_r = q\Theta/\pi r^2 n$. Область применения решения (14.44) ограничивается условием $\text{Pe} > 3$.

Зададимся характерными для опытно-миграционных работ условиями (рис. 14.9); варианты выполненных расчетов отвечают различным значениям комплексного массообменного параметра блоков λ_m , принятый интервал изменений для которого охватывает среды с относительно высокими ($N \cdot 10^{-2}$ сут⁻¹) и низкими ($N \cdot 10^{-5}$ сут⁻¹) показателями поглощения вещества. Анализ полученных результатов показывает, что вклады разнородных механизмов миграции в общий процесс индикаторного рассеяния определяются соотношением параметров λ_m и δ_L и зависит, при прочих равных условиях, от расстояния r до точки наблюдения. Подчиненная роль гидродисперсии в средах с высокими поглощающими характеристиками и слабая выраженность кинетических обменных процессов в средах с низкими показателями поглощения оправдывают применение — в качестве аппроксимационных — более простых предельных решений (14.35) и (14.21) — соответственно, для гетерогенной и гомогенной моделей трещиноватого пласта. Вместе с тем, для промежуточных вариантов значимость различных процессов может оказаться примерно сопоставимой; тогда совместное их наложение приводит к весьма неопределенной интерпретации опытных результатов в рамках упрощенных расчетных схем (см. разд. 15.3), погрешностям в определении миграционных параметров. Так, при низких значениях массообменных параметров, в результате недостаточного учета гидродисперсии по трещинам, относительные погрешности расчета концентрации по решению (14.35) могут достигать десятков, а при малых (менее 0,15–0,2) значениях $\bar{\epsilon}$ — даже сотен процентов. Соответственно, погрешности в оценке λ_m могут также изменяться сотнями процентов; несколько ниже уровень погрешностей для трещиноватости n , но поведение функции погрешности весьма сложно: она может увеличиваться в области не только малых, но и больших концентраций (см. формулу (14.35)).

Рассмотренные выше балансовые оценки позволяют получить некоторые количественные критерии применимости предельных расчетных схем. Так, если потребовать, чтобы основная доля индикатора приходилась на блоки (см. условие (14.42), в котором время t ассоцииру-

ется с фронтом переноса — средней концентраций $\bar{c} = 0,5$ в формуле Ловерье), то получим ориентировочный критерий приемлемости предельного решения (14.35) для схемы неограниченной емкости:

$$\rho = \frac{r^2 \lambda_M}{qn} > 1, \quad (14.45)$$

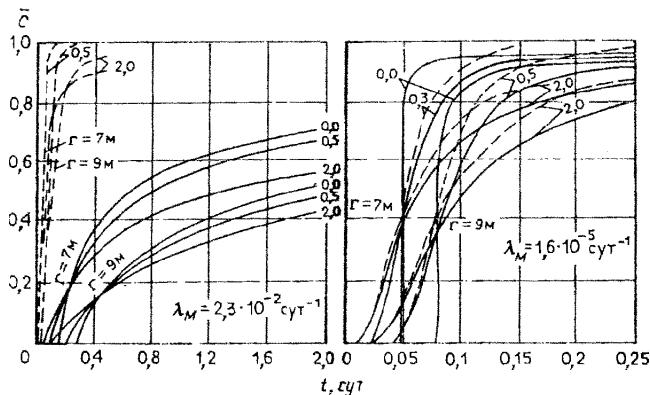


Рис. 14.9. К исследованию влияния гидродисперсии индикатора по трещинам на характер выходных кривых: графики а, б отвечают различным значениям комплексного массообменного параметра λ_M : сплошными линиями показаны расчеты по решению (14.44), пунктирными — по решению (14.21); цифры кривых — значения константы гидродисперсии δ_L ; $n = 0,01$, $q/\pi = 10 \text{ м}^2/\text{сут.}$

справедливый для концентрации $\bar{c} > 0,2-0,3$. Аналогичный комплекс ($\gamma = r^2 \lambda_M / qn$) использовался в работе [37], где говорится, что при $\gamma > 10$ происходит выравнивание концентрации вещества в трещинах и блоках изометрической формы.

Для оконтуривания области применения в трещиновато-пористых средах другой предельной расчетной схемы — микродисперсии целесообразно воспользоваться балансовой оценкой (14.41). Так как по условию диффузия в блоки должна слабо влиять на скорость переноса, то это соотношение можно записать и в другой форме, исключив время:

$$\rho = \frac{r^2 \lambda_x}{qn} < 0,03. \quad (14.46)$$

Критерии (14.45) и (14.46) можно использовать и для дуплетной схемы*, , понимая под r половину расстояния между опытными скважинами.

14.3.3. Тепловое воздействие на трещиноватый пласт

Как уже отмечалось, для теплопереноса в трещиноватых средах характерен квазистационарный режим энергообмена между трещинами и породными блоками, который учитывается в рамках расчетной схемы сосредоточенной емкости. При этом для теплового индикатора, очевидно, гораздо менее значимы эффекты продольного гидродисперсионного рассеяния по трещинам, так что допущение о поршневом вытеснении здесь оказывается достаточно строгим.

Общее операционное решение плоскорадиальной задачи при предпосылке сосредоточенной емкости блоков (3.33) для химического индикатора дается формулой (14.10), где для параметра χ справедливо соотношение

* Для относительных концентраций \bar{c} , превышающих 10-15% от максимальных в откачиваемой воде.

$\chi = \frac{\delta_L^2}{A} \left(p + \frac{\alpha_m n_o p}{n(p + \alpha_m)} \right)$; используя аналогию между процессами массо- и теплопереноса, получаем следующее решение для изображения по Лапласу функции относительной температуры $\bar{T} = (p\bar{T} - T^0) / (T_0 - T^0)$:

$$\bar{T} \approx \frac{1}{p} \exp \left\{ - \left[p + \frac{\alpha_m n_{or} p}{n(p + \alpha_r)} \right] \frac{\pi(r^2 - r_o^2)}{q} \right\}, \quad (14.47)$$

где T_o и T^0 — значения температуры соответственно при $t = 0$

и $r = r_o$.

Обращение формулы (14.47) приводит к решению:

$$\bar{T} = J(\eta, \tau), \quad (14.48)$$

где $J(\eta, \tau)$, — интегральная функция (см. рис. 3.4а), определяемая выражением (3.11):

$$\eta = \frac{\pi \alpha_r C_b (r^2 - r_o^2)}{q C_f^o}; \quad \tau = \alpha_r \left[t - \pi (r^2 - r_o^2) n / q \right]. \quad (14.49)$$

В работе [10] получена аппроксимация решения (14.49):

$$\bar{T} = 0,5 \operatorname{erfc}(\xi), \quad (14.50)$$

где $\xi = -A \ln \left[0,5 \left(\frac{\tau}{\eta} + 1 \right) \right] - B$, а константы A и B зависят только от безразмерного комплекса η (рис. 14.10). Формула (14.50) дает расхождение с точным решением (14.48) не более чем на 5% при $\eta > 2$.

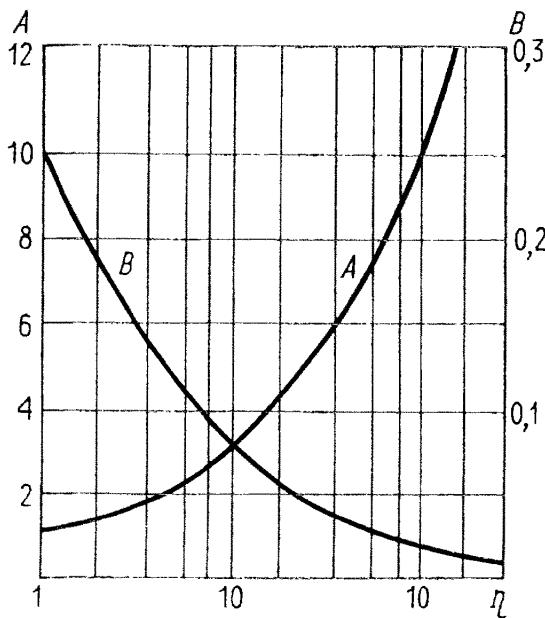


Рис. 14.10. Зависимость констант A и B в уравнении (14.50) от безразмерного комплекса η .

Соответствующее решение при «пакетном» запуске в течение времени t_n можно получить исходя из принципа суперпозиции:

$$\bar{T} = J(\eta, \tau) - J(\eta, \tau - \tau_n), \quad (14.51)$$

где $\tau_n = \alpha_t t_n$; $t > t_o + t_n$

При интерпретации опытных результатов может оказаться полезным и решение, записанное относительно средней температуры блоков:

$$\bar{T}_b = J'(\eta, \tau); \quad (14.52)$$

графики интегральной функции $J'(\eta, \tau) = 1 - J(\tau, \eta)$, приведены на рис. 3.4б.

Разница между температурой воды в трещинах и средней температурой породных блоков составляет:

$$\Delta\bar{T} = e^{-\eta-\tau} I_o(2\sqrt{\eta\tau}) \approx [\tau/(1+\tau)] \bar{T}$$

где $I_o(z)$ — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка. Так как при η и $\tau > 3$ для формулы (14.53) существует асимптотическое представление, решение (14.52) можно записать в виде:

$$\bar{T}_b = \bar{T} - e^{-(\tau^{1/2} - \eta^{1/2})^2} [2(\pi^2 \eta \tau)^{1/2}]^{-1}, \quad (14.53)$$

т.е. при τ и $\eta > 10$ различие в температурах трещин и блоков не превышает 10%. В этом случае для интерпретации опытных результатов могут использоваться решения для квазигомогенных сред, в частности обобщенная формула (14.21), в которой необходимо положить $\bar{\sigma} = T$, $\mu = qC_f^o/\pi^2 C_b^o$ и $\sigma = q^2 C_f^o/\pi^2 \alpha_t C_b^o r^4$.

При больших различиях в температурах закачиваемой и пластовой вод, приходится считаться с искажающим влиянием плотностной конвекции.

Так, при закачке теплой воды в безнапорный горизонт скорость ее всплытия составляет

$$v_{gz} = \frac{K_o \rho_o g}{R \mu(T)} \left[\frac{\rho(T)}{\rho_o} - 1 \right], \quad (14.55)$$

где T — температура, R — коэффициент задержки ($R \approx 1,9$), K_o — проницаемость, $\mu(T)$ — вязкость, $\rho(T)$ и ρ_o — плотности закачиваемой и пластовой воды.

Тепловой трассер гораздо слабее реагирует на проявления фильтрационной анизотропии — тем меньше, чем меньше скорость, т.е. он распространяется более равномерно по разным направлениям.

14.3.4. Представление решений для дуплетного опробования

Расчетные формулы могут быть получены из обобщенных решений (3.47) и (3.48), отвечающих схемам неограниченной и сосредоточенной емкости.* Концентрация в откачивающей скважине находится путем усреднения по всем линиям тока в соответствии с интегральным решением (14.15), где характерное время $t_o(y)$ находится из условия (14.13); при численном интегрировании необходимо учитывать, что для $t < t_o$ $\bar{c}(t, t_o) = 0$. Для теплового индикатора имеет смысл рассматривать расчетную схему сосредоточенной емкости, при этом в базисном решении (3.48) функция концентрации $\bar{c}(t, t_o)$ заменяется температурной функцией $\bar{T}(t, t_o)$, а «массовые» параметры — их теплофизическими аналогами.

Для интерпретации опытов целесообразно использовать типовые графики (рис. 14.11 и 14.12). Первый из них, отвечающий расчетной схеме неограниченной емкости для химического индикатора (усваиваемого пористыми блоками), зависит от безразмерных комплексов

$$\bar{\lambda} = B_m t_o = \frac{\lambda_m t_o}{n^2}, \quad t = \frac{\tau}{t_o} \quad \left(t_o = \frac{\pi r^2 m n}{3Q} \right). \quad (14.56)$$

При $\bar{\lambda} \rightarrow 0$ (пласт сложен блоками с весьма низкими массообменными параметрами) кривая графика отвечает решению (14.16) для схемы поршневого вытеснения в гомогенной среде.

При $\bar{\lambda} = B_m t_o > 0,3-0,4$, что отвечает широкому кругу экспериментов с солевыми трассерами в гетерогенных

* Здесь во всех вариантах гидродисперсией индикатора по трещинами пренебрегаем, вследствие чего для малых концентраций порядка $c < (0,1-0,15) c_{\max}$ (где c_{\max} — максимальная концентрация в откачиваемой воде) решения имеют невысокую точность.

средах с высокими массообменными характеристиками, расчетные кривые в интервале $0,1 < c_c \leq 0,5$ достаточно хорошо аппроксимируются логарифмической зависимостью [7, 33]:

$$\bar{c} \approx -0,5 \lg(\xi), \quad \xi = \frac{t_o}{2} \sqrt{\frac{B_m}{t - t_o}} \quad t_o = \frac{\pi r^2 m n}{3 Q}. \quad (14.57)$$

При этом достигается вполне надежная оценка параметра B_m (λ_m); наоборот, чувствительность выходной кривой по отношению к активной трещиноватости n становится крайне низкой.

Расчетные кривые для схемы сосредоточенной емкости при тепловом воздействии на трещиноватый пласт (см. рис. 14.12) зависят от безразмерных параметров $\eta = \alpha_t C_e^o r^2 / q C_f^o$; $\beta = C_f^o n / C_b^o$; $\tau = \alpha_t t$. Из них следует, что ощутимое проявление кинетики теплообменных процессов между трещинами и блоками отмечается лишь на начальных участках выходных кривых ($\bar{T}_c < 0,2-0,3$), пока $\tau < \eta$. В противном случае, а также при $\eta > 30-40$ (для всех t) коэффициент α_t практически неопределен, т.е. расчетная схема сосредоточенной емкости менее чувствительна к оценке параметров кинетического обмена; в качестве расчетных тогда можно использовать кривую $\lambda = B_m t_o = 0$ (см. рис. 14.11), положив $n \equiv n_{ot} = C_e^o / C_f^o$ и заменив концентрационную функцию на температурную. При достаточно больших значениях параметра теплообмена и (или) расстояний между скважинами (примерно при $\eta > 5$) опытные кривые нечувствительны к параметру активной трещиноватости (в качестве расчетных в этом случае можно использовать кривые $\beta = 0$).

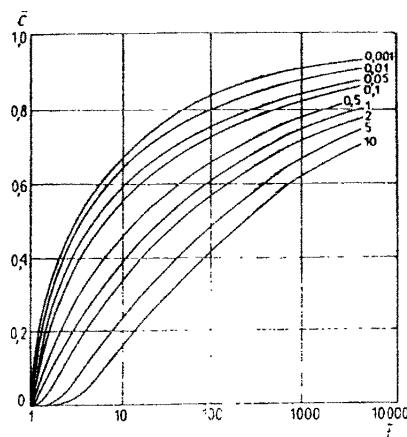


Рис. 14.11. Типовые кривые для интерпретации результатов дуплетных опробований трещиновато-пористых пластов (шифр кривых — параметр $B_m t_o = \pi r^2 m n / 3Q$)

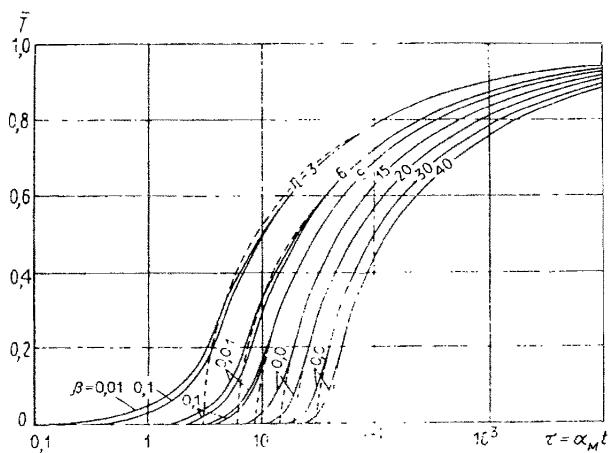


Рис. 14.12. Типовые кривые для интерпретации результатов дуплетного опробования трещиновато-пористого пласта (расчетная схема сосредоточенной емкости); шифры кривых — значения параметров \$\beta\$; пунктиром показаны кривые для схемы поршневого вытеснения без учета кинетики обменных процессов.

14.3.5. О расчетных оценках при индикаторных опытах с откачкой

Эквивалентом решения (14.27) задачи переноса в трещиновато-пористом пласте является формула:

$$c = \frac{M \sqrt{\lambda}}{4\pi r^2 m n (t_r - 1)^{3/2}} \exp \left[-\frac{\bar{\lambda}}{4(t_r - 1)} \right], \quad (14.58)$$

где $\bar{\lambda} = B_m t_o$; $t_r = Qt / \pi m n r^2$.

Достоверность интерпретации опытов на базе данного решения снижается из-за сильного проявления гидродисперсии по трещинам при импульсном входном сигнале, особенно это сказывается на точности оценки массообменного параметра. Ненадежным может оказаться и определение активной трещиноватости «n» на основе балансового соотношения для времени t_{max} регистрации пиковых концентраций, когда полагается $t_{max} = t_o = \pi r^2 n / q$. Можно показать, что в действительности положение пика максимальной концентрации на временном графике определяется соотношением:

$$t_{r, max} = 1 + \bar{\lambda} / 6, \quad (14.59)$$

или

$$t_{max} = t_o + \frac{B_m t_o^2}{6}, \quad (14.59a)$$

т.е. массообмен между трещинами и блоками увеличивает время фиксации C_{max} .

14.3.6. Решения для односкважинной схемы опробования

На выходной кривой откачки трассера из пласта находят отражение как кинетические процессы усвоения индикатора блоками — в период нагнетания t_n его в пласт (с приведенным дебитом q_n), так и отток вещества из блоков при последующей откачке (с приведенным дебитом q_o). Если $q_o/q_n \equiv \gamma > 5-10$, то отдачей индикатора из блоков в трещины при откачке можно пренебречь: в этом случае на выходной кривой происходит «представление во времени» [9] зависимости концентрации от расстояния, полученной к моменту окончания нагнетания. Соответствующая расчетная зависимость базируется поэтому на формуле (14.35) и имеет вид:

$$\bar{c} = erfc \left[\frac{\gamma t'}{2(t_n' - \gamma t')^{1/2}} \right], \quad (14.60)$$

где $t' = B_m t$; $t_n' = t'|_{t=t_n}$.

При тех же условиях для интерпретации теплового запуска может использоваться решение (14.48), в котором $\eta = \beta \gamma t'$; $\tau = t_n' - \gamma t'$ ($\beta = C_e^o/nC_f^o$; $t' = \alpha_r t$; $t_n' = t'|_{t=t_n}$).

При выполнении критерия $t_n' > \gamma t' > 15$ справедлива упрощенная формула

$$\bar{T} = 1 - 0,5 erfc \left[\frac{t_n' - \gamma t'}{2(t_n')^{1/2}} \right]. \quad (14.61)$$

При односкважинных экспериментах с выставлением индикатора (см. разд. 13.1.2) в пласте пород со слабыми массообменными свойствами можно пренебречь кинетическими процессами, протекающими в кратковременные периоды закачки и откачки. Тогда решение примет вид:

$$\bar{C}^{**} = e^{\bar{t}^{**}} \operatorname{erfc}(\sqrt{\bar{t}^{**}}); \bar{t}^{**} = B_m t^{**}, \quad (14.62)$$

где время t^{**} отсчитывается от момента завершения закачки индикатора в пласт. При $\bar{t}^{**} < 0,1$ $\bar{C}^{**} \approx 1 - 2\sqrt{\frac{\bar{t}^{**}}{\pi}}$.

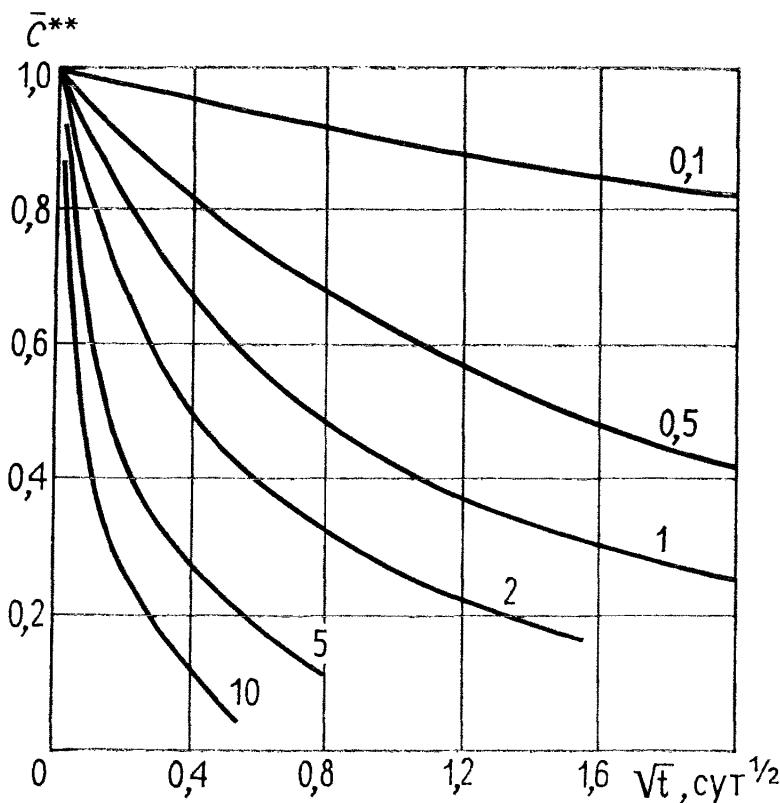


Рис. 14.13. Графики изменения концентрации вещества в трещинах в зависимости от времени t^{**} между его закачкой и откачкой; цифры кривых — отношение $\lambda_m^{1/2}/n$, сут $^{-1/2}$.

Графики функции $\bar{c}^{**} + t^{\frac{1}{2}}$ для различных значений $\sqrt{B_m}$ приведены на рис. 14.13; их характер указывает на довольно высокую чувствительность к изменениям емкостных и массообменных параметров трещиновато-пористого пласта. Правда, основной результирующий параметр (B_m) не может непосредственно использоваться в прогнозных оценках, но он является полезным контрольным показателем при независимых определениях других параметров.

Аналогично по данным теплового воздействия на пласт, рассчитывается коэффициент объемного теплообмена $a_t \approx S_b^2 a_b$. Определив независимым способом коэффициент температуропроводности блоков a_b , можно легко найти удельную их поверхность S_b .

Теперь рассмотрим возможности получения обобщенного решения, описывающего всю выходную кривую с учетом дисперсионных эффектов на стадиях закачки/откачки индикатора. Для этого достаточно предположить, что: 1) градиент концентрации на границе пористая матрица - трещины во всех точках пласта постоянен, так что падение концентрации в трещинах, начальное распределение которой описывается приближенным решением радиальной микродисперсии (14.29), пропорционально \bar{C}^{**} (14.62); 2) последующая откачка индикатора дает лишь дополнительное дисперсионное рассеяние. Таким образом, предполагая, что гидродисперсионные и массообменные процессы протекают независимо друг от друга, можно воспользоваться суперпозицией двух решений (14.29) и (14.62) для получения обобщенного приближенного представления [33]

$$\bar{c} \equiv \bar{c}[t, (t^*, t^{**})] = \bar{c}^* \cdot \bar{c}^{**}, \quad (14.63)$$

или

$$\bar{c} = \frac{1}{2} ercf \left[\frac{\bar{t}^* - 1}{\left\{ \frac{16[2 - (1 - \bar{t}^*)\sqrt{1 - \bar{t}^*}]}{3 Pe} \right\}} \right] \cdot \exp(\bar{t}^{**}) ercf(\sqrt{\bar{t}^{**}}). \quad (14.63a)$$

$(\bar{t}^{**} = \lambda_m t^{**}/n^2)$. Подтверждение корректности принятых здесь допущений получено математическим моделированием — разд. 14.6.2.

14.4. Анализ гидрохимической инерционности наблюдательных скважин

Разбавление индикатора в наблюдательной скважине и низкая пропускная способность кольматационной зоны приводят к тому, что концентрация индикатора в пласте (непосредственно на внешней стенке скважины) отличается в концентрации в скважине c_s ; период времени, в течение которого отмечается такое несоответствие, часто соизмеримо с длительностью самого опыта. Поэтому имеет смысл говорить о гидрохимической инерционности наблюдательных скважин, используемых для регистрации индикатора.

Приведем результаты миграционного опыта — налива в шурф, пройденный в трещиноватых меловых породах. Наблюдательные скважины-дублеры диаметрами 0,1 и 0,04 м были удалены от шурфа на расстояние 3,6 м. Скважина меньшего диаметра перед отбором желонировалась с таким расчетом, чтобы вода в ней обновлялась и отвечала по составу пластовой; поэтому скважину диаметром 0,05 м можно считать безинерционной. Выходные кривые изменения концентрации индикатора в скважинах при различных расходах налива приведены на рис. 14.14. Обработка кривых по решению Ловерье (14.35) дает для «инерционной» скважины завышение активной тре-

щиноватости мелов в 2 раза (по сравнению с «безынерционной» скважиной).

В математической модели опыта инерционность должна учитываться заданием уравнения баланса вещества в обводненном объеме скважины; так, при $\text{Pe} > 10-20$, когда допустимо пренебречь диффузионными составляющими массового потока через стенки пьезометра, это уравнение удобно записать в следующем одномерном виде [7]:

$$\alpha n r \frac{dc}{dt} = v_r (c - c_c), \quad (14.64)$$

где α — коэффициент инерционности, равный

$$\alpha = \frac{\pi r^2 \mu}{2 \xi r n}; \quad (14.64a)$$

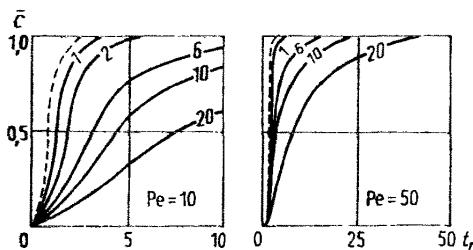
здесь ξ — коэффициент искажения потока вблизи скважины; для закольматированных скважин ξ изменяется в зависимости от состояния прискважинной зоны от 0 до 2 (при $\xi = 2$ — скважина без скин-эффекта).

Отсюда следует, что если известно решение для концентрации в пласте c , то решение для концентрации в скважине можно получить в форме:

$$C_c = b \int_0^t e^{-k(t-\tau)} c(\tau) d\tau, \quad (14.65)$$

где $b = q / (2 \pi r^2 \alpha n)$.

В гомогенных породах, когда процесс описывается моделью плоскорадиальной микродисперсии, и в частности решением (14.21), оценку значения c_c можно получить в замкнутом виде [7]. На графиках (рис. 14.15) приведены результаты расчетов для различных значений



*Рис. 14.14. К оценке влияния гидрохимической инерционности на-
блюдательной скважины на характер экспериментальных выход-
ных кривых; 1, 2 — значения относительной концентрации: 1 —
для «безинерционной», 2 — для «инерционной» скважины.*

α , характер индикаторных кривых хорошо согласуется с физическими представлениями. Так, увеличение r ведет к уменьшению скорости нарастания концентрации на внешней стенке скважины; поэтому концентрация в скважине «успевает» сравняться с пластовой, т.е. инерционность убывает. Такое же влияние оказывает увеличение пористости: происходит сближение емкостных параметров среды и скважины. Наконец, кольматация прискважинной зоны ($\xi < 2$) ведет к замедлению скорости нарастания концентрации индикатора с скважине, параметр инерционности α возрастает, что и отражается на характере выходных кривых: они выполаживаются.

В то же время, из анализа кривых следует, что пренебрежение инерционностью ведет к заметному завышению расчетных значений пористости (трещиноватости) и константы микродисперсии. Например, основываясь на методе статистических моментов [10], можно показать, что погрешности в определении активной пористости ϵ_n и константы микродисперсии ϵ_δ имеют порядок

$$\epsilon_n = \frac{n_p - n}{n} \approx \alpha; \quad \epsilon_\delta = \frac{\delta_p - \delta_L}{\delta_L} \approx 2\alpha^2 r / \delta_L, \quad (14.66)$$

где n_p и n , δ_p и δ_L — соответственно, расчетное и истинное значения пористости и константы микродисперсии.

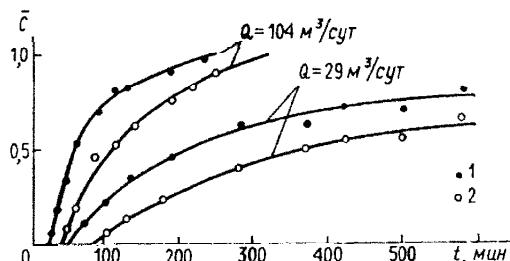


Рис. 14.15. К оценке влияния гидрохимической инерционности наблюдательных скважин на характер расчетных выходных кривых. Числа на графике — значения коэффициента инерционности α . Штриховой линией даны «безынерционные» скважины. $Re = r/\delta_L$, $t_r = qt/\pi^2 n$.

Из формул (14.66) видно, что в трещиноватых породах (здесь обычно $\alpha > 0,5-1$) инерционностью, как правило, пренебрегать нельзя: погрешности в определении параметров реально могут достигать сотен процентов. То же можно сказать и о пьезометрах с высокими ($\xi < 0,5$) значениями скин-эффекта в песчаных грунтах, причем влияние инерционности особенно велико при оценке параметра микродисперсии.

Аналогичные оценки для гетерогенного трещиновато-пористого пласта можно получить, объединив формулы (14.35) и (14.65). При этом можно показать, что в инерционной скважине происходит запаздывание наблюдаемого изменения концентрации на величину $\delta_c(\eta, \zeta)$ (рис. 14.16) по сравнению с решением (14.35)

$$\bar{c} = \bar{c}(\eta, \zeta) - \delta_c(\eta, \zeta), \quad (14.67)$$

где $\bar{c}(\eta, \zeta) = erfc(\eta/4\zeta)^{1/2}$; $\eta = \lambda_m t_o / 2an^2$; $\zeta = (t - t_o)/2at_o$.

Нетрудно убедиться, что в широком диапазоне опытных характеристик инерционность приводит к ощутимому завышению значений трещиноватости и массообменных параметров блоков. Максимальные погрешности в оценке активной трещиноватости пород с низкими массообменными свойствами могут быть найдены по первой формуле (14.66). При выполнении условия

$$\eta = \frac{\lambda_m \xi r^3}{r_n q} > 5 \quad (14.68)$$

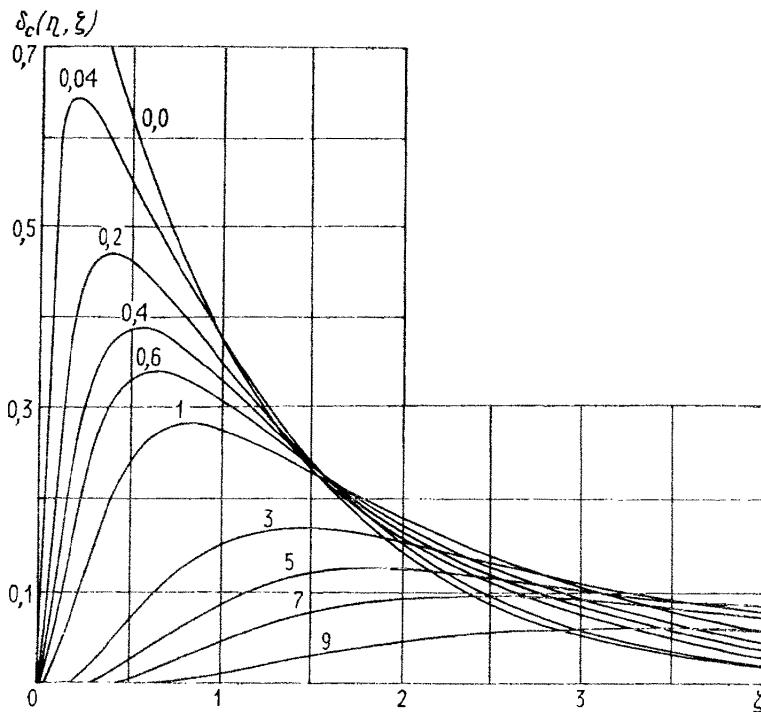


Рис. 14.16. График функции влияния скважины $\delta_c(\eta, \xi)$; цифры кривых — значения параметра η .

погрешности снижаются до 15–20%, однако лишь при использовании точек индикаторной кривой со значениями относительной концентрации $c > 0,2\text{--}0,3$. Вместе с тем, из расчетных зависимостей следует, что в отличие от опытов в скальных трещиноватых породах, влияние инерционности наблюдательных скважин при опробовании трещиновато-пористых комплексов с высокими поглощающими характеристиками блоков может заметно сглаживаться целенаправленным варьированием опытными параметрами (расходом нагнетания, расстоянием между скважинами).

Для теплового индикатора относительно большая диффузионная составляющая (в сравнении со случаем химического трассера) сводит отрицательное влияние инерционности скважин к минимуму — при дополнительном, однако, условии о несущественном различии между температурой трещин и средней температурой блоков в пункте наблюдения; в противном случае оценки получаются близкими к приведенным для случая солевого индикатора в гетерогенной среде.

14.5. Гидрохимическая инерционность запускных скважин, используемых в опытах при откачках

Представленные ранее решения для интерпретации опытов в сходящихся радиальных потоках, формируемых откачивающей скважиной, исходили из предложения об импульсном характере ввода индикатора через запускную скважину (пьезометр). В реальной ситуации трассер вымывается фильтрационным потоком из скважины постепенно, так что аппроксимация входного концентрационного сигнала функцией Дирака не всегда оправдана. Таким образом, имеет место эффект, который также может связываться с понятием гидрохимической инерционности.

ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ОПЫТНО-МИГРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЙ

В работе [39] предложена простая формула для аппроксимации данного типа граничного условия:

$$c_w(t) = \frac{M}{V_w} \exp\left(-\frac{t}{t_c}\right), \quad (14.69)$$

которая может рассматриваться в качестве решения уравнения (14.64), если положить $c_o = 0$ (концентрация трассирующего элемента в окружающей воде) и $c|_{t=0} \equiv c_o = M/V_w$ (где V_w — объем

раствора в скважине); $t_c = \frac{V_w}{Q_w} = \frac{\pi r_w^2 m}{2\zeta r_w m (Q/2\pi r_w m)} = \frac{2\alpha t_o}{\pi}$ (Q_w — объемный расход потока, проходящего транзитом через скважину, $t_o = \pi r^2 m n / Q$).

Общее решение задачи может быть представлено в интегральной форме:

$$c(t_r, \xi_i, \alpha) = \frac{\pi}{2\alpha} \int_0^{t_r} C(\tau, \xi_i) \exp\left[-\frac{\pi}{2\alpha}(t_r - \tau)\right] d\tau, \quad (14.70)$$

где функция $C(\tau, \xi_i)$ отвечает одному из известных решений, полученных для импульсного входного сигнала, например, решению (14.27) в случае эксперимента в гомогенных породах ($\xi_i \equiv Pe$), или — решению (14.58), когда опробуется трещиновато-пористый пласт ($\xi_i \equiv \lambda_m$), $t_r = t/t_o$.

Расчеты, проведенные в работе [39] для гомогенного пласта, показывают, что коэффициент α должен находиться в интервале 1–10, чтобы рассматриваемый эффект ощутимо влиял на характер выходных графиков. Такая ситуация наиболее реальна в комплексах трещиноватых пород, где значения параметра n находятся в диапазоне $10^{-3} - 10^{-4}$.

14.6. Исследование некоторых задач индикаторного опробования на математических моделях

В настоящем разделе с помощью численных методов оценивается влияние неупорядоченной фильтрационной неоднородности на точность определения миграционных параметров при двухскважинном («дуплетном») и односкважинном («налив-откачка») опробовании водоносных пластов.

14.6.1. Оценка эффективности дуплетного индикаторного опробования водоносных пластов*

Нам уже приходилось неоднократно отмечать многочисленные преимущества дуплетного опробования, которые должны особенно ярко проявляться в неоднородных и гетерогенных водоносных комплексах. Для доказательства данного положения далее используются численные эксперименты на двумерной фильтрационно-миграционной компьютерной программе ASM [25]. Параллельно, в целях сравнительных оценок, велись аналитические расчеты для однородных сред — согласно разд. 14.3.6.

Изучению подлежали два типа неоднородных (гетерогенных) сред:

- 1) сильно неоднородный по проницаемости пласт пористых пород, — коррелированно-неоднородная стохастическая среда;
- 2) трещиноватые крупноблочные породы, в которых, на фоне проницаемой «матрицы», существуют отдельные узкие зоны с резко повышенными фильтрационными характеристиками (дискретная среда с гетерогенной — двойной — проницаемостью); при этом число таких зон сравнительно невелико, что не позволяет свести моделируемую толщу к сплошной (эквивалентной пористой) среде.

Сопоставлялись два варианта опробования — 1) дуплетный и 2) с центральной нагнетательной скважиной, в поле влияния которой располагаются наблюдательные скважины.

Для моделирования дуплетного эксперимента в стохастически неоднородной среде был выбран вариант пласта с неизменными емкостными характеристиками и проводимостью, плановую изменчивость которой можно описать в рамках модели стохастически-нео-

* Раздел написан совместно с С.П.Поздняковым.

днородной среды, т.е. в виде случайного автокоррелированного поля [12], имеющего некоторые характерные масштабы корреляции по осям анизотропии и подчиняющегося известному закону распределения вероятностей. Иначе говоря, от реализации к реализации значения функции проводимости в фиксированных точках могут изменяться в широких пределах, но стохастические характеристики ее поля одинаковы для всех реализаций.

Исследование трассерного эксперимента в стохастически-неоднородной среде представляет интерес для схем мелкомасштабной и среднемасштабной неоднородности [8], когда масштаб корреляции стохастического поля проницаемости (проводимости) l_k меньше расстояния между нагнетательной и откачивающей скважинами ($2R$).

Модель мелкомасштабной неоднородности ($l_k \ll 2R$) хорошо изучена аналитически для случая слабонеоднородных полей, то есть полей, дисперсия которых относительно невелика. В частности, для широко используемого в стохастическом описании фильтрационной неоднородности логнормального закона распределения формальным верхним пределом слабой неоднородности является величина дисперсии натурального логарифма проницаемости (проводимости), равная единице ($\sigma_t^2 = 1$) [18]. Для описания процесса переноса трассера в данных условиях пригодна модель макродисперсии с параметром продольной дисперсивности пропорциональным дисперсии проницаемости и масштабу неоднородности. Для случая сильно неоднородной среды ($\sigma_t^2 > 1$) проводилось численное моделирование [38].

При этом, для заданной дисперсии поля достаточно одной реализации, так как результаты практически не зависят от расположения моделируемых скважин по отношению к элементам неоднородности поля, — в данном случае теоретико-вероятностное осреднение результатов эксперимента эквивалентно физическому осреднению процесса, происходящему при движении трассера через элементы неоднородности. Получаемая выходная кривая в откачивающей скважине инвариантна по отношению к расположению скважин в поле параметра, a , следовательно, расчетные параметры рассеивания приобретают физическое содержание.

С позиций полевого опробования наиболее интересным является случай среднемасштабной неоднородности, когда характерный размер неоднородности соизмерим с расстоянием между скважинами. В таких условиях результаты эксперимента не являются инвариант-

ными по отношению к расположению скважин, а выходные кривые для разных реализаций поля при одной и той же его дисперсии могут существенно отличаться друг от друга; об осредненной выходной кривой можно говорить лишь в рамках ансамбля реализаций, то есть осреднение процесса возможно только в теоретико-вероятностном смысле. При этом, в условиях полевого эксперимента не приходится рассчитывать на представительный ансамбль реализаций: в лучшем случае можно надеяться на проведение нескольких опытов.

Итак, целью настоящего раздела является оценка устойчивости определения активной пористости по данным трассерного дуплетного опробования однородного по пористости и неоднородного по проводимости пласта для случая среднемасштабной модели неоднородности. Предполагается, что в стационарных условиях фильтрации между совершенными откачивающей и нагнетательной скважинами в последнюю непрерывно запускается индикатор с неизменной концентрацией. Перенос нейтрального индикатора-трассера осуществляется за счет конвекции и микродисперсии. Предполагается также, что вертикальное перемешивание индикатора в каждом сечении пласта происходит мгновенно.

При принятых предположениях математическое моделирование дуплетного опробования сводится к решению плановой стационарной задачи фильтрации в системе двух скважин для заданной реализации поля проводимости, а затем — нестационарной двумерной задачи массопереноса для полученного поля скоростей фильтрации.

В качестве исходных данных для опробования было принято, что дуплетный опыт производится в водоносном пласте, имеющем постоянную мощность 40 м и пористость, равную 0,004. Расстояние между откачивающей и нагнетающей скважинами равнялось 190 м. Для стохастического поля проводимости (T) была выбрана следующая модель.

Предполагалось, что преобразованная функция от проводимости φ вида $\varphi(T) = \log [(T_{\max} - T)/(T - T_{\min})]$ имеет нормальное распределение, ограниченное сверху и снизу (распределение Джонсона); в области медианных значений оно имеет вид, близкий к широко используемому при описании фильтрационной неоднородности логнормальному распределению, но, в отличие от последнего, не дает нереально малых и больших значений при имитации поля. Предполагалось, что $\varphi(T)$ имеет анизотропную экспоненциальную корреляционную функцию вида:

$$R_\varphi(x, y) = \exp(-\sqrt{x/l_x + y/l_y}), \quad (14.71)$$

где l_x и l_y — масштабы корреляции по главным осям анизотропии. Значения параметров, описывающих поле проводимости, были выбраны следующими: масштабы корреляции по осям — 30 и 90 метров; параметры распределения: $T_{min} = 0,4 \text{ м}^2/\text{сут}$, $T_{max} = 870 \text{ м}^2/\text{сут}$, математическое ожидание $\varphi = 2,73$, дисперсия φ равна 2,0, что примерно соответствует дисперсии логарифма проводимости 1,4 и среднему значению $53 \text{ м}^2/\text{сут}$. Параметры микродисперсии были приняты равными 0,005 м для продольной и 0,001 м для поперечной дисперсивности, молекулярной диффузией, распадом и сорбционной задержкой индикатора пренебрегали.

Исходя из геофильтрационных и миграционных параметров, а также расстояния между скважинами, были выбраны реальный debit дуплета $Q = 300 \text{ м}^3/\text{сут}$ (определенный характерное изменение напора в скважинах в пределах 8–15 м) и время нагнетания $t_{max} = 100$ сут., позволяющее ожидать прихода более половины массы запущенного индикатора в откачивающую скважину.

Для выбранной схемы неоднородности было сгенерировано 25 вариантов поля проводимости. Для каждого варианта моделировалось два опыта: в первом ось дуплета располагалась вдоль оси максимальной корреляции проводимости, а во втором она поворачивалась на 90 градусов.

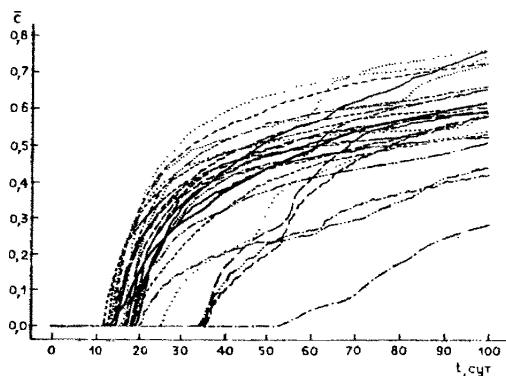
Для численного моделирования использовался программный код ASM [25], модернизированный для возможности ввода случайных полей проводимости и улучшения билинейной схемы интерполяции скоростей вблизи источников/стоков. Обоснование сетки, временно-го шага, числа частиц, используемых для просчета миграции, проводилось путем сравнения численных результатов моделирования «дуплета» в однородном пласте с аналитическим решением данной задачи для схемы конвективного переноса. В результате была выбрана следующая оптимальная схема.

Моделирование проводилось по квадратной сетке 60×60 блоков, ориентация одной из осей которой совпадает с осью дуплета, физический размер закрытой области фильтрации 960×960 метров. По два внешних с каждой стороны блока сетки имеют размер 100 м, а остальные 10 м. Временной шаг для моделирования переноса равен 0,1 сут, число частиц, используемых для расчета, равно 2000. Принятая схема дает для однородного пласта ошибки выходной кривой

концентрации в откачивающей скважине на всем временном интервале менее 1%.

В результате моделирования получено два набора по 25 выходных кривых индикатора. Как и следовало ожидать, каждая кривая имеет свой индивидуальный вид, а осредненная по реализации кривая имеет на начальном участке характерную «дисперсионную» форму (рис. 14.17). Обработка результатов эксперимента с целью определения пористости может осуществляться с использованием точечных и интегральных методов. С целью выбора расчетного времени для точечных методов необходимо оценить, как ведут себя выходные кривые со временем, т.е. дают ли они стабилизацию расчетного параметра. Для этого каждый набор выходных кривых рассматривался как совокупность трехмерных данных (время, концентрация, вероятность прихода индикатора с данной концентрацией) и вычислялись накопленные вероятности прихода трассера заданной концентрации от времени. Очевидно, что если построить карту изолиний концентрации в координатах вероятность (P) — время (рис. 14.18), то уклон изолиний в области $P = 0,5$ характеризует разброс получаемого параметра: теоретически, для однородной среды изолинии параллельны оси ординат, так как в каждом опыте заданная концентрация трассера приходит в одно и то же время. Из рисунка видно, что с увеличением концентраций наклон изолиний падает, то есть увеличивается дисперсия оцениваемой пористости. Вместе с тем, начальные выходные концентрации отвечают лишь очень малой доле трассера от его суммарного объема, закачанного в нагнетательную скважину, что, само по себе, снижает надежность интерпретации.

В связи с вышеизложенным, для интерпретации модельных экспериментов использованы 3 варианта: 1) по времени первого поступления индикатора t_o ; 2) по времени, отвечающему $c = 0,5(t_{cp})$ и 3) подбор пористости путем нелинейной оптимизации кривой накопленного объема индикатора в течение откачки.

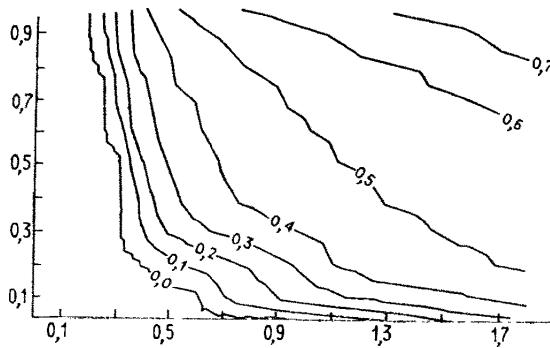


*Рис. 14.17. Выходные кривые безразмерной концентрации в отка-
чивающей скважине (ось дуплета вдоль оси максимальной
корреляции проводимости):*

Ось X: время от начала опыта в сутках

Ось Y: безразмерная концентрация.

Жирная сплошная кривая — осредненная концентрационная
кривая.



*Рис. 14.18. Вероятность прихода трассера заданной концентрации
как функция времени:*

Ось X: безразмерное время от начала опыта в сутках

Ось Y: кумулятивная вероятность.

Цифры у кривых — значения безразмерной концентрации.

Результаты расчетов приведены в таблице 14.1*.

Таблица 14.1

| | Ось дуплета вдоль оси наибольшей корреляции проводимости | Ось дуплета поперек оси наибольшей корреляции проводимости |
|---|--|--|
| Нормализованное среднее по 25 опытам значение n_p/n ($n = 0,004$) | 0,70 | 1,04 |
| | 0,74 | 0,95 |
| | 0,90 | 1,03 |
| Стандартное отклонение | 0,26 | 0,50 |
| | 0,23 | 0,17 |
| | 0,34 | 0,32 |

В связи с ограниченным объемом выборки с одной лишь реализацией дисперсии проводимости, данные результаты не могут рассматриваться как достаточно общие. Важно, однако, что, несмотря на высокое значение дисперсии проводимости, полученная расчетная величина пористости оказалась сравнительно устойчивой.

Для схемы одиночной закачивающей скважины полного объема моделирования для всех генерированных полей не проводилось. Однако, несколько проведенных расчетов показали несоизмеримо менее стабильную величину расчетной пористости, причем ее вариации росли с удалением точки наблюдения от точки нагнетания. Это связано с тем, что по мере закачки, тело трассера все более адаптируется к неоднородности и из изометрического на начальной стадии приобретает все более неправильную форму. Вариация же значений пористости, определенных исходя из цилиндрической формы трассера, пропорциональна квадрату отклонений его реальной формы от цилиндрической.

* Верхнее значение для варианта первого поступления индикатора, среднее — для выходной концентрации $c = 0,5$, нижнее — для интегрального метода.

**ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ОПЫТНО-МИГРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЙ**

Рассмотрим теперь результаты моделирования дуплетных экспериментов для условий трещиноватых пород, характеризующихся наличием вертикальных зон дробления или иных сравнительно узколокальных зон с повышенной проницаемостью, далее условно именуемых «макротрещинами».

Моделируемое поле разбито двумерной сеткой из 60×60 блоков (рис. 14.19) с базовой (условно говоря, матричной) проводимостью $T = 0,001 \text{ м}^2/\text{сек}$ и проводимостью «макротрещин» $T_{\text{тр}} = 0,1 \text{ м}^2/\text{сек}$. Пьезопроводность постоянна и принята равной $1 \text{ м}^2/\text{сек}$, мощность равна 10 м. Расход скважин $Q = 0,01 \text{ м}^3/\text{сек}$; в случае «дуплетной» схемы они располагаются в блоках (20, 20) и (40, 40), а в варианте одной центральной (нагнетательной) скважины, последняя приурочена к блоку (30, 30). Миграционные параметры: активная трещиноватость повсеместно равна $n = 0,001$; параметр продольной гидродисперсии δ_L менялся в пределах от $\delta_L = 0,05 \text{ м}$ до $\delta_L = 1 \text{ м}$, а параметр поперечной дисперсии δ_T — от $\delta_T = 0,01$ до $\delta_T = 0,05 \text{ м}$; коэффициент молекулярной диффузии $D_m = 2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{сек}$ (в рассматриваемом варианте трещиноватых пород — величина пренебрежимо малая).

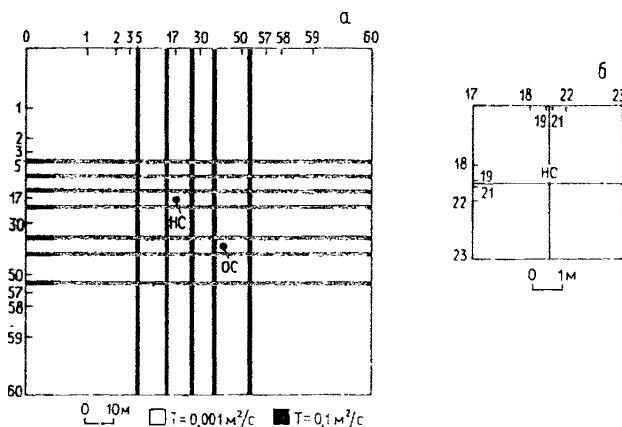


Рис. 14.19. Схема моделирования крупноблочной трещиноватой среды: а) разбиение модели в целом, б) детализация разбиения вблизи скважин (числа вдоль осей отвечают расчетным сечениям; РС и ОС — нагнетающая и откачивающая скважины).

В исходных вариантах опробования возмущающие скважины находились в пределах относительно менее проницаемых блоков, т.е. не вскрывали «макротрещин». В дальнейшем проводились опыты с двумя скважинами, секущими «макротрещины», а также в смешанном варианте (одна скважина вскрывает «макротрещину», а другая приурочена к «матрице»). Прогон большого числа вариантов позволил предварительно выявить некоторые технические требования и рекомендации к работе с программой ASM:

1) возмущающие скважины желательно задавать в зонах со сравнительно постепенно (не более, чем в 4-5 раз) возрастающими размерами расчетных блоков — во избежание сильных погрешностей при построении поля напоров (понижений); впрочем, при расчетах миграции погрешности оценки напоров в скважине не играют существенной роли, если наблюдения ведутся за пределами упомянутой зоны;

2) для достаточно надежного представления поля напоров следует задавать не слишком большие допустимые пределы прекращения итерационного процесса — порядка 0,0001 м и менее на каждом временном шаге (число последних — не менее 10);

3) удаление границ модели от возмущающих скважин должно превышать в несколько раз характерный масштаб дуплетного опробования, а в случае центральной нагнетательно скважины, когда фильтрационное возмущение ведется в нестационарном режиме, удаление границ от скважины должно быть не менее $(2\text{-}3)\sqrt{a t_{\max}}$, где

t_{\max} — время возмущения;

4) до начала вычислений процесса переноса трассера и задания соответствующих расчетных условий целесообразно оценить время конвективного движения вдоль характерных траекторий фильтрации, ибо такие оценки, осуществляемые при весьма малых затратах компьютерного времени, позволяют эффективно спланировать последующие (долговременные) прогнозы миграционных экспериментов, занимающие много процессорного времени;

5) последние требуют задания большого числа расчетных частиц N — в рамках принятого в программе метода случайных блужданий — в сочетании с малым размером временного шага, удовлетворяющего известному условию Куранта (превышение этого условия в 5-10 раз допускалось нами лишь в непосредственной прискважинной зоне; на деле, вычисления велись при $N=300\text{-}1000$, причем максимальное число частиц принималось при моделировании импульсных за-

пусков, и при $\Delta t = 0,01\text{--}0,002$ сут, что требовало 100–500 временных шагов при принятом расчетном периоде $t_{max} = 1$ сут: при несоблюдении этих требований в промежуточных точках поля возникали большие осцилляции концентраций с появлением значений, существенно, иногда — в несколько раз, превышающих заданную входную величину*.

б) авторы программы ASM рекомендуют увязывать размеры сеточных блоков с параметрами дисперсивности, так, чтобы последние (δ_L и δ_T) не превышали первых (Δx и Δy), — это улучшает качество расчетов методом случайных блужданий; вместе с тем, с ростом отношения $\Delta x/\delta_L$ понижается чувствительность результатов к параметрам дисперсии, и поэтому мы старались придерживаться соотношения: $\Delta x = \Delta y \approx (1 \pm 5)\delta_L$ при $\delta_T = (0,5 \pm 0,1)\delta_L$.

Проведенные численные эксперименты позволяют прийти к следующим выводам применительно к рассмотренной крупноблочной трещиноватой среде.

Опыты с центральной нагнетательной скважиной дают практически неприемлемые результаты, что связано с подавляющей ролью миграции индикатора по «макротрешинам»: быстро достигая ближайших сильнопроницаемых зон, основная доля индикатора в последующем движется лишь в пределах «макротрешинного» пространства, так что показания наблюдательных скважин решающим образом зависят от их расположения относительно «макротрешин». При этом расчетные величины активной емкости (n) могут принимать практически любые значения, начиная от очень малых величин — по наблюдательным скважинам, пересекающим макротрешины, — до неправдоподобно больших значений — по скважинам, приуроченным к центральным частям «матричных» блоков (несмотря на то, что проницаемость последних в рассмотренных примерах была, сама по себе, весьма высокой). Результаты сильно зависят от принятых параметров дисперсии и молекулярной диффузии: с увеличением последних гетерогенное поведение среды несколько сглаживается, так что при запуске теплового трассера и при характерных для горных пород коэффициентах температуропроводности (порядка $10^{-m}/\text{сек}$) можно рассчитывать на более-менее удовлетворительное

* Правда, даже в этих условиях выходная концентрация в откачивающей скважине вела себя довольно устойчиво.

определение обобщенного параметра теплообмена или удельной поверхности блоков.

Теоретически рассуждая, результаты опробования по схеме с нагнетанием в центральную скважину можно улучшить, уменьшая расход нагнетания: в случае гетерогенно-неоднородных сред результаты миграционных экспериментов зависят от величины расхода нелинейно, так как примерно эквивалентное уменьшение скоростей переноса по наиболее проницаемым зонам сопровождается ростом относительной роли дисперсионно-диффузационного поступления вещества в относительно слабопроницаемую матрицу, т.е., в конечном счете, сглаживанием гетерогенного поведения системы. И действительно, численные эксперименты подтверждают это предположение: расчетные показатели активной пористости при значительных величинах дисперсивности ($\delta_L = 1$ м, $\delta_T = 0,5$ м) оказываются ближе к заданной на модели цифре. Однако практические возможности такого подхода часто сильно ограничиваются другим критическим фактором — влиянием естественного потока, которое для этой экспериментальной схемы вообще особенно велико (ввиду быстрого падения наведенных градиентов с удалением от скважин), а в данном случае усугубляется макротрещинами, перехватывающими индикатор на путях его возможного движения к наблюдательным скважинам. В рассматриваемом примере сильное искажающее влияние естественного потока с градиентом $I_\epsilon = 0,001$ проявилось уже на расстоянии порядка 10 м от центральной скважины, что практически исключает целесообразность проведения опробования с уменьшенным (по сравнению с заданным) расходом. Таким образом, наличие макротрещин в сочетании с естественным градиентом уже само по себе может сделать испытание по данной схеме бесполезным. Еще менее определенными оказываются опыты с запуском индикатора в естественном потоке, решающим образом зависящие от расположения точки запуска относительно макротрещин.

Наоборот, опыты с «дуплетным» кустом дают практически приемлемые результаты даже в худших вариантах расположения опытных скважин, когда обе они приурочены к «матрице»: максимальные отклонения (обычно в большую сторону) расчетной емкости от заданной не превышали 50%, — при использовании значений выходной относительной концентрации в диапазоне $c = 0,2+0,5$. Последнее требование вполне согласуется с аналитическим решением для гомогенных сред, из которого следует, что в этом диапазоне имеет место

практически линейный рост относительного объема (массы) откаченного индикатора во времени. Интерпретация по первому времени появления индикатора в откачиваемой воде (t_o) подвержена существенно большим колебаниям и дает, в целом, тем худшие результаты, чем слабее дисперсионно-диффузионные свойства пласта^{*}; однако, она также не приводит к неправдоподобным значениям активной емкости, хотя погрешности достигают сотен процентов. Примерно тот же уровень погрешностей отмечается и при кратковременных импульсных запусках; на выходной кривой при этом может фиксироваться несколько «пиковых» значений концентрации, в чем еще раз проявляется нелинейность процесса миграции в изучаемой гетерогенной среде.

Наличие промежуточных наблюдательных скважин в дупплетном кусте не приводит в данном случае к существенному улучшению миграционного (но не фильтрационного!) опыта, так как замерам по ним во многом свойственны недостатки, отмеченные для первой опытной схемы. В частности, в ряде расчетных вариантов индикатор появляется в откачивающей скважине намного раньше, чем в промежуточных наблюдательных скважинах на оси дуплета.

Влияние градиента естественного потока^{**} наиболее заметно оказывается на значениях концентрации $\bar{C} > 0,5$, что вполне понятно: рост выходной концентрации в этом диапазоне связан с привносом индикатора, прежде всего, по периферийным зонам поля возмущенных напоров. Поэтому с ростом значения естественного градиента I_e (а точнее говоря, относительной скорости $v_e = \frac{T I_e}{Q} 2R$, где $2R$ —

расстояние между скважинами дуплета) надежность интерпретации опыта по времени первого появления индикатора (t_o) относительно возрастает. Из модельных результатов следует, что ранее предложенные [6] требования к проведению опыта с позиций влияния на него естественного потока являются излишне консервативными, ибо они ориентировались на погрешности конечных концентраций. Впрочем, во всех случаях целесообразно — для ограничения этого влияния — располагать ось дуплета вдоль естественного потока (с

* Отметим, что для гомогенных однородных сред картина обратная.

** Для задания такого градиента в применяемой нами программе нами использовался блок граничных расходов (с тем, чтобы не искажать результаты моделирования введением границ I-го рода).

нагнетающей скважиной — вверх по потоку). На моделях оценивался также вариант дуплетного запуска при расходе нагнетания, равном половине расхода откачки, что практически целесообразно с учетом недостаточной приемистости нагнетательных скважин. Моделирование выявило достаточную эффективность такого подхода, причем наилучшие результаты дает интерпретация по относительной концентрации с в диапазоне от 0,1 до 0,25, что, с учетом соотношения расходов, примерно соответствует вышеприведенным рекомендациям для стандартной схемы эксперимента.

Отметим в заключение, что аналогичные результаты были получены для рассмотренного типа условий А.А. Рошалем при моделировании с помощью программы «Геософт», позволяющей вести анализ и в трехмерной постановке. Впрочем, из общих соображений понятно, что имитация на пространственных моделях не изменит принципиальную направленность выводов изложенного здесь исследования.

Проведенное исследование выявило достаточно высокую стабильность результатов дуплетного индикаторного опробования даже в условиях весьма неоднородных по фильтрационным свойствам гетерогенных горных пород, когда другие схемы индикаторных опытов дают практически нереальные результаты. Сравнительные преимущества дуплетных экспериментов проявляются особенно отчетливо с ростом неоднородности проницаемости опробуемой среды, на фоне не слишком резко выраженного доминирования в ее емкости относительно слабопроницаемых элементов. Таким образом, подтверждены и детализированы ранее сделанные практические выводы о целесообразности самого широкого привлечения дуплетных индикаторных опытов к миграционному опробованию водоносных систем.

14.6.2. О надежности интерпретации односкашинных трассерных экспериментов

Математическое моделирование использовалось здесь в двух направлениях: 1) оценка справедливости физических предпосылок, положенных в основу приближенных аналитических решений (разд. 14.3.6); 2) оценка степени влияния фильтрационной неоднородности пласта на результаты интерпретации односкашинных экспериментов в рамках идеализированных расчетных схем. Все модельные исследования выполнены с использованием программы MT3D (разд.

10.5.2 [40]; метод решения миграционной задачи — МОС. Для имитации переноса в трещиновато-пористом пласте использовалась аналогия со слоистой системой (разд. 3.2.1).

Рис. 14.20, на котором приводится сопоставление выходных кривых, полученных с помощью аналитических и численных расчетов (однородный пласт), свидетельствует о допустимости использования приближенной формулы (14.63). С физической точки зрения данный результат подтверждает возможность «расщепления» гидродисперсионной и массообменной составляющих миграционного процесса при сильных различиях во временах t и t^* — продолжительности периодов закачки/откачки и выставивания индикатора (т.е. когда $t^* > t$).

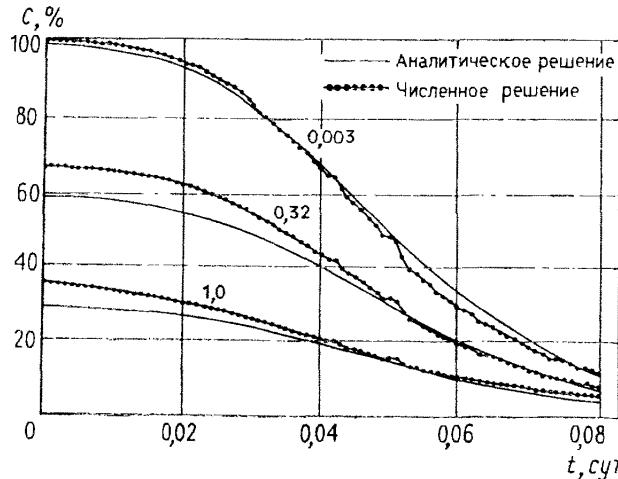


Рис. 14.20. Сравнение аналитического и численного решений для односекционной схемы индикаторного опробования пласта: $q = Q/m = 3,33 \text{ м}^2/\text{сут}$; $n = 0,003$, $\delta_L = 0,5 \text{ м}$, $t^* = 0,05 \text{ сут}$, $t^{**} = 3,0 \text{ сут}$; шифр кривых — отношение λ_M/n

Другая серия модельных экспериментов была выполнена для условий, когда скважина вскрывает сильно неоднородный в фильтрационном отношении пласт трещиновато-пористых пород — см., например, поле распределения коэффициента фильтрации на рис. 14.21. Кривые на рис. 14.22, полученные для случая неоднородного пласта, практически совпадают с кривыми модельных эксперимен-

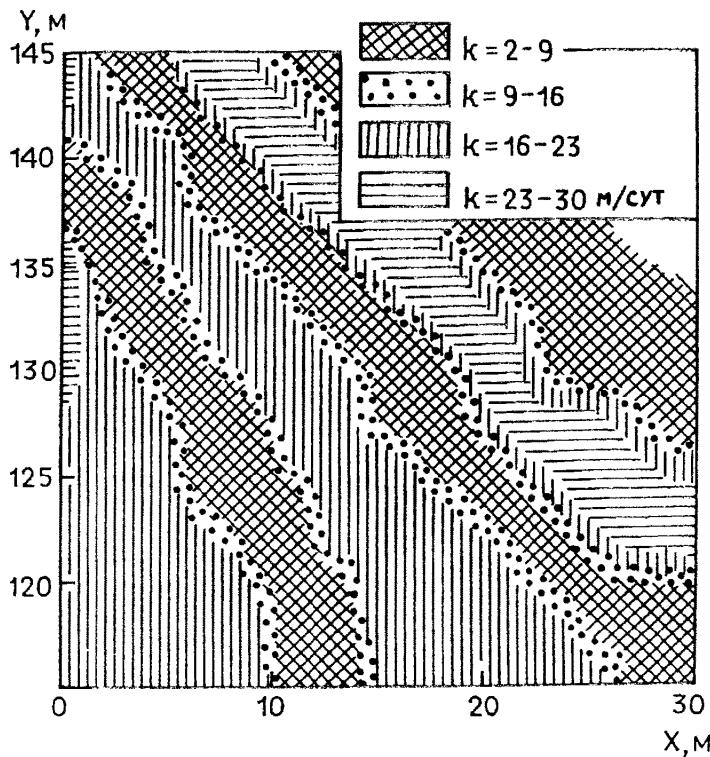


Рис. 14.21. Характер распределения зон фильтрационной неоднородности опробуемого пласта

тов в однородном пласте при тех же массообменных параметрах. Эта особенность процесса связана с тем обстоятельством, что границы раздела индикаторного раствора и пластовой жидкости, сформировавшиеся в зонах с различной проницаемостью при нагнетании, подтягиваются к эксплуатационной скважине на стадии откачки примерно одновременно, т.е. «инверсность» процесса сглаживает макродисперсионные эффекты (конечно, при условии, что гидродисперсионно-конвективный обмен между зонами пренебрежимо мал).

Наиболее серьезные ограничения на применимость односекважинного эксперимента накладывает естественный фильтрационный поток, что также удалось показать с помощью математического моделирования*.

Таким образом, данный модельный результат является прямым подтверждением слабой чувствительности односекважинного опыта к фильтрационной неоднородности, что делает его конкурентоспособным с другими схемами опробования пластов. По крайней мере, учитывая низкие трудозатраты, целесообразно совмещать односекважинные эксперименты с традиционными индикаторными опробованиями трещиновато-пористых пластов.

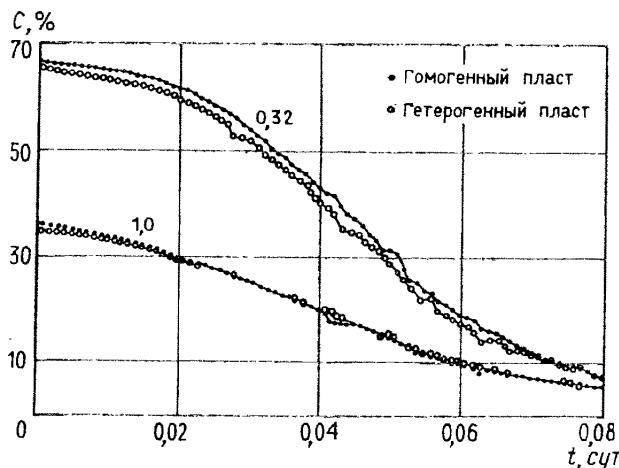


Рис. 14.22. Сравнение модельных кривых, полученных для случая опробования однородного и неоднородного пластов при одинаковых массообменных параметрах и эквивалентных опытных условиях (см. рис. 14.20)

* Lessoff S.C., Konikow L.F. Ambiguity in measuring matrix diffusion with single-well injection/recovery tracer tests. — Ground Water, 1997, v. 35, N1, p.p. 166-176.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 14

1. Алексеев В .С., Коммунар Г.М., Шержуков Б.С. Мас-соперенос в водонасыщенных горных породах. «Итоги науки и техники. Гидрогеология и инженерная геология». Москва, 1989, 144 с.
2. Алишаев М.Г. Расчет температурного поля пласта при движении жидкости для плоского фильтрационного течения. - Механика жидкости и газа, 1979, N 1, с.67-75.
3. Веригин Н. Н., Васильев С. В., Саркисян В. С., Шержуков Б. С. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород. М., Недра, 1977. 271 с.
4. Веригин Н.Н., Саркисян В. С. Откачки и нагнетания в анизотропных пластах. В кн.: Гидрогеологические исследования водозаборов подземных вод и дренажных систем. М., 1980, с. 39-44.
5. Коносавский П.К., Мироненко В. А., Румынин В. Г. Разработка и апробация моделей индикаторного опробования комплексов трещиноватых пород.- Геоэкология, 1993, N3, с. 104-124.
6. Мироненко В. А., Румынин В. Г. Опытно-миграционные работы в водоносных пластах, М., Недра, 1986, 280 с.
7. Мироненко В. А., Румынин В. Г., Учаев В. К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах (опыт гидрогеологических исследований). Л., Недра, 1980. 320 с.
8. Мироненко В. А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М., «Недра», 1978, 326 с.
9. Опытно-фильтрационные работы. Под ред. В.М.Шестакова и Д.М.Башкатова. М., Недра, 1974. 203 с.

ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ОПЫТНО-МИГРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЙ

10. Рошаль А. А. Полевые методы определения миграционных параметров. Обзор ВИЭМС, сер. «Гидрогеология и инженерная геология». 1981. 61 с.
11. Румынин В. Г. О прогрессиях индикаторных опробований водоносных пластов, обусловленных реальной трехмерностью фильтрационных потоков. «Формирование ресурсов и состава подземных вод». Записки Ленинградского горного института, 1991, Т.129, с.91-94.
12. Швидлер М.И. Стохастическая гидродинамика пористых сред. М., «Недра», 1986, 320 с.
13. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика подземных вод. М., Изд. МГУ, 1995. 368 с.
14. Шестаков В.М. К теории фильтрации растворов в грунтах. - В кн.: Вопросы формирования химического состава подземных вод. Москва, 1963, с. 192-213.
15. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. М., Наука, 1977. 342 с.
16. Bear J. Dynamics of fluids in porous media. Amer. Elsevier Publ. Comp., Inc., N Y., 1972. 764 p.
17. Frind E., Matanga G. The dual formulation of flow for contaminant transport modeling. - Water Resources Research. - 1985. - Vol. 21. - N2. - p.p. 159-169.
18. Gelhar L.G. Stochastic subsurface hydrology. «Prentice-Hall Inc.», New Jersey, 1993, 385 p.
19. GelharL.W., Collims M.A. General analysis of longitudinal dispersion in nonuniform flow. Water Resour. Res. 1971, v. 19, N1, p.p. 161-180.
20. Gringarten A.C., Sauty J.P. A theoretical study of heat extraction from aquifers with uniform regional flow. J. Geoph. Res., 1975, v. 80, N 35, p.p. 4956-4962.

21. Grove D.E., Beetem W.A. Porosity and dispersion constants calculations for a fractured carbonate aquifer using the two well tracer method.- Water Resources. Res., 1971 v.7(1), p.p. 128-134.
22. Hoopes J.A., Harleman R.F. Wastewater recharge and dispersion in porous media. - J.Hydraul. Div., 1967, v. 93, HY5, p.p. 51-71.
23. Hsieh P.A. A new formula for the analytical solution of the radial dispersion problem.- Water Resources Res., 1986, v. 22, p.p. 1597-1605.
24. Hunt B.B. Dispersive sources in uniform fround-water flow. J. Hydraulics Div., 1978, N1, p.p. 75-85.
25. Kinzelbach W., Rausch H. Aquifer Simulation Model «ASM», Documentation. 1989. Universitat Kassel, FRG, 55 p.
26. Lenda A., Zuber A. Tracer dispersion in groundwater experiments. In: Isotope Hydrology, (1970). Paper IAEA-SM-129/37, Vienna, p.p. 619-641.
27. Maloszewski P., Zuber A., Mathematical modelling of tracer behavior in short-term experiments in fissured rocks. Water Resources. Res., 1990, 26(7), p.p. 1517-1528.
28. Mironenko V. A., Rumynin V. G., Konosavsky P.K., Pozdniakov S.P., Shestakov V.M., Roshal A. A. Development of analytical and numerical models for the assessment and interpretation of hydrogeological field tests.- Summary Report (1993-1994) of Russian - American Center for Contaminant Transport Studies. Earth Sciences Div., Lawrence Berkeley National Laboratory, Iniversity of California, 1995, 93 p.
29. Moench A.F. Convergent radial dispersion: a Laplace transform solution for aquifer tracer testing. Water Resources. Res., 1989, V. 25(3), p.p. 439-447.

30. Novakovskiy K.S., Lapcevic P.A. Field measurements of radial solute transport in fractured rock. WRR v.30, 1, 1994, p.p. 37-44.
31. Proc. of the conference on geostatistical, sensitivity and uncertainty methods for ground water flow and radionuclide transport modeling, San-Francisco, 1987, Batell-Press.
32. Raimondi P. , Gardner G. H. G. , Petrick C. B. Effect of pore structure and molecular diffusion on the mixing of miscible liquids flowing in porous media. Amer. Inst. Chem. Eng. Society of petroleum Eng. Confer., 1959, Preprint 43.
33. Rumynin V.G., Mironenko V.A. Development of theoretical and technical basis for tracer tests in aquifer.- Advances in Groundwater Pollution Control and Remediation. NATO ASI Series, Kluwer Academic Publ., 1995, p.p. 173-199.
34. Rubin Y., Scang K. Investigation of flow and transport of certain cases of nonstationary conductivity field. WRR, v.30, 11, 1994, p.p. 2901-2911.
35. Sauty J.P. Identification des parametres du transport hidrodispersif dans les aquifères par interprétation de tracages en écoulement cylindrique convergent ou divergent. - J. Hydrology, 1978, v.49, 1/2, p. 69-103.
36. Siegel M.D., Leckie J.O., Phillips S.L., Kelly W.R. Development of a methodology of geochemical sensitivity analysis for performance assessment.- Proceedings of the Conference on Geostatistical, Sensitivity, and Uncertainty Methods for Ground-Water Flow and Radionuclide Transport Modeling. San-Francisco, September 15-17, 1987, p.p. 189-211.
37. Tomasko D., Reeves M., Kelley V.A., Pickens I.F. Parameter sensitivity and importance for radionuclide transport in double-porosity systems. Proceedings of the Conference on Geostatistical, Sensitivity and Uncertainty

Methods for Ground-Water Flow and Radionuclide Transport Modeling. San Francisco, September 15-17, 1987, Batell-Press, p.p. 297-321.

38. Tsang Y.W., Tsang C.F., Neretnieks I., Moreno L. Flow and tracer transport in fractured media: a variable aperture channel model and its properties.- Water Resources Research, 1988, 12, p.p. 2049-2060.

39. Welty C., Gelhar L.W. Evaluation of longitudinal dispersivity from nonuniform flow tracer tests, Journ. of Hydrology, 1994, p.p. 153; 71-102.

40. Zheng C.A. Modular 3D transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in ground-water systems., S. S. Papadopoulos and Associates, Inc., 1990, 110 p.

Важнейшим этапом опытного изучения миграционных параметров является планирование ОМО, т.е. выбор схемы куста и предварительное обоснование целесообразных опытных характеристик, таких как расход нагнетания или откачки, расстояния до наблюдательных скважин, характер индикаторного сигнала, максимальная концентрация трассера и его тип, продолжительность опыта и др. Эти показатели подбираются таким образом, чтобы в процессе опыта воспроизводилась та или иная расчетная схема, причем в оптимальном варианте она должна либо непосредственно отвечать уровню (масштабу) предполагаемых прогнозных задач, либо позволять оценить параметры, допускающие дальнейшую расчетную экстраполяцию. В то же время, применимость конкретной расчетной схемы определяется вероятностными значениями миграционных параметров; это предполагает стадийность проведения индикаторных опробований и проверку правильности расчетной схемы на основе миграционных параметров, определяемых на первых этапах опробований, а также лабораторными экспериментами и по аналогии. Подчеркнем исключительную важность тщательного планирования ОМО, без которого эти эксперименты часто практически бесполезны. Решающую роль при этом играет степень соответствия схемы ОМО фильтрационной структуре возмущенного потока и информации о ней.

15.1. Рекомендации к планированию общей схемы миграционного эксперимента и опытного куста

15.1.1. Предпосылки к выбору опытных участков и схем опробования

Опытные кусты должны располагаться в пределах представительной области пласта, где в условиях реального загрязнения фильтрующиеся стоки будут находить достаточно продолжительное время. С этих позиций при опробовании трещиноватых пород концентрация опытных точек вблизи источников загрязнения часто неоправдана: проницаемость и степень трещиноватости здесь обычно повышены ввиду нетипичного состояния пород; значения фильтрационных и миграционных параметров в таких зонах могут оказаться несвойственными водоносному горизонту в целом. С другой стороны, при наличии в пласте особых зон преимущественного переноса последние должны быть охарактеризованы опытными работами в первую очередь, в частности, не следует забывать, что такие зоны могут оказаться также выше естественного уровня подземных вод (после образования техногенных бассейнов).

Индикаторные эксперименты целесообразно приурочивать к участкам проведения кустовых откачек, максимально учитывая полученную по ним информацию при планировании ОМО (см. разд. 15.1.2). Вместе с тем, использование пьезометров фильтрационных кустов обычно не исключает необходимости бурения дополнительных наблюдательных скважин, так как расположение контрольных точек при опытных откачках ориентируется на существенно отличные критерии (см. разд. 15.3).

При опробовании неглубоко (первые десятки метров) залегающих, сравнительно равномерно трещиноватых водоносных пород, предпочтение может отдаваться экс-

периментальной схеме запуска при наливе, причем опытный куст должен включать не менее четырех-шести наблюдательных скважин, расположенных по двум лучам.* Для опробования водоносных пластов, залегающих на относительно больших (50-100 м) глубинах, эта схема малоэффективна: значительно возрастают объемы бурения, что ведет к удорожанию работ в целом, и существенно усложняются возможности для оперативного контроля за движением индикаторной метки. Более приемлемым для таких условий является дуплетное опробование. Эту же схему рекомендуется применять в крупноблочных и неравномерно-трещиноватых породах, независимо от глубин залегания. Одновременно запуск инертного и реагирующего индикаторов в дуплетном эксперименте позволяет непосредственно определить коэффициент задержки и оценить его инвариантность, увеличивая расстояния между основными скважинами дуплета и их расходы [8].

Необходимость изучения миграционных параметров трещиновато-пористых пород с низкими массообменными показателями или сорбционной емкости поверхности трещин может потребовать дополнительных экспериментов по односекважинной схеме (см. разд. 14.3.6). При больших глубинах она может оказаться единственной приемлемой и по техническим условиям; в частности, нерегулируемые отклонения забоев опытных скважин могут сильно затруднить фиксацию заданных расстояний между ними.

Во всех вариантах следует широко использовать возможности попутного индикаторного опробования при откачках на участках опытно-фильтрационных кустов, рас-

* В планово-анизотропных толщах лучи ориентируются по главным направлениям анизотропии; в прочих случаях два взаимно ортогональных луча также являются необходимой (хотя и недостаточной) гарантией качества опыта в трещиноватых породах.

сматривая запуски в наблюдательные скважины как недорогие эксперименты предварительного характера; требования к их планированию могут быть снижены.

15.1.2. Предварительное обоснование пространственно-временного масштаба опробования

Увеличение масштаба опробования (осреднения свойств) может уменьшать разрешающую способность экспериментов, но при этом их результирующая точность будет расти за счет сокращения роли масштабных эффектов, связанных, в частности, с дисперсией. Поэтому такое увеличение имеет смысл, как минимум, до достижения условий, отвечающих предпосылке сплошности среды (разд. 1.1.1).

Расстояние между скважинами, в частности, максимальное расстояние между точками ввода и отбора индикатора, должно увязываться с намеченной продолжительностью эксперимента специальными разведочными расчетами (см. разд. 15.3). Если используются уже пробуренные (например, для опытных откачек) скважины, то с помощью расчета находится требуемая длительность опыта; наоборот, для специально проходимых опытно-миграционных кустов расчетом обычно оценивается максимальный размер зоны опробования, исходя из разумной среднеоптимальной продолжительности (порядка нескольких суток) эксперимента.

Во всех этих оценках должно учитываться возможное влияние естественного потока, накладывающее ограничение на минимальные понижения уровня и/или значения опытного расхода. С другой стороны, высокие значения расходов создают форсированные режимы опыта, при которых усиливаются проявления гетерогенности (в частности, каналового механизма миграции), особенно в крупноблочных трещиноватых породах. В трещиновато-пористых образованиях слишком большие градиенты фильт-

рации усиливают возможное искажающее влияние конвекции через блочную матрицу.

Напомним еще, что фильтрационный режим в зоне миграционного возмущения должен быть близким к стационарному; в частности, конвективные потоки, обусловленные нестационарностью режима в блоковой матрице, могут оказать сильное влияние на скорость диффузационного усвоения ю трансера.

В целом, опыты должны проводиться в режимах, позволяющих охватить индикаторным воздействием достаточно представительную по масштабам область; это относится прежде всего к трещиноватым породам, что следует из особенностей макроблочного строения среды и анизотропии ее фильтрационных свойств.

При *пренебрежимо малой емкости пористых блоков* распространение индикатора характеризуется сравнительно большими скоростями, так что за несколько суток реально может быть охвачена зона радиусом в десятки, а иногда и первые сотни метров:

$$r = \left(\frac{qt_r}{\pi n} \right)^{1/2}, \quad (15.1)$$

где t_r — время прихода основной массы (несорбируемого) индикатора к скважине, удаленной на расстояние r от центральной*; q — приведенный дебит скважины; n — активная трещиноватость (ориентировочно определенная, например, по запуску трансера при проведении кустовой откачки). При опытах в естественных потоках, ориентированных на оценку параметра поперечной дисперсии, группы наблюдательных скважин должны располагаться по линиям, нормальным направлению фильтрационного потока, с отклонением до $15-20^\circ$ от него.

* При дуплетном опробовании здесь под величиной r следует понимать половину расстояния между скважинами.

При *доминирующей емкости блоков*, когда для интерпретации опыта заведомо оправдано применение решения Ловерье (14.35), уже через относительно короткое время значительная доля индикатора усваивается порами и скорость его продвижения по трещинам существенно определяется интенсивностью процессов молекулярной диффузии в блоках. Для сугубо ориентировочных оценок можно считать, что при характерной пористости 25–30% и времени, измеряемом первыми сутками, целесообразное максимальное значение r (м) имеет порядок $10\sqrt{q} m_b$ (где m_b — характерный размер блоков). Чаще всего в подобных породах с довольно высокими массообменными свойствами за указанное время охватывается зона радиусом 5–10 м, реже, при крупных размерах блоков, — первые десятки метров; при этом, однако, малые концентрации индикатора могут отмечаться и в пьезометрах, существенно удаленных от его основного фронта. Характерно, что при опробовании трещиновато-пористых комплексов время t , сильно зависит от расстояния (r) между скважинами: $t_r \sim r^4$.

Трудности выбора оптимального расположения наблюдательных скважин в этих условиях могут приводить к осложнениям противоречивого свойства. Так, при излишне большом удалении пьезометров (время t , велико) скорость переноса будет полностью определяться диффузией индикатора в блоки. Наряду с увеличением требуемой продолжительности опыта, это приведет к тому, что значения активной трещиноватости окажутся практически неопределенными; для исправления ситуации полезно в данном случае повторить опыт с индикатором, не усваиваемым блоками (например, некоторые растворимые полимеры), — если, конечно, определение упомянутого параметра имеет какой-то смысл в этих условиях.

Наоборот, при слишком близком расположении пьезометров диффузия в блоки выражена недостаточно чет-

ко, а взаимное наложение молекулярного переноса в блоки и гидродисперсии по трещинам делает опыт трудно интерпретируемым (см. разд. 14.3); в этом случае для повышения информативности опыта целесообразно повторить его с тепловым индикатором, намного интенсивнее усваиваемым блоками. Подробнее эти вопросы рассматриваются в разд. 15.3.

Во всех вариантах расстояния между скважинами (минимальные масштабы опробования r_{min}) должны удовлетворять требованиям сплошности среды; для трещиноватых пород это равносильно условию, что величина r_{min}/m_b или r_{min}/δ_L (где m_b — размер блока; δ_L — константа микродисперсии), примерно отвечающая характерным числам Пекле, имеет порядок, как минимум, нескольких десятков. В противном случае, более-менее достоверные результаты может дать лишь дуплетное опробование, особенно когда оно проводится при нескольких, последовательно возрастающих, расстояниях между скважинами дуплета.

Односкважинная схема эксперимента позволяет достаточно надежно идентифицировать обменные процессы при выполнении критерия $t^{**} > 0,1 n^2/\lambda_m$, т.е. время выставивания индикатора в пласте (t^{**}) порядка нескольких часов — десятков часов оказывается обычно достаточным.

15.1.3. Обоснование интервалов опробования и конструкций скважин

Весьма желательно, хотя и не всегда выполнимо на практике, соблюдение условия сплошности трещиноватой среды также при выборе длины опытного интервала:

число водопроводящих трещин, пересекаемых скважиной в интервале опробования, не должно быть слишком малым.* В противном случае интерпретация опытов остается весьма неопределенной и их лучше заранее ориентировать на условия, максимально приближающиеся к опытно-эксплуатационным, т.е. на длительное опробование всего водоносного комплекса или той его части, которая будет вскрываться эксплуатационными скважинами (выработками). Если это требование технически трудно выполнимо, то следует избегать объединения одним опытным интервалом нескольких зон в разрезе пласта, заметно различающихся по своим фильтрационным параметрам (здесь, например, следует учитывать характерные тенденции к уменьшению степени трещиноватости пород с глубиной, а также резко повышенную проницаемость карбонатных пород вблизи уровня грунтовых вод): вынужденное усреднение скорости фильтрации и концентрации индикатора неизбежно приведет к серьезным погрешностями при оценке активной емкости. Наиболее эффективное и целенаправленное распределение расхода нагнетаемой в пласт индикаторной жидкости по стволу скважины достигается использованием тампонов и пакеров (см. разд. 19.3).

Вместе с тем, запуски трассеров в изолированные интервалы пласта целесообразно осуществлять лишь при наличии сведений о фильтрационных свойствах пород в этих интервалах и при обеспечении опыта системой поинтервального прослеживания миграции индикатора, не требующей, к тому же, для определения его концентрации откачки значительных объемов воды. В противном случае при отборе пробы происходит дополнительное разбавление индикатора пластовой водой из зон, не охваченных

* Большая длина интервала сглаживает также влияние стохастической неоднородности (с размерами элементов неоднородности порядка десятков сантиметров и первых метров).

индикаторным возмущением. Поскольку изучаемые толщи, как правило, существенно неоднородны и анизотропны по разрезу, при интерпретации такого опыта можно столкнуться с видимым увеличением дисперсионных эффектов. Наконец, короткие интервалы опробования в пределах достаточно мощных пластов вызывают дополнительный масштабный эффект, связанный с ограниченным вертикальным размером трассерного ореола; погрешности могут вызываться также применением двумерной (или одномерной) расчетной схемы к реальной трехмерной (или двумерной) ситуации.

Особую сложность представляет выбор рабочего интервала при опробовании трещиноватых или закарстованных зон над естественными уровнями подземных вод, где он в сильной мере связан с соотношением водоприемной способности пород и расхода налива; как правило, оптимальное решение здесь удается найти только после тщательного фильтрационного опробования отдельных интервалов опытных скважин в процессе их проходки.

Во всех случаях длина опытного интервала должна превышать 1-2 м (для химического индикатора) и 5-8 м (для теплового индикатора) — в целях ограничения влияния оттока индикатора за пределы интервала. Меньшие длины целесообразны только при опробовании тонких водопроводящих зон и отдельных трещин.

При оборудовании опытных скважин должны быть максимально ограничены возможности различных случайных (не предусмотренных схемой опыта) вертикальных перетоков жидкости как в стволе скважины, так и по ее затрубному пространству — за пределами выделенного опытного интервала. С этих позиций, желательно увеличение числа участков опытных скважин, обособрленных посредством затрубной цементации или глинизации; условия проведения эксперимента можно улучшить также путем оборудования специальных секционных пьезометров (см. разд. 19.3), позволяющих устраниить перемешив-

вание воды в стволе скважины (за счет воды из нерабочей части скважины) и раздельно оценить концентрацию индикатора в каждой секции — путем прямого отбора проб или гидрогеофизическими методами.

Очень важно строго выдерживать соответствие положения рабочих интервалов возмущающих и наблюдательных скважин: ими должны вскрываться одни и те же проводящие зоны пласта. Для наблюдательных скважин важно также максимально возможное по техническим условиям эксперимента сокращение размеров ее диаметра, точнее, свободного объема, что уменьшает искажение концентрации трассера в результате эффектов его внутрискважинного разбавления. Правда, уменьшение диаметра приводит к росту интенсивности внутрискважинных перетоков, однако с их возможностью необходимо считаться в любом случае.

Как видно из сказанного, выбор и изоляция опытных интервалов часто сопряжены с большими трудностями, из-за которых неудачно проходят многие эксперименты с индикаторами, особенно в трещиноватых породах. Относительно чаще от таких неудач грантированы опыты в изолированных интервалах, вскрывающих во всех скважинах один и тот же элемент водоносной системы и ограниченных сверху и снизу выдержаными слабопроницаемыми слоями (зонами). И наоборот, при несоблюдении этих условий всегда имеется большая вероятность, что качество ОМО окажется низким и поэтому целесообразность их проведения сомнительна (особенно, если намечаемые эксперименты дорогие и трудоемкие).

15.1.4. Стохастическая интерпретация практических рекомендаций

Принципиальные требования к ОМО и ограничения на те или иные схемы их реализации могут быть достаточно четко поняты и в рамках стохастических представлений (разд. 3.3 - 3.5). Как известно [6, 9], основополагающей в этих представлениях является предпосылка об эргодичности, гарантирующей, грубо говоря, «достаточно хорошее», представительное, осреднение свойств опробуемой среды. Применительно к задачам опробования в стохастически неоднородных фильтрационных полях, необходимым условием эргодичности являются достаточно большие *поперечные* размеры опытного индикаторного ореола (b_y и b_z) в сравнении с характерными масштабами корреляции фильтрационных свойств (l_y и l_z)*; кроме того, молчаливо предполагается достаточная представительность замеров функций концентрации в пределах опытного ореола. Если же отношение b/l не превосходит некоторого минимального предела (в практическом плане — порядка 10), то результаты контролируются и абсолютными значениями b . В этой связи естественно, что в породах с разными уровнями коррелированной фильтрационной неоднородности (гетерогенности) понятие о представительном размере опытного ореола может меняться по ходу эксперимента как в большую, так и в меньшую сторону. Последний вариант особенно интересен для гетерогенных пород с ярко выраженной двойной пористостью: возрастающая в процессе эксперимента роль высокой емкости пористых блоков может постепенно полностью подавить влияние трещиноватости на развитие опытного ореола, и тогда стохастические характе-

* Продольный (по направлению стационарного потока) размер ореола не является, в этом смысле, определяющим, так как пути переноса частиц по линиям тока, пересекающим ореол, оказываются тем самым взаимно коррелированными.

ристики последней перестают контролировать выполнение предпосылки эргодичности.

Из сказанного поняты нижеследующие практические ограничения на те или иные опытные режимы:

1) эксперимент может рассчитывать на представительность лишь после достижения опытным ореолом достаточно больших поперечных размеров; наиболее тяжелые требования здесь касаются опытов в чисто трещиноватых крупноблочных образованиях и в комплексах с каналовым механизмом миграции;

2) опыты по схеме с откачкой индикатора, запущенного в наблюдательную скважину, вообще не удовлетворяют предпосылке эргодичности в силу крайне малых поперечных размеров индикаторного ореола;

3) эксперименты по схеме с наливом индикатора в центральную скважину в подавляющем большинстве случае не обеспечивают представительного объема замеров концентрации индикатора в пределах опытного ореола;

4) с этой точки зрения, опыты по схеме с закачкой индикатора, его «выстаиванием» в пласте и последующей откачкой из той же скважины могут оказаться в неоднородных, гетерогенных по емкости, пластах даже более представительными, нежели вышеупомянутые кустовые наливы и откачки;

5) опыты в естественном потоке могут быть представительными лишь при запуске и отборе индикатора по достаточно широкому фронту вкрест направления потока;

6) в отличие от всех вышеупомянутых опытов, эксперименты по дуплетной схеме могут реально обеспечить в широком круге условий (при соответствующем расстоянии между скважинами дуплета) требуемый минимальный поперечный размер опытного ореола в плане — наряду с представительностью замеров концентрационной функции для развивающегося ореола; относительные преимущества дуплетной схемы оказываются еще более

ощутимыми с учетом реальной профильной неоднородности и анизотропии, т.е. пространственной трехмерности опытного процесса;

7) любые эксперименты должны, по возможности, проводиться в интервалах, превосходящих хотя бы в несколько раз вертикальный масштаб корреляции l_z ; следует, правда, заметить, что тем самым может усиливаться роль профильных границ пласта, приводящая к нестационарному поведению изучаемого стохастического процесса на расстояниях порядка (2+3) l_z от них [9];

8) импульсные запуски индикатора оказываются во многих случаях непредставительными уже по одной лишь причине — из-за малых поперечных размеров получаемого опытного ореола в плане;

9) в породах с ярко выраженной двойной пористостью или при запусках теплового трассера в трещиноватые породы вышеприведенные ограничения могут оказаться не столь жесткими: если масштаб опробования, т.е. возрастающая роль диффузии в матрицу приводит к постепенному подавлению роли трещин в развитии опытного ореола,* то размеры последнего должны увязываться с существенно менее изменчивыми свойствами пористой матрицы.

Как видно, все эти положения вполне отвечают здравому смыслу и уже приводившимся практическим рекомендациям: они лишь сформулированы в несколько иных терминах. Подчеркнем однако еще раз, что выводы эти предполагают намеренную ориентацию на определение некоторых осредненных свойств среды — в ущерб их локальной детализации, т.е. с соответственным понижением разрешающей способности эксперимента. Впрочем, в подавляющем большинстве условий иные подходы к опытным индикаторным опробованиям либо практически нереальны, либо неэффективны.

* Ориентировочно — при времени опыта t_{on} , удовлетворяющем критерию $t_{on} > 10t_o$, где t_o — время конвективного переноса трассера до точки наблюдения.

15.1.5. Об информации, привлекаемой к планированию ОМО

Помимо очевидных требований внимательного геолого-структурного анализа при планировании ОМО, следует особо отметить важность предварительной оценки характера трещиноватости на основе материалов разведочной геофизики, описания керна и опробования при проходке скважин; полезно также специально обследовать обнажения горных пород. Все это позволяет выбрать оптимальные интервалы опробования и параметры опыта, а также установить характерные размеры блоков и трещин, ориентировочно оценить общую трещиноватость, т.е. получить независимые показатели для контроля опытных результатов.

Исключительно важными и полезными дополнениями для успешного планирования и проведения эксперимента являются гидрогеофизические исследования в опытных скважинах (расходометрия, резистивиметрия и термометрия), которые, в частности, позволяют: 1) детализировать гидрогеологическое строение опытного участка, выделить различающиеся по проницаемости профильные зоны для более обоснованного выбора опытных интервалов; 2) оценить интенсивность внутрискважинных перетоков и тем самым наметить оптимальные точки отбора проб и желательную степень их дифференциации вдоль ствола скважины; 3) определить направление и скорость регионального потока подземных вод, а также осуществить контрольные определения скоростей фильтрации в точках расположения наблюдательных скважин в процессе инъекции индикатора в пласт; 4) вести непрерывное прослеживание индикаторной волны по наблюдательным скважинам; 5) оценить гидрохимическую инерционность пьезометров. Особое место отводится гидрогеофизическим работам в оценке качества изоляции опытных интервалов и состояния фильтров скважин. Подчеркнем также,

что гидрогеофизические исследования опытных скважин должны рассматриваться как обязательный элемент ОМО (подробнее см. разд. 15.4.1).

Наконец, специального внимания заслуживает анализ материалов опытно-фильтрационных опробований (ОФО) на участках ОМО, который не только заметно упрощает обоснование пространственно-временных диапазонов опыта (по известным значениям фильтрационных параметров), но и вполне может сам по себе характеризовать ожидаемую представительность и даже целесообразность ОМО.

Так, графики площадного прослеживания ОФО позволяют оценить возможное влияние плановой неоднородности и анизотропии фильтрационных свойств, а сильный разброс точек на этих графиках при опробовании трещиноватых пород часто свидетельствует о невыполнении предпосылки сплошности среды в пределах области, которая будет охвачена индикаторным возмущением: это обстоятельство может ставить под сомнение саму целесообразность ОМО или потребовать увеличения его масштаба.

Для одних и тех же опытных кустов сопоставление расчетных фильтрационных параметров, полученных по данным площадного и временного прослеживания, позволяет судить о возможности перенесения результатов ОМО на область эффективного влияния откачки, размер которой, по крайней мере, на порядок превосходит размер области индикаторного воздействия на пласт. При этом нужно помнить, что фильтрационные параметры, определяемые временным прослеживанием, обычно характеризуют область за пределами области индикаторного обла-ка.

Эффективность анализа ОФО еще более возрастает, если попутно с опытными откачками, на заключительных их стадиях, использовались запуски индикаторов в пьезометры опытно-фильтрационных кустов (см. разд. 20.1).

Так как при основных схемах ОМО (с наливом и дуплетной) на участке куста предварительно создается квазистационарный или стационарный фильтрационный режим, то к этой стации миграционного опробования следует относиться как к опытно-фильтрационному опробованию достаточно высокого класса (хотя им охватывается обычно меньшая область пласта, чем при типичном фильтрационном опробовании); его оперативный анализ позволяет внести последние корректиры в схему ОМО, что особенно касается интервалов опробования.

Откачки любого назначения, проводимые на предполагаемых участках ОМО, должны сопровождаться регулярным отбором гидрохимических проб и замерами температуры воды.

15.2. Предпосылки к выбору индикатора*

Полевые эксперименты должны проводиться с достаточно интертными и устойчивыми в природных водах индикаторами, легко определяемыми (желательно в полевых условиях) химическими или другими методами и мало влияющими на фильтрационные свойства пород; необходимость приготовления больших объемов индикаторных растворов до опыта делает целесообразным применение легкодоступных и дешевых соединений. В то же время, выбор индикаторов определяется их способностью идентифицировать и оттенять те или иные особенности физических процессов внутрипластового массообмена при опробовании гетерогенных сред; поэтому следует раздельно рассматривать химические (они дифференци-

* Здесь не рассматриваются радиоактивные индикаторы, применение которых в полевых условиях часто связано со значительными трудностями организационного характера; это, наряду с отрицательной реакцией органов санитарной инспекции, делает пока радиоиндикаторные методы малодоступными для широкого круга гидрогеологов.

руются в зависимости от физико-химических свойств растворов) и тепловые индикаторы.

Соли электролитов. При опробовании водоносных горизонтов, содержащих пресную воду (с минерализацией менее 1 г/л), предпочтение должно, безусловно, отдаваться легко растворимым хлоридным солям, таким, как NaCl , CaCl_2 , NH_4Cl и др. При использовании этих электролитов регистрируют хлор-ион, инертный практически ко всем типам горных пород*. Концентрацию хлора в растворе определяют аргентометрическим титрованием, потенциометрическим (использованием ионоселективного электрода) или поляризационными методами; последние позволяют замерять содержание ионов хлора непосредственно в стволе скважины. Наблюдения за распространением индикатора (электролита) могут осуществляться и по общей минерализации раствора при помощи резистивиметрического каротажа (см. разд. 15.4.2). Близким по миграционным свойствам к хлор-иону является ион брома; бромидные соли как индикатор могут широко применяться в водах с повышенным содержанием хлоридов, однако, определение ионов Br требует применения более сложной методики.

При большом содержании хлоридов и бромидов в сильноминерализованных природных или загрязненных водах, целесообразно использовать электролиты с анионными комплексами, нетипичными для подземных вод. Среди них следует особо выделить нитратные и нитритные соли** (например, аммиачная и кальциевая селитры, нитриты натрия и калия). Нитратные и нитритные ионы в растворе достаточно просто определяются экспресс-колориметрическими методами (эталонные цветовые шкалы приготавливаются на пластовой воде); надежность измерения возрастает, если интенсивность окраски оценивается на фотоколориметре. Максимальная погрешность такого определения иона NO_3^- составляет 2-3 мг/л при его концентрациях в растворе в пределах первых десятков миллиграммов на

* Аномально поведение хлор-иона отмечается лишь в более кислых $\text{pH} < 3$ растворах.

** Учитывая, что при длительном нахождении в водоносном пласте ионы NO_2^- могут окисляться (до нитратов и свободного азота), нитритные солевые индикаторы используются в опытах, продолжительность которых не превышает первых десятков часов, причем химические анализы на этот компонент должны проводиться сразу же после отбора пробы.

литр; чувствительность анализа на ион NO_2^- примерно на порядок выше. При отсутствии азотных соединений в пластовых водах, оптимальные максимальные концентрации ионов NO_3^- , регистрируемые в пункте гидрохимического контроля, должны составлять 30-40 мг/л, а для ионов NO_2^- — 5-10 мг/л.

Перспективным представляется также использование в качестве ионных «меток» карбомидных соединений, входящих в состав мочевины и тиомочевины.

Наконец, к электролитическим условно отнесены нейтрон-активные соединения, содержащие такие элементы, как бор и кадмий; наиболее доступным из них является тетроборнокислый натрий (бура). Регистрация индикатора в пласте может проводиться при помощи скважинного нейтронного каротажа.

Органические красители (флуоресцеин, метиленовая синька, уринин, родамин). Основное преимущество этих индикаторов заключается в простоте визуальной и инструментальной регистрации; при этом возможна и скважинная колориметрия растворов с использованием специальных погружных зондов. Чувствительность определений весьма высокая: реально может быть зарегистрировано разбавление исходного продукта в миллион раз. Так, во ВСЕГИНГЕО разработаны опытные образцы полевого флуориметра (ПФ-4), позволяющего определить концентрации флуоресцеина в пресной воде с точностью порядка $5 \cdot 10^{-7}$ г/л [2]. Вместе с тем, органическая природа красящих веществ оказывается на особенностях их физико-химического взаимодействия с горными породами — все они в той или иной степени сорбируются ими, причем интенсивность и кинетику сорбции трудно предсказать заранее [5]. В частности, неоднократно отмечено уже низкое качество опытов с флуоресцеином при $\text{pH} < 6$. Мало изученной пока остается способность органических красителей к проникновению в поры блоков трещиноватых пород. Несмотря на все это, запуски красителей являются весьма эффективными, по крайней мере, на этапах, предшествующих основному эксперименту (например, при откачках или пробных нагнетаниях).

В ряде случаев может представлять интерес целенаправленное использование сорбируемых индикаторов, например, для оценки возможностей сорбции конкретных загрязнителей на стенках трещин. В трещиновато-пористых породах сильные различия показателей сорбции отдельных индикаторов в пористой матрице и, соответственно, параметров макродисперсии для них можно использовать

для оценки значимости масштабных эффектов при ОМО — путем параллельного во времени варьирования зоной индикаторного возмущения по различным компонентам; при этом могут непосредственно определяться соответствующие коэффициенты задержки. Пример подобного использования неконсервативных индикаторов при дуплетном опробовании можно найти в работе [8].

Наряду с сорбируемыми индикаторами, для качественной оценки возможной роли гетерогенности и неоднородности пласта могут параллельно применяться несколько несмачивающих индикаторных жидкостей, характеризующихся различными показателями подвижности. Специальные индикаторы используются и для оценки фазовой насыщенности в пласте: индикация основывается на способности закачиваемого вещества распределяться в процессе опыта между смачивающей (например, вода) и несмачивающей (например, нефтепродукты) фазами [7].

В последнее время при индикаторных исследованиях все более широкое применение находит способ маркирования закачиваемых растворов путем их насыщения гелием (как инертным веществом). Чувствительность его определения при низких естественных концентрациях в пресной воде составляет $(1+5) \cdot 10^{-5}$ мл/л. Использование гелия при опытно-миграционных работах предполагает техническое обеспечение опытных кустов специальными устройствами для равномерного смешения газа с жидкостью перед их подачей в нагнетательную скважину.

Полимерные коллоидные растворы обладают пониженной проникающей способностью: коэффициент молекулярной диффузии для них часто на несколько порядков ниже, чем у солей электролитов. Использование таких соединений в гетерогенных трещиновато-пористых породах позволяет избежать эффектов поглощения индикатора пористыми блоками и интерпретировать опыты в рамках гомогенных расчетных моделей. При этом открываются возможности независимой оценки параметров активной трещиноватости и микродисперсии, которые являются контролирующими (см. разд. 15.3) при анализе результатов опробования трещиновато-пористых сред в макродисперсионном режиме. Перспективность такого подхода была показана нами на примере запусков в водоносный горизонт, представленный мело-мергельными породами, высокомолекулярного органического флокулянта — полиакриламида [3]. Кроме того, в хорошо проницаемых трещиновато-пористых породах с той же целью

могут применяться эмульсионные индикаторы и споры низших растений [5]. Специальный интерес представляет использование взвесей полимерного материала различной фиксированной крупности, позволяющее подойти к дифференциации трещин по их раскрытию.

Нерастворимые полимеры. Особым типом полимерных индикаторов являются дневные флуоресцентные пигменты (ДФП) на основе меламинтолулусульфамидафармальдегидного полимера, разработанные Ростовским гидрохимическим институтом. Эти индикаторы представляют собой разноокрашенные нерастворимые флуоресцирующие частицы микронных размеров, индикация и подсчет содержания которых в трассерной жидкости производится с помощью специального микроскопа на фильтре, через который она предварительно профильтровывается. Достоинствами данного индикатора является высокая степень обнаружения даже в очень малых количествах, возможность одновременного запуска (и обнаружения) трассеров разного окрашивания в несколько скважин одновременно, что делает их очень удобными для применения в индикаторных запусках с целью исследования плановой и профильной анизотропии, изучения плановой неоднородности в трещинно-карстовых породах. При применении в трещиновато-пористых породах анализ характера выходных кривых данного индикатора позволяет разделять характеристики отдельных зон трещиноватости, поскольку он мигрирует практически только по открытым трещинам. В то же время в последнем случае затруднены количественные характеристики параметров рассения из-за возможного необратимого поглощения части индикатора пористыми блоками. Полная безвредность индикатора позволяет применять его на участках действующих водозаборов. Индикатор получил высокую оценку у специалистов научно-производственной фирмы «ГИДЭК», апробировавших его на ряде объектов (водозаборах подземных вод), находящихся в стадии гидрогеологической разведки.

В качестве нерстворенных индикаторов с близкими к ДФП свойствами могут также использоваться споры и пыльца растений.

Тепловые индикаторы. Применение этих индикаторов особенно оправдано в комплексах трещиновато-пористых пород, так как изучение искусственно создаваемых тепловых полей позволяет подойти к оценке геометрических характеристик породных блоков. Это необходимо, прежде всего, если реальные масштабы опробования химическими индикаторами не позволяют вывести опыт на режим, при

котором ощутимо проявляется обмен между трещинами и блоками (см. разд. 13.3). Так как тепловой индикатор усваивается и блоками скальных пород, то это его свойство может использоваться для определения их удельной поверхности. Термовые индикаторы имеют и другие преимущества по сравнению с солевыми: а) исключаются из рассмотрения сорбционные эффекты; б) появляется возможность непрерывного и детального слежения за индикатором *in situ* по стандартным термодатчикам, обеспечивающим точность замеров температуры не менее $0,05^{\circ}\text{C}$; в) в отпадает необходимость приготовления больших объемов солевых растворов. К недостаткам относятся: влияние естественной конвекции в пласте и стволе скважины, высокие тепловые потери при перемещении индикатора по инъекционной скважине к опытному интервалу (это нередко требует дополнительного подогрева воды на больших глубинах), заметные изменения фильтрационных свойств пород в результате термических деформаций блоков (практика показывает, что при тепловом расширении или сжатии блоков проницаемость пород может меняться в несколько раз), повышенная продолжительность опытов, необходимость особенно внимательного расчетного обоснования длины опытного интервала (с тем, чтобы исключитьискажающее влияние тепловых потерь в окружающие опробуемую зону пласти породы); в трещиноватых породах следует отметить возможное несоответствие температуры воды в трещинах и скважине в результате кондуктивного прогрева последней породными блоками, что делает часто предпочтительным дуплетное опробование.

Наряду с тепловым трассером, интересные возможности для оценки удельной поверхности блоков могут базироваться на использовании специальных индикаторов (например, эозина), сорбируемых поверхностью трещин, но не диффундирующих в глубь поровой матрицы. При хорошо изученных в лаборатории сорбционных параметрах (получаемых в пересчете на единицу площади поверхности образцов ненарушенной структуры) обработка полевых экспериментов дает возможность оценить удельную поверхность пористых блоков в условиях их естественного залегания. Правда, эта идея нуждается в детальной экспериментальной проверке.

Общим для всех опытов является ограничение на применение индикаторов, сильно отличающихся по минерализации и температуре от пластовых вод, в связи с плотностной конвекцией, возникающей вследствие разности объемных масс потока-носителя и индика-

торной жидкости. Вместе с тем, целенаправленное изучение этого эффекта (что проще всего достигается при тепловом воздействии на пласт) расширяет представления о степени профильной фильтрационной анизотропии пород — важного показателя при исследовании миграционных процессов.

15.3. Расчетное обоснование опытной схемы с выбором контролирующих показателей и дополнительных трассеров

К настоящему времени накоплен лишь весьма ограниченный опыт индикаторного опробования, недостаточный для априорной оценки целесообразных условий проведения миграционных экспериментов, как, например, это делается при опытно-фильтрационном опробовании. Аналогия с фильтрационными исследованиями неуместна и по другой причине: процессы массопереноса, воспроизведимые той или иной схемой опыта, имеют гораздо более узкие, чем у фильтрационных процессов, пространственно-временные диапазоны, в пределах которых достаточно рельефно проявляются основные особенности изучаемого явления и имеется возможность надежной оценки исключимых параметров. Недостаточный учет этих диапазонов приводит к дефектным опытам. Приведенные факты в наибольшей степени относятся к гетерогенным трещиновато-пористым породам, где разнородный характер переноса в сочетании с масштабными эффектами делают планирование экспериментов особенно важным; именно на примере этого, самого сложного, варианта*, мы и рассмотрим подробно вопросы планирования ОМО.

* Для скальных трещиноватых пород достаточно ограничиться соображениями, изложенными в разделе 15.1, и лишь подчеркнуть особо необходимость учета инерционности наблюдательных скважин (см. разд. 14.4).

Экспериментальные характеристики подбираются таким образом, чтобы в процессе опыта воспроизводилась та или иная расчетная схема массопереноса. Ясно, что применимость конкретной расчетной схемы оценивается при этом исходя из вероятных значений миграционных параметров, определяемых на более ранних этапах проведения опробований, а также лабораторными экспериментами и по аналогии.

В комплексах пористых пород характерные параметры вполне допустимо выбирать на основе гранулометрического и минерального состава, и даже по аналогии. Однако для трещиноватых пород выбор емкостных и массообменных параметров блоков уже не может основываться на априорных предпосылках, особенно в том, что касается активной трещиноватости и удельной поверхности трещин. Важное значение имеет и оценка двух главных показателей, определяющих интенсивность миграции трассера в породных блоках, — пористости n_0 и коэффициента молекулярной диффузии D_m , а иногда и второстепенных показателей — проницаемости блоков k_b и параметров осмотического переноса. Для этого ставятся лабораторные опыты (разд. 12.3) на образцах, отобранных из скважин на опытном участке; они выполняются с трассерными растворами (см. разд. 15.2), которые предполагается использовать в полевых экспериментах.

Результаты лабораторных определений призваны обеспечить планирование таких опытных условий, при которых данные ОМО могли бы однозначно интерпретироваться в рамках расчетных гетерогенных моделей. Это диктуется и тем обстоятельством, что для анализа опытов в трещиновато-пористых породах при определенных условиях может привлекаться также альтернативная расчетная схема микродисперсии, учитывающая только емкостные и продольно-гидродисперсионные показатели проводящих трещин, не столь важные для многих прогнозных построений. Поскольку, в частности, предпосыл-

ка поршневого вытеснения по трещинам вполне оправдана при анализе процессов регионального характера, очевидно, и постановка экспериментов, позволяющая использовать то же допущение в соответствующих интерпретационных моделях, должна бы считаться наиболее разумной. С этой точки зрения, продольную гидродисперсию следует рассматривать лишь как эффект, искажающий результаты опробований; планирование экспериментов в трещиновато-пористых породах логично ориентировать на учет и, по возможности, исключение его влияния, что особенно важно для расположения скважин в *опытах с наливом индикатора*.

Ясно, что надежность интерпретации эксперимента возрастает с увеличением его масштаба и продолжительности. Если планируется проходка специальных опытных скважин, то выбор расстояний между центральной и наблюдательными скважинами r_{min} по возможности должен обеспечить подчиненную роль гидродисперсионного рассеяния в трещинах.* Для этого вспомним критерий (14.45), переписанный в форме:

$$r > r_{min} \approx (qn/\lambda_m)^{1/2} (\lambda_m = S_B^{-2} D_m n_o). \quad (15.2)$$

Априорные представления об удельной поверхности S_B (помимо геолого-структурного анализа) можно получить, определив размер блоков ($m_b \approx 6/S_B$) из характеристического времени запаздывания графиков временного прослеживания откачек.

Как видно из (15.2), в породах с относительно низкими массообменными параметрами масштабы опробования должны быть весьма значительными; например, при различиях в емкости пор и трещин в пределах одного порядка ($n_o \leq 10n$) и при параметре $D_m \approx 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сут}$ величина r_{min}

* Здесь не рассматривается простейший вариант, когда весь опыт или длительная его стадия протекает в режиме микродисперсии — см. критерий (14.41).

нередко будет измеряться многими десятками и даже сотнями метров. Подобные масштабы часто нереальны, т.е. критерий (15.2) в таких случаях не может быть выполнен.

Если масштабы опробования меньше, чем это разрешается критерием (15.2), то можно попытаться улучшить ситуацию, увеличивая продолжительность опыта:

$$t > t_{min} \approx 5n^2/\lambda_m. \quad (15.3)$$

Однако и в этом варианте планирование далеко не всегда может привести к желаемым результатам, поскольку принятая по (15.3) длительность эксперимента заставляет ориентироваться на расчетные концентрации $\bar{c} > 0,5$ (часто $\bar{c} > 0,8-0,9$). Это сильно сказывается на точности определения не только коэффициента трещиноватости, но и массообменного комплекса.

Из (15.2) физически ясно, что уменьшить требуемый масштаб эксперимента можно также, снизив расход напорного потока q (тем самым увеличивается длительность контакта индикатора, находящегося в трещинах, с пористыми блоками); однако это может привести к осложнениям иного свойства, в частности, к более серьезному искажению создаваемого опытного возмущения естественным фильтрационным потоком.

Приведенные критериальные соотношения (15.2) и (15.3) могут, вообще говоря, использоваться и для планирования дуплетного опробования трещиновато-пористых пород. В этом, однако, нет настоятельной необходимости: чувствительность дуплетного опробования к дисперсивности δ_L — весьма низкая (по крайней мере, при концентрациях более 0,1-0,2 — см. рис. 14.7), что в данном случае следует воспринимать как еще одно преимущество этой опытной схемы. К тому же, дисперсивность можно оценить посредством импульсного дуплетного запуска.

Рассмотрим теперь вопрос об учете гидрохимической инерционности наблюдательных скважин (см. разд. 14.4). В общем случае, она вынуждает предусматривать специальное оборудование для кратковременной прокачки скважины перед отбором пробы. Для трещиновато-пористых пород с высокими массообменными свойствами существует и альтернативный вариант — выбрать масштаб опробования, позволяющий свести к минимуму искажающее влияние инерционности (см. 14.68). Однако, при низких массообменных свойствах это требует опять-таки больших масштабов опробования: например, если критерий (15.2) выполняется «на пределе» ($r = r_{min}$), то из (14.68) вытекает требование:

$$5r_n/\xi r < n, \quad (15.4)$$

согласно которому величина r/r_n (где r_n — радиус наблюдательной скважины) должна иметь порядок 10^3 . В данном варианте только одновременное выполнение критериев (15.2) и (15.4) позволяет пренебречь дисперсией по трещинам и инерционностью наблюдательных систем, т.е. рассчитывать на интерпретацию опыта согласно простейшему решению (14.35) для гетерогенной среды. В противном случае, следует более внимательно рассмотреть возможности дуплетного опробования.

Итак, на первый взгляд, для специально проходимых опытно-миграционных кустов всегда можно снизить влияние основных нежелательных эффектов путем наращивания масштаба эксперимента, т.е. увеличивая расстояние до наблюдательных скважин. Однако, максимально допустимое расстояние между опытными скважинами r_{max} также контролируется рядом факторов — прежде всего скоростью и направлением естественного фильтрационного потока, искажающее влияние которого должно ограничиваться при планировании опыта. Если задаться уровнем погрешности в оценке трещиноватости 15-20%, то допустимое значение r_{max} можно найти по графику (см.

рис. 14.4); для наименее благоприятного случая расположения луча скважин против потока имеем соотношение:

$$r < r_{max} \approx 0,05q/v_e; \quad (15.5)$$

это условие может оказаться весьма жестким. При дуплетном опробовании соответствующее предельно допустимое расстояние между скважинами r_{max} может быть увеличено в несколько раз. Во всех вариантах ось «дуплета» предпочтительнее ориентировать по направлению естественного потока, так как при этом искажающее влияние последнего будет минимальным и легче учитываемым. Ситуация, однако, может существенно осложниться наложением плановой анизотропии, с возможностью проявления которой всегда приходится считаться в трещиноватых породах (см. разд. 14.1.4). В этом случае оптимальная ориентация основного луча (оси «дуплета») и величина r_{max} подбираются расчетом, исходя из направлений и скорости естественного потока и главных направлений анизотропии (если они известны — разд. 20.1.4).

На расстояния r_{max} есть и другие ограничения: при слишком большом удалении скважин падает значимость массопереноса по трещинам по сравнению с молекулярно-диффузионным оттоком в блоки, что приводит к возрастанию погрешностей при определении активной трещиноватости в средах с высокими массообменными параметрами. К тому же, с удалением наблюдательных скважин резко увеличивается требуемая длительность эксперимента (при больших значениях r она пропорциональна r^4) и, конечно, возрастает расход индикатора.

Таким образом, из сказанного следует вывод о том, что в некоторых случаях опыты с химическим индикатором ограничены слишком жесткими требованиями и тогда их планирование может вообще не гарантировать приемлемого варианта размещения скважин (или приемлемых временных диапазонов для уже оборудованных точек наблюдений); скорее всего, такое положение может возник-

нуть при изучении миграционными опытами трещиновато-пористой среды с низкими массообменными параметрами ($\lambda_m \leq 10^{-5}$ сут⁻¹), которая, вместе в тем, не может трактоваться как гомогенная трещиноватая среда. В этой ситуации либо приходится идти на заведомое ухудшение качества эксперимента (доверяя, согласно критерию (15.3), лишь достаточно большим концентрациям трассера), либо в проектируемой схеме опыта должны быть предусмотрены дополнительные возможности для независимых контролирующих оценок определяемых показателей.

Первая возможность* заключается в обращении к тепловому индикатору, позволяющему заметно увеличить интенсивность обмена между трещинами и блоками. Для снижения тепловых потерь в породы, окружающие опробуемый интервал, его мощность должна составлять не менее

$$m_{min} \approx 3(a_r t_c)^{1/2}, \quad (15.6)$$

где t_c — предполагаемое время опыта, существенно возрастающее по сравнению со случаем химического трассера; в первом приближении $t_c \approx (0,7-0,8)\pi r^2/q$.

Вторая возможность — статическая модификация однокважинного опыта (см. разд. 14.3.6), при проведении которого практически исключается наложение гидродисперсии на характер получаемых результатов. Однако, и здесь время выдержки индикатора в пласте (разд. 15.1.2) между моментами его закачки и откачки должно быть увязано с возможными погрешностями, возникающими в результате сдвига индикатора естественным потоком. Этим фактором можно пренебречь, если на величину t_b наложить ограничение:

* Кстати, она может представлять интерес и для чисто трещиноватых пород.

$$v_e^2 t_s^2 / q t_3 \cdot n < 0,3, \quad (15.7)$$

где t_3 — длительность закачки индикатора в скважину на первом этапе опыта.

Понятно, что время t_s контролируется чувствительностью индикаторных графиков (см. разд. 14.3.6), а следовательно, не может задаваться сколь угодно малым; с другой стороны, время t_3 не может быть слишком большим, так как иначе за период закачки значительная масса индикатора успеет диффундировать в блоки. Поскольку последнее обстоятельство контролируется критерием (14.41), условие (15.7) может быть модифицировано:

$$v_e^2 t_s^2 \lambda_\infty / q n^3 < 1,5. \quad (15.8)$$

Итак, проводя описанные дополнительные эксперименты, можно получить контрольные оценки некоторых комплексных параметров, включающих удельную поверхность блоков. К сожалению, однако ни статическая постановка односкважинного эксперимента, ни опыты с тепловым индикатором не позволяют надежно определить активную трещиноватость пород с двойной пористостью. И несмотря на то, что в таких породах коэффициент трещиноватости обычно не столь важен для длительных прогнозов, его экспериментальную оценку следует считать обязательной: полученные значения трещинной емкости системы являются показателем, контролирующим надежность всего расчетного алгоритма. В этих целях полезно провести дополнительный опыт с индикатором, не усваиваемым блоками, что позволяет определить и константу гидродисперсии d_L , значение которой обычно коррелирует с характерным размером блоков; такая информация позволяет учесть в явном виде и возможную роль гидродисперсионного рассеяния — при анализе опытного материала на основе общих решений для гетерогенной модели.

Наконец, при планировании опытов в средах с относительно невысокими массообменными свойствами, а также в условиях, допускающих изменение масштаба эксперимента в достаточно широких пределах, размещение скважин может проводиться и таким образом, чтобы данные с обычными химическими индикаторами могли интерпретироваться для близко расположенных точек наблюдения по схеме микродисперсии, а для удаленных — в рамках гетерогенной модели. Возможно и последовательное или параллельное применение химического и теплового трассеров.

В целом, неизбежные погрешности планирования индикаторных опытов по вероятным миграционным параметрам делают целесообразным проведение эксперимента в трещиноватых породах при нескольких различающихся режимах (расходах нагнетания).* Это особенно важно для пород с сильной гетерогенностью трещинного пространства (разд. 1.1.1), где нелинейность миграционного процесса проявляется в существенной зависимости расчетных параметров среды от величины опытного расхода. С той же точки зрения, в опытный куст целесообразно включать не менее двух (лучше трех) скважин на каждом луче. При дуплетной схеме желательно также предусматривать запасные скважины, позволяющие провести опыт при различных размерах зоны опробования.

* Помня, однако, о влиянии естественного потока.

15.4. Проведение индикаторных опробований

Техническая подготовка и проведение ОМО требует предварительного изучения водоносного пласта по данным бурения скважин, опытно-фильтрационных работ и гидрогеофизических исследований, лабораторных экспериментов, лежащих в основе предварительных разведочных расчетов, а также исследований по выбору трассера.

15.4.1. Предварительное опробование скважин опытно-миграционных кустов*

Подобные испытания включают следующие задачи:

1) детализацию гидрогеологического разреза и выделение зон преимущественного переноса индикатора, на основе чего окончательно выбираются интервалы индикаторного опробования; 2) определение направления и скорости естественного фильтрационного потока; 3) оценку показателей скин-эффекта наблюдательных скважин или комплексного параметра их гидрохимической инерционности; 4) оценку качества оборудования опытных скважин, направления и интенсивности внутрискважинных и затрубных перетоков; 5) оценку приемной способности нагнетательной скважины; 6) обоснование глубин размещения точек гидрохимического опробования и контрольной аппаратуры. Для успешного решения этих задач могут применяться гидрогеофизические методы скважинного каротажа.

Целям гидродинамического расчленения разреза служит, прежде всего, расходометрия скважин опытного куста. Для повышения чувствительности этого метода (и, тем более, резистивиметрии) в некоторых случаях приходится прибегать к изоляции отдельных интервалов пакерными устройствами.

* Раздел написан совместно с В.К.Учаевым и В.В.Щемелининым.

Для сокращения ошибок расходометрии рекомендуется распределять послойные коэффициенты фильтрации (K_i) пропорционально замеренным относительным расходам: $\frac{K_i}{K_{cp}} = \frac{\Delta Q_i / \Delta m_i}{Q/m}$, где $K_{cp} = T/m$. Интервалы Δm_i не должны быть при этом слишком малыми — для снижения влияния вертикальной компоненты скорости.

В основе этой зависимости лежит доказанная многими опытами предпосылка о постоянстве радиальных градиентов вблизи скважины даже при сильных контрастах проницаемости — после начального,

резко нестационарного, этапа t_o ($\frac{a_{cp}^* t_o}{r_c^2} \approx 100$, где a_{cp}^* — коэффици-

ент пьезопроводности пласта). Однако при наличии секущих скважину вертикальных трещин, такой подход будет давать большие ошибки.

При отсутствии выявленных расходометрией интенсивных внутрискважинных перетоков, целесообразно проведение резистивиметрии в естественном режиме: это позволяет получить дифференцированные по вертикали значения скоростей фильтрации:

$$\nu = \frac{\pi d_c}{4\xi t} \ln \frac{C_{oc} - C^o}{C_c - C^o}, \quad (15.9)$$

где C_c , C^o и C_{oc} — соответственно текущая, фоновая и исходная (сразу после засоления) концентрации вещества, которое должно, по возможности, отличаться от используемых в основном эксперименте. Для требуемых в этом случае качественных оценок, параметр ξ может приниматься по результатам экспресс-наливов или по данным об аналогичных скважинах опытно-фильтрационных кустов, а затем уточняться резистивиметрией в возмущенном режиме, когда скорость в точке расположения пьезометра считается известной ($\nu = Q/2\pi r t$). В послед-

нем варианте определяется и более общий параметр гидрохимической инерционности:

$$\alpha = \frac{Qt}{2\pi r^2 n} \left(\ln \frac{C_{oc} - C^o}{C_o - C^o} \right)^{-1}, \quad (15.10)$$

где для предварительных оценок значение n может быть определено по данным лабораторных испытаний (в пористых породах) или по аналогии; в дальнейшем его можно уточнить по результатам основного эксперимента.

Обработка данных проводится в координатах $\ln [(C_{oc} - C^o) / (C_c - C^o)]$ от t ; по тангенсу угла наклона γ графика находят

$$\alpha = \frac{Q}{2\pi r^2 n \operatorname{tg} \gamma} \quad (15.11)$$

Таким образом, с помощью резистивиметрии осуществляется предварительная тарировка наблюдательных скважин; если она сочетается с гидродинамическим опробованием прискважинной зоны экспресс-наливом [4], то степень доверия к результатам возрастает.

Как показывает практика подобных работ, они дают надежные данные только при исключении вертикальных перетоков вдоль ствола скважины, а также эффектов плотностной конвекции (наведенных при засолении). Правда, последний фактор может быть приближенно учтен корректировкой графика резистивиметрии [3]. Однако, наиболее эффективной является, несомненно, изоляция интервала наблюдений за рассолением (например, тампонами или подвижными эластичными манжетами, плотно прилегающими к стенкам скважины). Другой путь повышения надежности данных резистивиметрии основан на их совмещении с результатами расходометрического каротажа. В слабопроницаемых толщах участки наиболее активной горизонтальной циркуляции устанавливаются

непосредственно по резистивиметрическим наблюдениям (при наливе) за перемещением в стволе контакта вод с различной минерализацией. Резистивиметрия может заменяться прямыми замерами электропроводности воды [10], при этом обнаруживаются точки притоков в скважину порядка 10 мл/мин; такая чувствительность позволяет определять низкую проницаемость пород — до 10^{-10} м/сек.

Так как подаваемый в скважину индикаторный раствор часто имеет отличную от пластовой воды температуру, то данные попутного термокаротажа позволяют получить дополнительную информацию о степени профильной фильтрационной неоднородности пород и о некоторых характерных чертах опытного процесса. Так, на термограммах в виде температурных аномалий фиксируются интервалы с повышенной (или пониженной) фильтрующей способностью. Наблюдения за восстановлением температуры в стволе эксплуатационной скважины (после прекращения опытного воздействия) позволяют качественно выделить профильные зоны, различающиеся по проницаемости. Как и при резистивиметрии, данные термодатчиков наиболее надежны при изоляции отдельных интервалов. В противном случае не удается устранить влияние термоконвективных токов в обводненном объеме скважины: имеются сведения о заметном проявлении тепловой конвекции уже при температурных градиентах, равных 0,02-0,03 °С/м.

Термометрия наблюдательных скважин является и наиболее доступным методом оценки качества затрубной цементации: в скважинах (находящихся в состоянии покоя) с качественной затрубной цементацией обычно отчетливо фиксируется закономерное нарастание температуры с глубиной, обусловленное градиентом естественного теплового поля; наоборот, резко слаженные или даже аномальные термограммы наблюдаются по скважинам с активными переливами пластовых вод по затрубью — из одного проницаемого слоя в другой.

Известна, наконец, методика определения направления потока по данным термометрии.

При небольших глубинах в этих целях можно эффективно использовать поверхностный метод заряженного тела [3].

15.4.2. Запуск трассера и наблюдения за его миграцией

Индикаторный раствор и закачиваемая вода могут подаваться в скважину отдельно или после предварительного смешения, позволяющего вести непрерывный контроль за граничной концентрацией (желательно проводить дополнительное перемешивание непосредственно в стволе). При кратковременных (импульсных) запусках индикаторный раствор, заливаемый в наблюдательную скважину, должен быть обязательно вытеснен из нее в пласт путем налива сверху чистой воды — в количестве двух-трех обводненных объемов скважины: для таких запусков целесообразно использовать специальные трубы, опускаемые в скважину на нужную глубину. Наиболее равномерное распределение индикатора достигается при изоляции опробуемых интервалов (см. разд. 15.4.1).

Проведение миграционного опыта при наливе связано с систематическим отбором проб из наблюдательных скважин и последующим их химическим анализом с целью определения концентрации индикатора; параллельно (для контроля стабильности граничной концентрации) ведется отбор и из инъекционной скважины. При суммарном опробовании раствор отбирается одновременно в нескольких точках, которые приурочиваются прежде всего к установленным зонам с повышенной горизонтальной циркуляцией раствора. При поинтервальном опробовании отбор осуществляется в пределах выбранного интервала. С целью устранения гидрохимической инерционности наблюдательных скважин в необходимых случаях (см. разд. 15.3) следует проводить кратковременную

предварительную прокачку опытного интервала. Наиболее качественный отбор проб, особенно с больших глубин, достигается при использовании наблюдательных скважин специальных конструкций — так называемых секционных пьезометров (см. разд. 19.3).

В потоках пресных вод регистрацию индикатора можно вести по общей минерализации воды с помощью резистивиметра. При правильно подобранных параметрах прибора, он уверенно регистрирует изменения минерализации на 15-20 мг/л и более, — в случае естественного фона до 1000 мг/л [3]. Преимущества этого способа контроля особенно очевидны, когда при миграционных работах необходимы данные о неравномерном продвижении индикатора по неоднородному в разрезе пласту. При дифференциации скважины на отдельные изолированные секции с обособленными резистивиметрами, сводятся к минимуму погрешности замеров, обусловленные вертикальными внутрискважинными перетоками. Отмеченные достоинства резистивиметрического каротажа распространяются и на термометрический контроль миграционных опытов с тепловым индикатором. При этом, как правило, исключается влияние инерционности измерительной системы на точность получаемых результатов.

Наконец, при неглубоком (5-10 м) залегании уровня грунтовых вод наблюдения за распространением в пласте электролитического индикатора могут осуществляться с поверхности методом заряженного тела (МЗТ) [3]: используя данные о скорости смещения изолиний потенциала электрического поля и об их форме, легко определить интенсивность миграции трассера в различных направлениях от нагнетательной скважины. Тем самым одновременно устанавливается влияние плановой анизотропии проницаемости опробуемого пласта на точность рассчитываемых миграционных параметров (см. разд. 14.1.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 15

1. Веригин Н.Н., Васильев С.В., Саркисян В.С., Шержуров Б.С. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород. М., Недра, 1977. 271 с.

2. Методические рекомендации по применению флуоресцентных индикаторов при гидрогеологических работах. Сост.: Гончаров В.С., Латышев С.И. и др., М., ВСЕГИН-ГЕО, 1982, 89 с.
3. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах (опыт гидрогеологических исследований). Л., Недра, 1980. 320 с.
4. Опытно-фильтрационные работы. Под. ред. В.М.Шестакова и Д.М.Башкатова. М., Недра, 1974. 203 с.
5. Davis S.N., Thompson G.M., Bentley H.W. Groundwater tracers — a short review. — *Ground Water*, 1980, 18, N1, p.p. 14-23.
6. Gelhar L.W. Stochastic subsurface hydrology. «Prentice — Hall Inc.», New Jersey, 1993, 385 p.
7. Jin M., Delshad M., Dwarakanath V., McKinney D.C., Pope G.A., Sepehrnqri K., Tilburg C.E., Jackson R.E. Partitioning tracer test for detection, estimation, and remediation performance assessment of subsurface nonaqueous phase liquids. — *Water Resources Res.*, 1995, v.31, N5, p.p. 1201-1211.
8. Leap D.I. Predicting behavior of contaminants in aquingers using apparent relative retardation of surrogafres. «*Environmental Geology*», v.22, 3, 93, p.p. 201-204.
9. Tompkins J.A., Gan K.C., Wheater H.S., Hirano F. Prediction of solute dispersion in heterogeneous porous media: effect of ergodicity and hydraulic conductivity discretisation. *Journal of Hydrology*, 1994, v.159, p.p.105-123.
10. Tsang C.-F., Hufshmied P., Hale F.V. Determination of fracture inflow parameters with a borehole fluid conductivity logging methods. — *Water Resources Res.*, 1990, N4, p.p. 561-578.

Интерпретация результатов опытов проводится в несколько этапов: 1) качественный анализ индикаторных кривых и диагностика на его основе роли отдельных механизмов внутрипластового переноса; 2) непосредственное вычисление параметров согласно намеченным на первом этапе расчетным моделям миграции; 3) оценка достоверности полученных результатов с использованием параллельных независимых оценок (вытекающих, в частности, из литолого-структурного анализа и лабораторных опытов), анализа параметрической чувствительности и поверочных расчетов на численной модели.

16.1. Диагностика опытных результатов и выбор расчетной модели

16.1.1. Комплексы пористых пород

Интерпретация может основываться на моделях микродисперсии (породы проявляют себя как квазигомогенная среда — см. разд. 16.2) и макродисперсии (гетерогенные стратифицированные толщи — см. разд. 16.3.1); последние подразделяются на детерминированные модели, — их применение оправдано, когда мощности отдельных профильно выдержаных зон сопоставимы с длиной интервала опробования, и стохастические — для пластов с незакономерной изменчивостью фильтрационных свойств по мощности. Детерминированные модели, как правило, допускают предпосылку о послойном переносе индикатора и достаточно просто диагностируются по виду

индикаторной кривой: она имеет два-три расположенных участка (при длительном входном сигнале) или пика (при кратковременном пакетном либо импульсном запуске), которым соответствует миграция индикатора по отдельным слоям, различающимся между собой по проницаемости. Если имеется информация о профильном распределении индикатора, то обработка выходной кривой может осуществляться и дифференцированно — для каждого слоя в рамках расчетной схемы микродисперсии (см. разд. 14.2), и интегрально — путем взвешивания замеренных концентраций по послойным расходам. При небольших интервалах опробования (десятки сантиметров, а при использовании теплового индикатора — первые метры) указанные выше особенности, в силу поперечной профильной дисперсии, могут оказаться невыраженными, что заставляет проводить интерпретацию как для квазигомогенной среды.

В общем случае монотонный характер индикаторных графиков (с одним пиком или с одним участком вы полаживания) также указывает на возможность использования усредненных — по опробуемой мощности пласта — интерпретационных схем. В этом случае, однако, один лишь качественный анализ выходных кривых часто оказывается недостаточным и для диагностики процесса требуется привлечение численных оценок. Прежде всего, основываясь на соотношениях для квазигомогенных сред, определяются эффективные емкостные и дисперсионные характеристики — расчетные значения пористости n_p и константы гидродисперсии δ_p . Признаками того, что пласт в действительности близок к гомогенной среде, служат: 1) близость значений n_p к величинам общей пористости пород; 2) слабая изменчивость расчетной константы δ_p , оп-

* Не исключено, правда, что такой характер графика может определяться и взаимным наложением ряда «пиков» концентраций, отвечающих проявлению слоистости.

ределяемой по разным скважинам и при разных дебитах налива, причем результаты полевых и лабораторных экспериментов должны иметь один порядок. Если же полевые опыты дают заметно заниженные значения пористости и, наоборот, существенно завышенные величины константы δ_p , не характерные для однородных пористых сред, то можно с уверенностью судить о проявлении гетерогенных свойств пласта, обусловленном изменчивостью фильтрационных параметров по его мощности и требующим привлечения стохастических моделей (разд. 14.3.1). Другим важным диагностическим признаком, также требующим последующего перерасчета опытных результатов в рамках стохастических моделей макродисперсии, служит зависимость расчетных параметров от расстояния между центральной и наблюдательными скважинами. В частности, для миграции в квазиоднородном стратифицированном пласте характерна примерно линейная зависимость расчетной величины δ_p от расстояния до наблюдательной скважины.

В опытах, проведенных при различных дебитах нагнетания, неизменность расчетных значений δ_p также является важным диагностическим признаком.

16.1.2. Комплексы трещиноватых прод

Подразделение трещиноватых пород на гомогенные и гетерогенные (с двойной емкостью) обычно выполняется вполне достоверно уже по данным геолого-структурного анализа, лабораторных испытаний и ОФР; соответственно, для первых ориентируют интерпретацию опытных результатов на модель макродисперсии. Подобная ориентация была взята уже на стадии планирования эксперимента при выборе оптимального опытного режима и масштаба опробования (см. разд. 15.3), предполагающего, в частности, выполнение условия сплошности среды.

Для предварительной диагностики опытных данных (*схема с наливом*) полезно сопоставление общего характера индикаторных кривых с типовыми формами теоретических графиков, приведенных на рис. 16.1. В отличие от симметричных графиков, соответствующих схеме микродисперсии, для гетерогенной модели характерна асимметричная выпуклая кривая с быстрым нарастанием концентрации и последующим резким выполаживанием: время достижения относительной концентрации, равной 50% от исходной, составляет малую долю от общего времени нарастания концентрации в наблюдательной скважине. Другим полезным диагностическим признаком является характер графика прослеживания по лучу наблюдательных скважин $t_{\bar{c}} = f(r^2)$ (где $t_{\bar{c}}$ — время появления в скважине фиксированной относительной концентрации \bar{c} , для четко выраженной гетерогенной среды $t_{\bar{c}} \sim r^4$, для гомогенной — $t_{\bar{c}} \sim r^2$). При пакетном входном сигнале относительно быстрое нарастание концентрации сменяется периодом длительного постепенного спада (т.наз. «хвост»).

В дальнейшем правомерность выбранной интерпретационной схемы должна контролироваться физическим правдоподобием и устойчивостью расчетных значений параметров, а также приведенными ранее критериальными соотношениями (14.45) и (14.46). При невыполнении критерия (14.45), что наиболее характерно для трещиновато-пористых сред с низкими массообменными параметрами блоков ($\lambda_m < 10^{-5} - 10^{-6}$ сут⁻¹), повторной диагностикой следует обосновать возможность использования мо-

* При доминирующем переносе по двум-трем трещинам, пересеченному опытной скважиной, графики могут иметь аномальный характер, подобный случаю слоистого пласта (см. разд. 16.1.1).

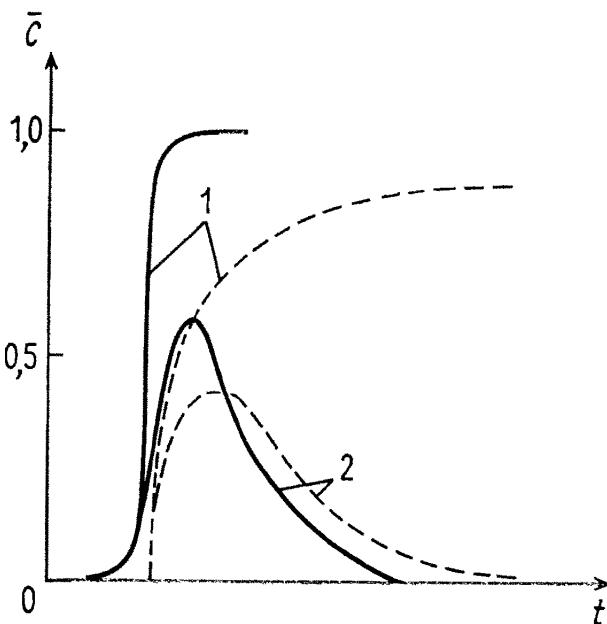


Рис. 16.1. Типовые формы индикаторных кривых для различных схем ОМО: 1 — длительный налив индикатора в скважину, 2 — «пакетный» запуск (сплошными линиями показаны выходные кривые для расчетной схемы микродисперсии, пунктирными — для расчетной схемы неограниченной емкости).

дели микродисперсии; при этом прежде всего должны рассматриваться опытные точки со значениями относительной концентрации $0,2 < \bar{c} < 0,5$ (см. разд. 15.3.2). Для пород с высокими массообменными параметрами ($\lambda_m > 10^{-1} - 10^{-2}$ сут $^{-1}$) выполнение условия сплошности среды обычно обеспечивает допустимый уровень погрешности при интерпретации результатов на основе асимпто-

тического решения (14.35); желательно, однако, также ориентироваться на участки индикаторных графиков, где концентрация \bar{c} составляет не менее 20% от максимального ее значения.

Качественный анализ кривых выходной концентрации для дуплетного опробования носит менее определенный характер. Вместе с тем, как следует из сравнения безразмерных графиков (см. рис. 14.7, 14.11 и разд. 14.2.2 и 14.3.4), для типичной гетерогенной модели отношение $t_{0,5}/t_o \gg 3$, а выходные кривые при значениях концентрации $\bar{c} > 0,1$ заметно выложены (при не слишком малых величинах параметра $B_m t_o$) по сравнению с кривыми, рассчитанными по схеме микродисперсии, что является важным признаком при диагностике опытных результатов.

Весьма показателен график (рис. 16.2) роста в приведенном времени ($\bar{t} = t/t_o$, где t_o примерно отождествляется с первым приходом трассера) относительной суммарной массы откаченного вещества:

$$\overline{M}(t) = \frac{\int\limits_0^t [c(t) - c_o] dt}{(c_o - c_o)t} = \frac{\int\limits_0^t \bar{c}(t) dt}{t}$$

где c_o — заданная концентрация в нагнетательной скважине. Для гомогенных (чисто трещиноватых) пород этот график — в интервале относительных концентраций $0,1 < \bar{c}(t) < 0,5$ — примерно прямолинейный, приведенное время $t_{0,5}/t_o$ измеряется первыми единицами (теоретически, оно равно 3), а уклон графика имеет порядок 0,1. Для типичных гетерогенных пород график более заметно отклоняется от прямолинейной формы, приведенное время $t_{0,5}/t_o$ измеряется десятками и даже сотнями, а осредненный уклон уменьшается на один-два порядка (до 0,01-0,001).

* Точнее говоря, с началом устойчивого роста концентрации трассера в откачиваемой воде (значения \bar{c} измеряются первыми процентами).

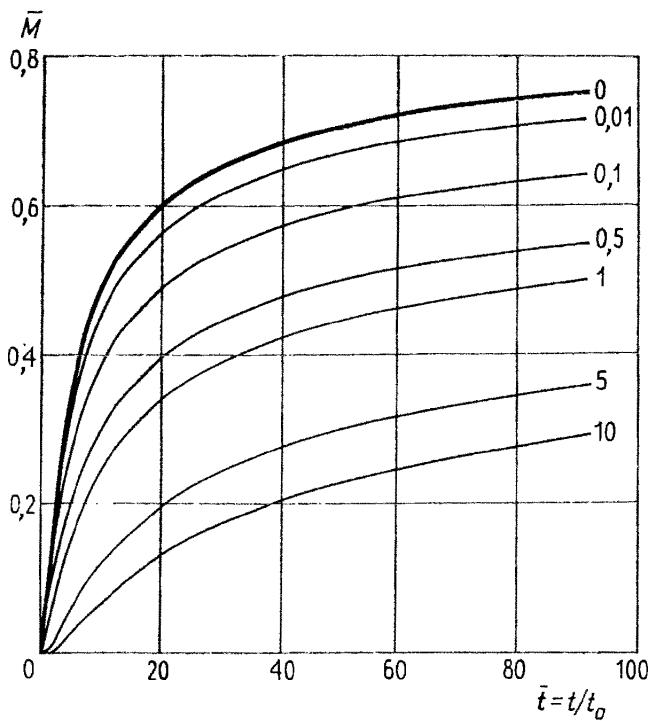


Рис. 16.2. График зависимости $\bar{M}(t) = f(\bar{t})$; шифр кривых — комплексный параметр $\lambda = B_m t_0$

В опытах с откачкой (при запуске в наблюдательную скважину) сглаживание выходных кривых предельно осложняет диагностику. Поэтому интерпретацию таких опытов обычно приходится сводить к грубой оценке активной трещиноватости пород (по пику индикаторной волны), полагая, что кинетика обменных процессов мало

влияет на точность результата; при этом, однако, возможны существенно завышенные оценки (разд. 14.3.5).

Характерной особенностью графиков $\bar{c} + t$, полученных в односкважинных опытах, является резкое увеличение скорости изменения концентрации во времени (начальные участки индикаторных кривых положе конечных). На первых этапах односкважинных опытов с «выставлением индикатора» графики должны спрямляться в координатах $C^{**} + \sqrt{t}^{**}$ (разд. 14.3.6).

Наконец, при диагностике результатов тепловых запусков следует помнить, что: 1) все трещиноватые породы ведут себя в этом случае как гетерогенные; 2) плотностная конвекция может приводить к неравномерному продвижению индикатора по мощности опробуемого интервала; 3) температура воды в непрокачанной наблюдательной скважине может в значительной степени определяться кондуктивным обменом между скважиной и пористыми блоками; 4) при малых размерах блоков или при длительных запусках опытный процесс может выходить за рамки схемы неограниченной емкости.

Во всех случаях важным диагностическим критерием является устойчивость результирующих параметров, получаемых по разным опытным скважинам и при разных режимах возмущения.

В этом смысле наибольший разброс результатов дают обычно опыты в скальных породах с сильной гетерогенностью трещинного пространства, о чём, как правило, свидетельствуют уже выходные графики опытов с наливом и с откачкой индикатора: для этих графиков характерно несоответствие их общей формы типовой с сильным разбросом экспериментальных точек, а также резкое занижение максимальных концентраций в сравнении с ожидаемыми значениями (вплоть до полного отсутствия индикатора в некоторых случаях). Сравнительно устойчивые значения параметров при относительно слаженных

и ограниченных аномалиях индикаторных графиков чаще фиксируются по дуплетным опробованиям, по крайней мере, при использовании диапазона относительных концентраций от 0,1–0,2 до 0,5 и графиков динамики суммарного отбора индикатора во времени (разд. 14.6.1), которые для гомогенных пород имеют в этом диапазоне примерно линейный характер. Полезной мерой для диагностики может служить также отношение $t_{0,5}/t_o$, где $t_{0,5}$ — время фиксации концентрации $\bar{c} = 0,5$; t_o — время, отвечающее первому появлению индикатора (см. выше).

К сожалению, многие из отмеченных аномалий опытных графиков и несоответствий расчетных параметров могут объясняться не только характером опробуемой среды, но и наложением неучтенных природных и технических факторов (см. разд. 14.1.4, 14.4, и 15.1).

16.2. Методика количественной интерпретации и анализа опытных результатов

16.2.1. Опыты в квазигомогенных средах

В рамках рассматриваемых здесь расчетов интерпретируются опыты в однородных пористых и чисто трещиноватых (гомогенных) породах. Определяемыми параметрами являются пористость (трещиноватость) пород n и константа микродисперсии δ_L , в редких случаях — параметры поверхностной сорбции на стенках трещин и поперечной плановой дисперсии.

Для интерпретации *опытов при наливе* удобно пользоваться приближенными решениями, приведенными в разд. 16.2.1. Для линеаризации графиков временного

прослеживания* достаточно представить решение (14.21) в форме:

$$\frac{1 - \mu}{2\sigma^{1/2}} = \xi, \quad (16.1)$$

причем $\xi = \operatorname{inverfc}(2\bar{c})$ — для точек с относительной концентрацией $\bar{c} \leq 0,5$ и $\xi = -\operatorname{inverfc}(2 - 2\bar{c})$ — для точек, где $\bar{c} > 0,5$. При μ , и σ , определяемых соотношениями (14.21а), спрямление выходной кривой осуществляется в координатах $\xi t^{3/4} \div t$. Расчеты ведут по точке пересечения прямой с осью времени t_o и тангенсу угла γ наклона прямой к этой оси:**

$$n = \frac{qt_o}{\pi^2}; \quad \delta_L = \frac{0,188r}{tg^2 \gamma t_o^{1/2}}. \quad (16.2)$$

На графике $\bar{c} = f(t)$ точка t_o отвечает времени регистрации в наблюдательной скважине концентрации $\bar{c} = 0,5$.

Для приближенной экспресс-оценки константы микродисперсии могут использоваться три характерные точки ($\bar{c} = 0,16$; $\bar{c} = 0,5$; $\bar{c} = 0,84$), отвечающие значениям времен $t_{0,16}$; $t_{0,5}$ и $t_{0,84}$ [3]:

$$\delta_L = \frac{r}{8} \left(\frac{t_{0,5} - t_{0,16}}{(t_{0,5} t_{0,16})^{1/2}} - \frac{t_{0,5} - t_{0,84}}{(t_{0,5} t_{0,84})^{1/2}} \right)^2. \quad (16.3)$$

При пакетном входном сигнале длительностью t_n , когда общее решение имеет вид (14.25), обработку опытных данных удобно проводить по значению максимальной концентрации c_{max} и времени ее регистрации в наблюдательной скважине t_{max} . Если $t_{max} \gg t_n$, то справедливы зависимости:

* При опробовании глубоких горизонтов вводится поправка на время движения индикатора по стволу нагнетательной скважины.

** Если расстояние между опытными скважинами r сопоставимо с радиусом нагнетательной скважины r_0 , то в этих и во всех последующих зависимостях r^2 заменяется на $r^2 - r_0^2$.

$$n \approx \frac{qt_{\max}}{\pi r^2}; \quad \delta_L \approx 0,06 \left(\frac{c_o - c^o}{c_{\max} - c^o} \right) \frac{t_{\max}^2 nr}{r^2}. \quad (16.4)$$

При обработке дуплетных опытов прежде всего определяется емкость n , равная

$$n = \frac{qt_{0,5}}{\pi r^2}. \quad (16.5)$$

Далее строят график в координатах $\bar{c} + \lg \bar{t}$ и, накладывая его на типовые кривые (см. рис. 14.7), выбирают значение $Pe = r/\delta_L$ по значению кривой, наилучшим образом аппроксимирующей фактические точки; отсюда $\delta_L = r/Pe$. Если в опыте не достигнута концентрация $\bar{c} = 0,5$, то методом последовательных приближений, используя графики (см. рис. 14.7), подбирают одновременно два параметра n и $\delta_L (Pe)$.

Впрочем, не стоит слишком рассчитывать на уверенную оценку дисперсивности, ибо к ней чувствительна лишь начальная часть опытной кривой, сильно зависящая от любых случайных факторов. Для подтверждения этого, на рис. 16.2 (кривая с шифром «0») приведен график роста относительной суммарной массы откаченного ин-

дикатора во времени $\bar{M}(\bar{t}) = \int_1^{\bar{t}} \bar{c}(\bar{t}') d\bar{t}' / \bar{t}$, где $\bar{t} = t/t_o$, $t_o = \frac{1}{3} \frac{\pi n r^2}{q}$. Как видно, в интервале $0,1+0,2 \leq \bar{t} \leq 0,5$ имеет место примерно линейная зависимость $\bar{M}(\bar{t})$, причем к моменту достижения концентрации $\bar{c} = 0,5$ откачивается около 25% массы запущенного на данный момент индикатора; в то же время, при $\bar{c} < 0,2$ эта доля не превышает первых процентов, что, само по себе, делает интерпретацию ненадежной. График $\bar{M}(\bar{t})$ также может использоваться для интерпретации (диагностики) как типовой, причем в сильно неоднородных системах подобная возможность предпочтительна (см. также [4]). При этом полезной дополнительной мерой служит отношение $t_{0,5}/t_o$ (см. разд. 16.1.2): если оно равно примерно 3, то роль дисперсии в результатах опыта несущественна, а если оно заметно больше, то объяснение нужно искать либо в повышенной чувствительности начального

участка кривой к дисперсии и/или неоднородности трещинного пространства (резко занижено t_0), либо же в сильном проявлении гетерогенности — диффузии в блоки (резко завышено $t_{0,5}$).

Интерпретацию импульсных запусков в наблюдательные скважины при откачке можно проводить методом типовых кривых (рис. 16.3), для чего решение (14.27) приводится к виду [1]:

$$\lg (F) - \lg (f) = 0, \quad (16.6)$$

где $F = F(c, t) = 2 Qtc/M$, $f = f(t_r, Pe) = t_r \sqrt{3Pe/4\pi} \psi(t_r) \exp[-(1-t_r)^2 3Pe/16\psi(t_r)]$.
(16.6а)

Для сопоставления типовых кривых $\lg f + \lg (t_r)$ с фактическим графиком $c(t)$ опытные точки наносятся на график в координатах $\lg F + \lg t$ в том же масштабе, что и типовые кривые. Согласно уравнению (16.6), совмещение типовых и опытных графиков производится только по оси абсцисс, когда по сдвигу осей ординат (A) определяется параметр $nm = 10^4 Q / (\pi r^2)$, а по шифру кривой (значение Pe) находится константа гидродисперсии ($\delta_L = r/Pe$).

Наконец, для обработки односкважинного эксперимента опытные точки наносятся на график в координатах $\xi \sqrt{t + \psi(t)} + t$. Тогда, в соответствии с решением (14.29), тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс $\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{16/3Pe^*}$, откуда находится комплексная величина δ_L/n^2 ; здесь $t = t/t^*$ (период нагнетания), $Pe^* = r^*/\delta_L = (\sqrt{Qt^*}/\pi nm)/\delta_L$.

В условиях естественных фильтрационных потоков импульсные запуски в наблюдательные скважины позволяют оценить показатели планового двухмерного рассеяния из решения (14.31). Для этого можно использовать данные о времени t_{max} регистрации пика

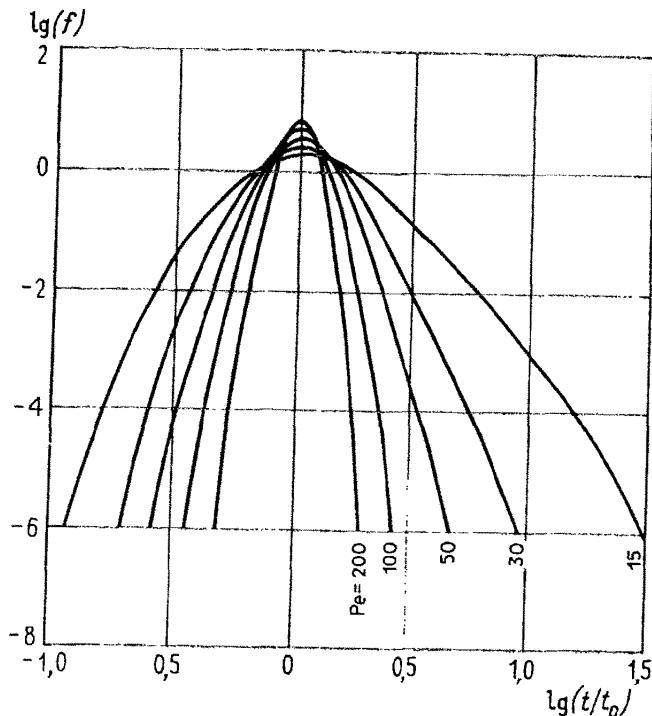


Рис. 16.3. Типовые кривые импульсного запуска индикатора в наблюдательную скважину при откачке (расчетная схема микродисперсии) (цифры у кривых — значения параметра Пекле).

максимальной концентрации в скважинах, расположенных по потоку ниже инъекционной:

$$x_i^2 + (D_y/D_x)y_i^2 = \left(\frac{v_c}{n}\right)^2 t_{max\ i}^2 + 4 t_{max\ i} D_x/n, \quad (16.7)$$

где x_i и y_i — координаты наблюдательных скважин, ось x совпадает с направлением вектора скорости естественного фильтрационного потока v_e ; $x = 0$, $y = 0$ — координаты запускной скважины. Таким

образом, имея три наблюдательные скважины ($i=1,2,3$), из решения системы уравнений (16.7) находят искомые соотношения v_e/n , D_x/n и D_y/n , а следовательно, и константы $\delta_x = D_x/v_e$ и $\delta_y = D_y/v_e$. Независимая оценка скорости фильтрации v_e на опытном участке (например, по результатам резистивиметрии) позволяет рассчитать параметр n .

16.2.2. Опыты в гетерогенных средах

Стратифицированные пласты раздельнозернистых пород. Если диагностика опытных кривых диктует (см. раздел 16.1.1) применение детерминированной модели послойного переноса, то при наличии данных о соотношениях фильтрационных расходов или проницаемостей слоев расчет ведется послойно (как в гомогенных средах). Более подробно рассмотрим интерпретацию в рамках стохастической расчетной модели (см. разд. 14.3.1), когда расчетными параметрами являются усредненная активная пористость пород π и коэффициент вариации проницаемости W_k . При этом используются решения (14.32), (14.33) и типовые кривые (см. рис. 14.8) — для опытов в радиальных потоках и по дуплетной схеме, соответственно. Однако первое расчетное приближение целесообразно осуществить с применением методик для гомогенных пород (см. разд. 16.2.1). В частности, ориентировочно значение параметра W_k определяется пересчет-

том по формуле $W_k \approx (2\delta_p/r)^{1/2}$ (где δ_p — расчетное значение константы гидродисперсии).

При низких ($< 0,5$) значениях W_k для обработки *опыта с наливом* можно использовать более простую расчетную зависимость (14.32а), допускающую линеаризацию выходной кривой. Так, аналогично микродисперсионной модели, линеаризация выходной кривой производится в координатах $\xi t \div t$. Тогда $W_k^2 = \operatorname{tg}^2 \varphi/2$ ($\operatorname{tg} \varphi$ — угол наклона прямой к оси ординат — времени).

Для интерпретации опытов в потоке, формируемом откачивающей скважиной, используется метод подбора параметров совмещением экспериментальных точек с типовыми кривыми, рассчитываемыми по формуле (14.33).

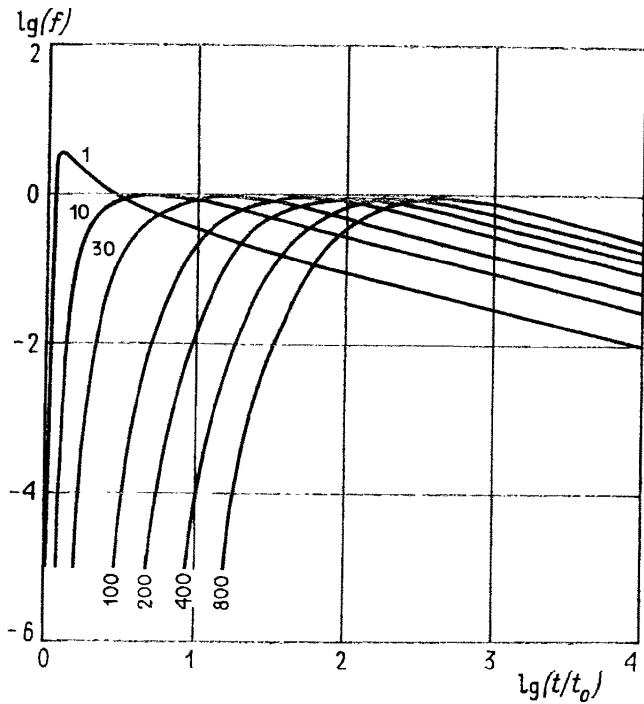


Рис. 16.4. Типовые кривые импульсного запуска в наблюдательную скважину при откачке (схема неограниченной емкости) (цифры у кривых — приведенный параметр массообмена).

Для интерпретации опытов с тепловым индикатором (схема с наливом) можно применить фундаментальное решение одномерной плоскопараллельной задачи (см. разд. 14.3.1); линеаризация выходной кривой производится в координатах $\xi t + t$. Точка пересечения прямой с осью времени t_o позволяет рассчитать коэффициент тепловой емкости пласта $n_t = qt_o/\pi r^2$, а по тангенсу угла наклона этой прямой к оси времени $\operatorname{tg} \varphi$ — характерный масштаб ковариационной функции $l_z = (3a_r)^{1/2}/2W_x |\operatorname{tg} \varphi|$; последний может контролироваться по данным анализа керна и скважинного каротажа.

Трециновато-пористые породы. Основными расчетными характеристиками являются трещиноватость пород n и параметры массообмена $\lambda_m = S_b^2 D_m n_o$ (для химического индикатора) или $\alpha_t \approx a_t S_b^2$ (для теплового индикатора). В некоторых случаях целесообразно оценка обобщенного параметра B_m (разд. 14.3.2).

Для интерпретации опытов с наливом представим решение (14.35) в форме:

$$\frac{t_o \sqrt{B_m}}{2 \sqrt{t - t_o}} = \xi = \operatorname{inverfc}(\bar{c}), \quad (16.8)$$

где $B_m = \lambda_m / n^2$, $t_o = \pi r^2 n / q$. Обработку целесообразно осуществлять путем нанесения опытных точек на график в координатах $\xi^{-2} + t$, что позволяет линеаризовать зависимость (16.8). По точке t_o пересечения прямой с осью времени определяется активная трещиноватость:

$$n = q t_o / \pi r^2, \quad (16.9)$$

а по углу наклона прямой к оси времени φ — параметр

$$\lambda_m = 4n^2 / \operatorname{tg} \varphi t_o^2. \quad (16.10)$$

Большое число наблюдательных скважин позволяет использовать для интерпретации графики комбинированного прослеживания $t_{\bar{c}} + r^2$ (где $t_{\bar{c}}$ — время регистрации фиксированного значения концентрации \bar{c} в наблюдательной скважине). Так, при высоких значениях

пористости блоков эти графики должны иметь линейный вид. Тангенс угла наклона γ прямой к оси абсцисс $t_{\bar{c}}$ позволяет рассчитать параметр:

$$\lambda_n = \frac{4q^2 \operatorname{inverfc}^2(\bar{C})}{\pi^2 \operatorname{tg} \gamma}. \quad (16.11)$$

При обработке результатов пакетного запуска, согласно решению (14.43), используются «пиковые» значения C_{\max} и t_{\max}

$$n = \frac{q(t_{\max} - t_n)}{\pi r^2}; \quad \lambda_n = \frac{4n^2 \xi_{\max} t_n}{t_o^2}, \quad (16.12)$$

где $\xi_{\max} = \operatorname{inverfc}(\bar{C}_{\max})$; t_n — длительность запуска пакета. Формулы (16.12) справедливы для условий, когда гидродисперсия по трещинам не оказывает существенного влияния на скорость переноса концентрационной волны (см. разд. 14.3.2).

Для опытов с наливом теплового индикатора представление решения в форме (14.50) допускает также линеаризацию выходной кривой. Учитывая, что обычно выполняется условие $t \gg \pi r^2 n/q$, активной трещноватостью n в решении (14.50) можно пренебречь и для аргумента ξ функции \bar{T} справедливо выражение

$$\xi = -A \ln [0,5 (\bar{t} + 1)] - B, \quad (16.13)$$

где

$$\bar{t} = t/t_{\text{от}}, \quad t_{\text{от}} = \pi r^2 n_{\text{от}}/q, \quad n_{\text{от}} = C_s^o/C_f^o \quad (16.13a)$$

Интерпретацию опытных результатов удобно проводить с помощью графика в координатах $\xi + z$ [$z = \ln (0,5t/t_{\text{от}} + 0,5)$], который при правильно подобранном значении величины $t_{\text{от}}$ ($n_{\text{от}}$), должен иметь линейный вид [2]. Тангенс угла наклона φ к оси абсцисс z отвечает коэффициенту A уравнения (16.13), что позволяет, используя графическую зависимость (см. рис. 14.10), определить значение

безразмерного аргумента η , а по нему — коэффициент объемного теплообмена блоков: $\alpha_t = \eta / t_{\text{от}}$

Если в процессе опыта с наливом наблюдается нарушение плоскорадиальной структуры фильтрационного потока, обусловленное наложением естественного фильтрационного поля или проявлением плановой анизотропии пласта, то при расчетах миграционных параметров вносится поправка для характерных времен t_o ($t_{\text{от}}$) и t_{\max} (см. разд. 14.1.4); при этом, однако, предполагается, что скорость естественного потока v_e и его направление, а также коэффициент анизотропии κ и ориентация главных ее осей установлены независимыми способами.

Интерпретация результатов дуплетных опытов осуществляется в общем случае при помощи типовых графиков, представленных на рис. 14.11. Однако, если в эксперименте зафиксирована, в частности, выходная концентрация $\bar{c} = 0,5$, то для начальной обработки результатов опыта рекомендуется использовать приближенное решение (14.57): из него можно сразу найти ориентировочное значение λ_m :

$$\lambda_m \approx 0,04 \left(\frac{q}{r^2} \right)^2 t_{0,5}, \quad (16.14)$$

а затем по более ранним участкам выходной кривой ($\bar{c} < 0,1-0,2$) подобрать удовлетворительное значение n с помощью формулы (14.57). Для второго приближения можно использовать непосредственно кривые, приведенные на рис. 14.11: задаваясь фиксированным значением $n(t_o)$, определяют $\bar{t} = t / t_g$ ($t_g = \pi r^2 n / 3q$); затем опытные точки наносят на типовой график в координатах $\bar{c} \div \lg \bar{t}$ и по эталонной кривой графика $\bar{\lambda}_m = B_m n^2$. Если выходная кривая не соответствует характеру типовых графиков, то принятые значения корректируются и опытная кривая перестраивается заново. При этом главный упор должен делаться на надежное определение параметра λ_m .

При обработке дуплетных опытов с тепловым индикатором используются типовые кривые ($\beta = 0, \eta$), приведенные на рис. 14.12. Предварительно по времени $t_{0,5}$ прихода температурного фронта $\bar{T}_c = 0,5$ определяют отношение теплофизических характеристик $n_{\text{от}} = C_b^0/C_e^0 = qt_{0,5}/\pi r^2$. Затем, задаваясь несколькими фиксированными значениями параметра теплообмена α_r , опытные точки наносят на типовой график в координатах $\bar{T} + \alpha_r t$ (см. рис. 14.12), рассчитывая попутно для принятых значений α_r безразмерный комплекс η . Добиваясь удовлетворительной аппроксимации одной из пересчитанных опытных кривых эталонной (величина ее должна совпадать с ранее определенным значением η), выбирают константу α_r . Если в опыте не была зафиксирована относительная температура $\bar{T}_c = 0,5$, то методом последовательных приближений подбирают одновременно два параметра — $n_{\text{от}}$ и α_r .

Для обработки импульсных запусков солевого индикатора в наблюдательные скважины при откачке используются типовые кривые на рис. 16.4 [1], так что опытные точки наносятся на график в координатах $\lg(F) \div \lg(t)$. При этом в исходном соотношении (16.6) необходимо положить:

$$F \equiv F(c, t) = \frac{4Qt}{M}, \quad (16.15)$$

$$f \equiv f(t_r, \lambda_r) = [t_r \sqrt{\lambda_r} (t_r - 1)^{3/2}] \exp[-\frac{\lambda_r}{4(t_r - 1)}]. \quad (16.15a)$$

По сдвигу осей ординат (A) находится трещиноватость $n = 10^4 Q/\pi m^2$, а по шифру выбранной типовой кривой определяется параметр массообмена $\lambda_m = \lambda n^2/t_o$ (для блоков изометрической формы).

Наконец, при интерпретации односкважинного опробования, базирующейся на формуле (14.63), одновременно подбираются два комплексных параметра — δ_L/n^2 и λ_m/n^2 . Для ориентировочной оценки величины $B_m = \lambda_m/n^2$ используется формула

$$\bar{\Delta c} = e^{\lambda_m^{**}} \operatorname{erfc} \sqrt{\lambda_m} t^{**}, \quad (16.16)$$

где $\bar{\Delta c}$ отвечает снижению относительной концентрации индикатора в пласте в области, примыкающей к скважине, за время t^{**} (период «выставивания»). Значение

$$\bar{\Delta c} \approx 1 - \frac{c' - c^o}{c_o - c^o}, \text{ где } c' \text{ — концентрация в начальный пе-}$$

риод откачки (c^o — фоновое значение). Далее, по формуле (14.63) подбирается значение δ_L/n^2 , наилучшим образом аппроксимирующее выходную кривую.

16.2.3. Анализ чувствительности индикаторных кривых

Любая интерпретация опытных результатов, сколь бы надежной она поначалу не представлялась, является неполной, если она не замыкается на анализе возможных погрешностей рассчитываемых параметров. Такой анализ может основываться на исследовании чувствительности выходных данных по отношению к определяемым параметрам. Так, при рассмотрении данных индикаторного опробования в радиальной потоке трещиновато-пористого пласта на уровне расчетной схемы неограниченной емкости (14.35), погрешности в оценке параметров n и λ_m могут быть определены по формулам:

$$\delta n = \frac{\bar{\Delta C}}{\bar{K}_n}; \quad \delta \lambda_m = \frac{\bar{\Delta C}}{\bar{K}_\lambda}, \quad (16.17)$$

$$\bar{K}_n = \frac{\partial \bar{C}}{\partial n} \cdot \frac{n}{\bar{c}}, \quad \bar{K}_\lambda = \frac{\partial \bar{C}}{\partial \lambda_m} \left(\frac{\lambda_m}{\bar{c}} \right), \quad (16.17a)$$

где $\bar{\Delta C}$ — погрешности измерения относительной концентрации \bar{c} ; \bar{K}_n и \bar{K}_λ — коэффициенты относительной чувст-

вительности — см. графики на рис. 16.5, которые могут рассматриваться в качестве типовых при определении относительных погрешностей расчета соответствующих параметров.

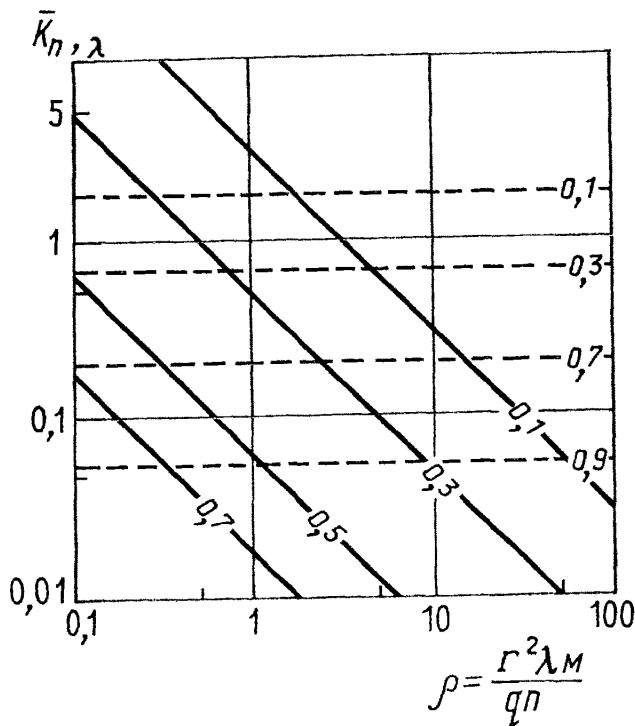


Рис. 16.5. Типовой график параметрической чувствительности для расчетной схемы неограниченной емкости (шифры прямых — значения относительной концентрации; сплошными линиями показаны данные для K_n , пунктирными — для K_λ).

Из анализа графиков прежде всего следует, что чувствительность системы в значительной степени определяется значением регистрируемой относительной концентрации \bar{C} , причем минимальным значениям \bar{C} отвечают максимальные коэффициенты относительной чувствительности \bar{K}_n и \bar{K}_λ . Это ясно также из физических представлений: малым наблюдаемым концентрациям отвечает период наиболее интенсивного массообмена между трещинами и блоками, так что наиболее рельефно идентифицируются именно параметры, характеризующие этот процесс, — начальные участки индикаторных кривых особенно чувствительны к изменениям параметров n и λ_μ .

Построенные графики (рис. 16.5) иллюстрируют также еще одну важную закономерность — характер влияния на чувствительность системы безразмерного параметра $\eta = \frac{\lambda_\mu}{n} t_o$, отражающего соотношение между диффузионной и конвективной составляющими массового потока: колебания значений η сказываются только на относительной чувствительности индикаторных кривых к изменению параметра активной трещиноватости \bar{K}_n , но не влияют на коэффициент \bar{K}_λ при прочих равных условиях. Из анализа графической зависимости следует, что относительная чувствительность индикаторных кривых уменьшается с ростом интенсивности массообмена между трещинами и блоками, а также при снижении скорости фильтрации (расхода нагнетания Q индикатора в пласт); к такому же результату приводят увеличение расстояния r между инъекционной и наблюдательной скважинами (причем зависимость n от r наиболее резкая) и, наконец, снижение значений собственно параметра n .

Представляет определенный интерес и сопоставление параметров K_n и K_λ между собой при разных значениях η : при малых η чувствительность выходных данных к изменению n может быть существенно выше, чем к изменению коэффициента λ_μ ; наоборот, при больших η значения \bar{K}_λ , как правило, превышают \bar{K}_n .

Чувствительность может связываться и с характерным временем массопереноса: для расчетной схемы неограниченной емкости таким временем является безразмерный параметр $t = (t - t_o)/t_o$ (где $t_o = \pi m r^2 n / Q$). Чувствительность системы значительно возрастает при

уменьшении t_0 , что достаточно понятно и в свете изложенного ранее. Следовательно, чувствительность других предельных схем массопереноса (сосредоточенной емкости и асимптотической), описывающих более поздние этапы экспериментов, оказывается существенно ниже, чем у рассматриваемой схемы.

Из приведенных результатов становится ясным, что от пространственно-временного диапазона интерпретируемых данных миграционного опробования в значительно степени зависит и точность оценки миграционных параметров. Как следует из анализа, сильнее всего изменения характеристик опыта сказываются на точности оценок коэффициента трещиноватости: погрешность δp резко возрастает при удалении точки наблюдения от инъекционной скважины и с уменьшением расхода нагнетания, т.е. при смещении процесса массопереноса при опробовании в диффузионную область; по этой же причине точность определения p снижается при замене солового индикатора на тепловой.

Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что в этой группе опытов оценка миграционных параметров не должна связываться только с наиболее чувствительными (начальными) участками индикаторных кривых, так как здесь может проявляться ряд трудноучитываемых искажающих факторов. Например, для рассматриваемой схемы неограниченной емкости начальные участки выходной кривой оказываются малопригодными для интерпретации, ибо они сильнее всего искажены гидродисперсией по трещинам, не учитываемой расчетной схемой. Кроме того, гидрохимическая инерционность наблюдательных скважин не позволяет достаточно надежно регистрировать первые этапы прихода индикатора к точке наблюдения.

Следовательно, планирование ОМО с позиций чувствительности системы должно заключаться в подборе оптимальных опытных характеристик (расстояний между скважинами, расхода нагнетания, типа индикатора) по вероятным значениям миграционных параметров, не выходя за рамки допустимых параметрических погрешностей и в то же время обеспечивая возможность интерпретации участков индикаторных кривых, наиболее близко отвечающих принятой расчетной схеме.

16.2.4. О привлечении математических моделей к планированию и интерпретация ОМО

Математические (численные и численно-аналитические) методы моделирования фильтрации и массопереноса находят все более широкое применение в гидрогеологической практике. Начинается внедрение этих методов и в сферу анализа данных индикаторных опробований, хотя специализированных программ явно недостаточно и большинство из них мало известны в производственных организациях. Тем не менее, при корректной схематизации гидрогеологических условий и правильной математической формулировке задачи, такой анализ может базироваться и на достаточно разработанных программных средствах, предназначенных для моделирования традиционных задач геофильтрации и миграции в двух- и трехмерной постановке (см. разд. 10.5). Основное внимание здесь должно быть уделено вопросам надежности аппроксимации на сеточных моделях эксплуатационных и наблюдательных скважин. Во всяком случае, не вызывает сомнения, что работы в этом направлении должны включать:

1) модельное планирование индикаторных экспериментов, что предполагает: а) сопоставление эффективности различных опытных схем — «проигрывание» на едином модельном «шаблоне» различных вариантов воздействия на пласт (например, кустовое нагнетание, с одной стороны, и дуплетный эксперимент, — с другой); б) выбор режимов опробования и схем размещения наблюдательных скважин;

2) собственно интерпретацию выходных кривых с прямой оценкой и учетом факторов, трудно поддающихся описанию в рамках аналитических моделей (например, влияние фильтрационной неоднородности, взаимодействие опытного возмущения и бытового потока подземных

вод, колебание концентрации индикатора и дебита его нагнетания в ходе опыта и некоторые другие);

3) анализ чувствительности эксперимента по отношению к определяемым параметрам в рамках различных экспериментальных схем.

16.3. Примеры интерпретации индикаторных опробований

Пример 1. Миграционное опробование водоносного горизонта, приуроченного к трещиновато-пористым меловым породам, проводилось по схеме налива в центральную скважину с прослеживанием за движением индикатора по скв. 1 и 2, удаленным от нее на расстояния 15 и 20 м соответственно. Предварительно во всех скважинах был проведен расходометрический каротаж, в результате которого была выделена верхняя, наиболее проницаемая, зона мощностью $m = 3$ м, определявшая практически всю проводимость пласта (его суммарная обводненная мощность составляет около 20 м). Можно предположить, что в процессе опыта оценивались параметры именно этой зоны. Скорость фильтрации естественного потока v_e , по данным резистивиметрии скважин, составила 0,2 м/сут.

В качестве индикаторов использовались слабоконцентрированные растворы поваренной соли и высокомолекулярного соединения — полиакриламида (ПАА). Индикаторы вводились после достижения режима налива, близкого к квазистационарному, при расходе $Q = 225$ м/сут (удельный дебит налива $q = Q/m = 75$ м²/сут). Полученные выходные кривые по скв. 1 и 2, пересчитанные на относительные концентрации, приведены на рис. 16.6а.

На индикаторных графиках для хлор-иона достаточно определенно (по их резкой асимметрии относительно точки средней относительной концентрации $\bar{c} = 0,5$) диагностируется проявление эффекта двойной пористости: по прошествии первых часов опыта на перенос индикатора заметно влияет процесс его молекулярной диффузии в пористые блоки. Этот процесс становится особенно ощущимым при сравнении с характером миграции ПАА, проникающая способность которого в поры блоков весьма низкая (он ведет себя подобно индикатору в трещиноватой среде). Обработка выходных кривых

для ионов хлора осуществлялась путем линеаризации зависимости (14.35). Из рис. 16.6б видно, что результаты достаточно хорошо согласуются с теоретической зависимостью. Параметры, рассчитанные графоаналитическим методом с использованием значений t_0 и $\operatorname{tg} \varphi$ по формулам (16.9), (16.10), таковы: по скв. 1- $n = 0,003$, $\lambda_m = 4,3 \cdot 10^{-4}$ сут $^{-1}$; по скв. 2- $n = 0,004$, $\lambda_m = 2,8 \cdot 10^{-4}$ сут $^{-1}$.

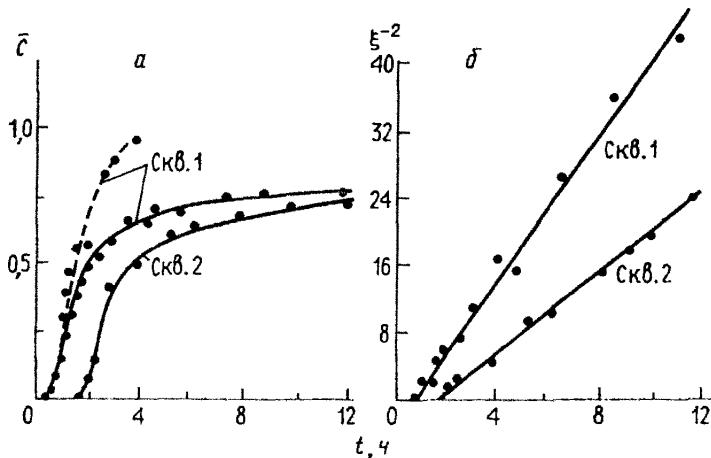


Рис. 16.6. Графики изменения относительных концентраций индикаторов в наблюдательных скважинах (а) и представление опытных данных при графо-аналитическом способе их интерпретации (б); сплошные линии — содержание хлор-иона, пунктирная — ПАА.

Лабораторными опытами были установлены коэффициенты молекулярной диффузии в блоках $D_m = 5 \cdot 10^{-5}$ м 2 /сут и пористость последних $n = 0,45$. Эти данные позволяют определить по известным значениям λ_m величину удельной поверхности блоков S_b , которая составила в среднем 4 м^{-1} , что в пересчете на средний размер блока t_b изометрической формы отвечает $t_b \approx b/S_b = 1,5$ м. В то же время, обработка выходной кривой для ПАА по схеме микродисперсии дала

расчетные значения активной трещиноватости $n = 0,005$ и параметра микродисперсии $\delta_L = 1$ м. Как видно, значения параметров, определенные по различным индикаторам, оказались вполне сопоставимыми, что является подтверждением вполне приемлемого качества опыта. Анализ чувствительности (см. разд. 16.2.3) позволил оценить возможный уровень погрешностей результатов: $\Delta n \approx \Delta L_m \approx 10-15\%$ (при погрешностях в определении содержания ионов хлора 5-7%).

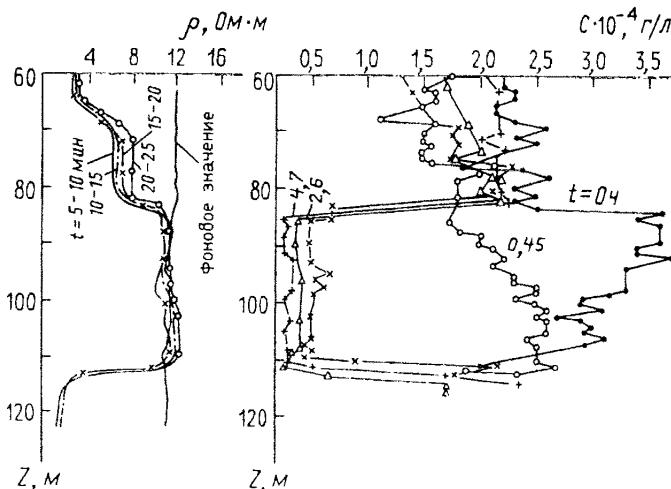


Рис. 16.7. Результаты резистивиметрического (при искусственном засолении) и флуориметрического (при наливе чистой воды после опыта) каротажа наблюдательной скважины (шифр кривых — время от начала опыта, ч).

Пример 2. Индикаторный опыт^{*} по схеме с наливом проводился в водоносном горизонте суммарной мощностью 65 м, приуроченном к трещиноватым известнякам; расход налива $Q = 2120 \text{ м}^3/\text{ч}$. В качестве индикатора использовался флуоресцеин ($C_0 = 8,76 \cdot 10^{-4} \text{ г/л}$); кроме того, учитывая разницу в температурах нагнетаемой и пластовой воды

* Параметр δ_L по своему физическому содержанию должен коррелировать с средним размером блока $\tau\delta$.

** Эксперимент проводился на опытно-методическом полигоне ВСЕГИНГЕО «Петушки» совместно с сотрудниками этого института.

($\Delta T = 1,1 - 1,2^{\circ}\text{C}$), для интерпретации опыта привлекались термометрические данные. Наблюдения за миграцией жидкости проводились в скв. 155, расположенной на расстоянии $r = 15$ м от центральной скв. 153, посредством отбора проб с различных глубин, а также флуориметрического и термометрического каротажа. Абсолютные погрешности замеров концентрации в заданном диапазоне составляют не более $2 \cdot 10^{-5}$ г/л, температуры $-0,05^{\circ}\text{C}$.

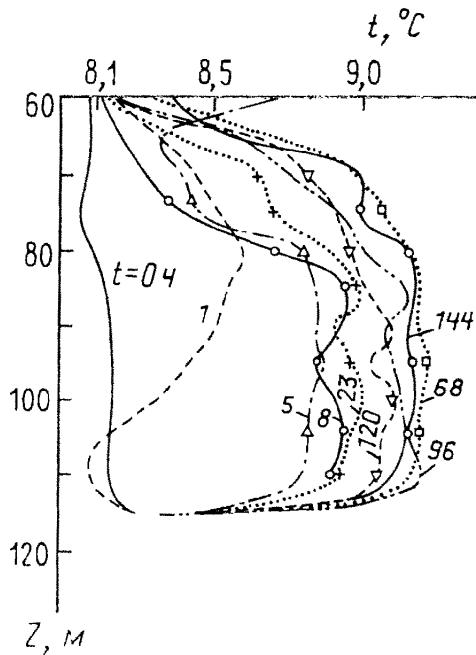


Рис. 16.8. Результаты термометрического каротажа наблюдательной скважины (шифры кривых — время от начала опыта, ч).

Анализ каротажных диаграмм (рис. 16.7 и 16.8) позволяет выделить в нижней части суммарно опробуемого горизонта интервал мощностью около 30 м, в пределах которого и наблюдались все значимые изменения концентрационной и температурной функций; это дает воз-

можность установить значение удельного расхода налива:
 $q \approx 71 \text{ м}^2/\text{сут.}$

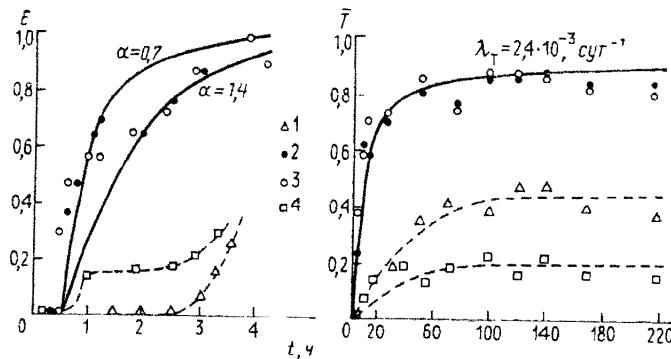


Рис. 16.9. Данные замеров концентрации флуоресцина (а), температуры (б) и их аппроксимация теоретическими кривыми (сплошные линии).

Выходные кривые по флуоресценции (первый этап опыта — рис. 16.9а) характеризуются весьма быстрым нарастанием концентрации индикатора, однако в области $\bar{c} > 0,7-0,8$ наблюдается заметное выпягливание концентрационных функций. На первый взгляд, характер индикаторных графиков не противоречит закономерностям изменения концентрации в пласте гетерогенных, трещиновато-пористых пород, так что предварительная обработка опыта дает значения $n = 0,003$, $\lambda_m = 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$. Вместе с тем к этому результату следует относиться осторожно: критерий (14.68) не выполняется и поэтому можно ожидать заметного влияния на результаты опытов гидрохимической инъекционности наблюдательной скважины (см. разд. 14.4). Контролирующим здесь является параметр α (см. формулу (14.64а)), расчетное значение кото-

* Точки 1 и 4 на графиках (см. рис. 16.9) отвечают слабофильтрующим зонам разреза (см. рис. 16.7 и 16.8).

рого в нашем случае (при $r_n = 0,054$ м и $\xi = 2$) составляет 1,4. Задаваясь этим значением, а также заведомо заниженной величиной $\alpha = 0,7$, рассчитаем по формуле (14.67) теоретические кривые для схемы поршневого вытеснения (при $\lambda_m = 0$). Как видно из графика (см. рис. 16.9,а), расчетные кривые удовлетворительно аппроксимируют опытные данные. следовательно, характер индикаторных графиков во многом определяется эффектами инерционности измерительной системы, а дисперсия носит подчиненное значение. таким образом, опыт с красителем оказался малочувствительным к оценке собственно миграционных параметров водоносного пласта.

Этот недостаток опыта устраняется в значительной степени данными теплового воздействия на пласт (см. рис. 16.8 и 16.9,б). По сравнению с флуоресцином, температурные кривые имеют более плавный (растянутый во времени) характер, что говорит о заметном теплообмене между трещинами и блоками. На рис. 16.9,б приведена кривая, рассчитанная по решению Ловерье при $\lambda_t = S_b^2 a_b \times (C_b^0/C_f^0)^2 = 2,4 \cdot 10^{-3}$ сут⁻¹; $n = 0,002$. На эту кривую хорошо укладывается большинство экспериментальных точек в пределах проницаемой зоны пласта (см. рис. 16.8). Использование предпосылки неограниченной тепловой емкости блоков здесь оправдано критерием (3.32). Влияние инерционности скважины для теплового индикатора несущественно — согласно (14.68); заведомо невелика и искажающая роль гидродисперсии в трещинах — см. критерий (15.2).

Табличные значения $a_b = 0,015$ м²/сут и $C_b^0/C_f^0 = 0,5$ позволяют рассчитать удельную поверхность блоков S_b , равную 0,8 м⁻¹ (при $D_m = 3 \cdot 10^{-5}$ м²/сут и $n_o = 0,15$), т.е. трещиноватые породы обладают довольно низкими массообменными свойствами. Следовательно, можно предположить, что изучение их миграционных параметров при помощи химических индикаторов наталкивается здесь на трудности принципиального характера. В частности, можно показать (см. 15.2), что надежное определение значения λ_m требует нереального увеличения масштаба опыта.

В целом, полученные результаты служат убедительной иллюстрацией перспективности применения теплового индикатора при опробовании водоносных пластов. Кроме того, еще раз убеждаемся в высокой эффективности скважинных методов прослеживания

индикаторных возмущений *in situ*, позволяющих попутно проводить дифференциацию разреза по проницаемости.

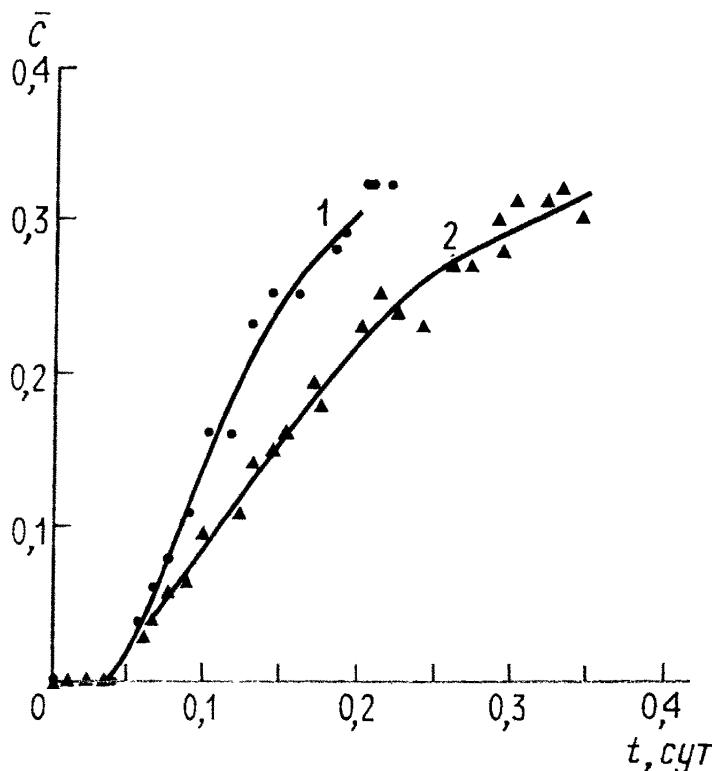


Рис. 16.10. Выходные кривые дуплетного опыта: 1 и 2 — первый и второй опытные режимы.

Пример 3. Для определения миграционных параметров трещиноватых меловых пород использовалась экспериментальная схема «дуплет». В процессе опыта вода из откачивающей скважины смешивалась в специальном резервуаре с раствором поваренной соли и поступала с тем же расходом в одну из инъекционных скважин. Опыт проводился при двух режимах: 1) $Q = 770 \text{ м}^3/\text{сут}$, $r = 40 \text{ м}$; 2) $Q = 460 \text{ м}^3/\text{сут}$.

$\text{м}^3/\text{сут}$, $r = 34 \text{ м}$. Средняя длина рабочих интервалов m , выделенных по данным резистивиметрического и расходометрического каротажа, составила 12 м при общей мощности меловых пород, вскрытых скважинами, 40 м. Максимальная концентрация индикатора по хлориону составляла 700 мг/л. Индикаторные кривые по данным химических анализов воды из откачивающей скважины приведены на рис. 16.10а.

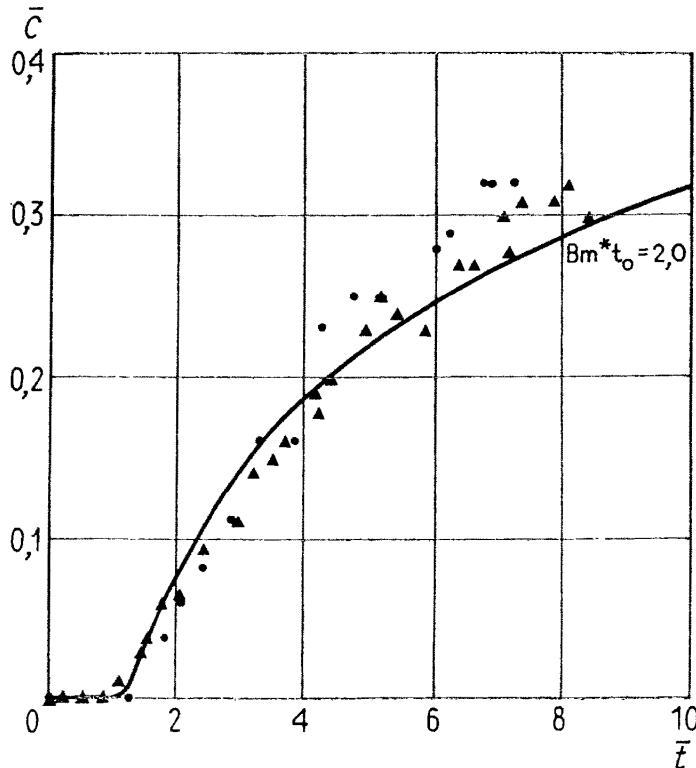


Рис. 16.11. Аппроксимация опытных точек (рис. 16.10) типовой кривой ($B_m t_0 = 2,0$).

Для ориентировочной оценки миграционных параметров n и $B_m(\lambda_m)$ используется сначала формула (14.57), причем значение t_0

связывается с моментами прихода первых порций индикатора, когда концентрация \bar{c} измеряется первыми процентами. Затем результаты расчетов уточняются путем нанесения опытных точек на типовой график в координатах $\bar{c} + \lg t$ (см. рис. 16.11); номер этого графика должен отвечать рассчитанному значению $\lambda = B_m t_o$. Наилучшее соответствие характеру теоретической зависимости дают значения $t_o = 0,03$ сут ($n = 0,0011$) и $t_o = 0,04$ сут ($n = 0,0013$) для первого и второго режимов соответственно (как видно, эти значения вполне соответствуют реальным величинам, зафиксированным в эксперименте), причем опытные точки более-менее удовлетворительно аппроксимируются единой типовой кривой при $\lambda = 2$. Отсюда, среднее значение параметра B_m равно 57 сут $^{-1}$, а $\lambda_m = B_m n^2 \approx 8 \cdot 10^{-5}$ сут $^{-1}$. Важно, что обработка кривых, полученных при существенно различных опытных режимах, приводит к весьма близким результатам; это свидетельствует об относительной достоверности расчетных параметров.

Пример 4. Иллюстрацией приложения рассмотренных ранее методических приемов интерпретации опытов при откачках может служить пример обработки крупномасштабного полевого эксперимента на опытно-методическом полигоне ВСЕГИНГЕО «Петушки» [1]. В ходе откачки из четырех близко расположенных скважин, оборудованных на қлязьминский водоносный горизонт, с суммарным дебитом 21100 м 3 /сут был осуществлен запуск в импульсном режиме 9 кг флуоресцина в наблюдательную скважину, расположенную на расстоянии 125 м от группы центральных скважин. Индикатор был зафиксирован в откачиваемой воде всех четырех скважин на уровне, существенно превышающем фоновое содержание. Результирующая выходная кривая (рис. 16.13), рассчитанная по средневзвешенным концентрациям (по расходу — $c = \sum c_i Q_i / Q$) в отдельных скважинах, характеризуется сильно асимметричной формой с выполненным задним участком.

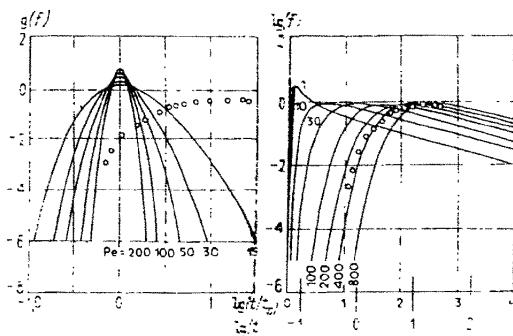


Рис. 16.12. Сопоставление опытных данных (импульсный запуск на полигоне «Петушки») и типовых кривых: а — схема микродисперсии (цифры у кривых — параметр Пекле) и б — схема неограниченной емкости (цифры у кривых — приведенный массообменный параметр).

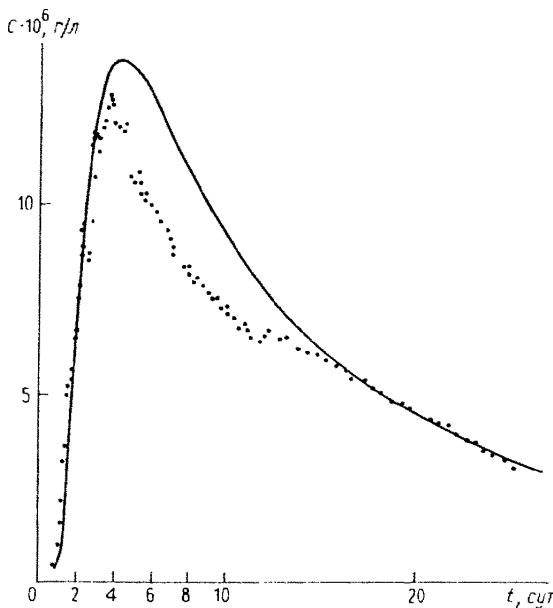


Рис. 16.13. Результаты обработки индикаторного эксперимента («импульсный» запуск флуоресцина при откачке) на опытно-методическом полигоне «Петушки»: 1 — экспериментальные данные, 2 — теоретическая кривая для трещиновато-пористого пласта.

Анализ опытной кривой с помощью типовых графиков для гомогенной среды (рис. 16.12а) показал полную неприемлемость модели микродисперсии. В то же время, сопоставление типовых кривых на рис. 16.12б с опытными точками указывает на соответствие режима переноса индикатора модели гетерогенного пласта. По сдвигу осей ординат опытного и типового графиков при $\lambda = 400$ находим $n = 9 \cdot 10^{-4}$, соответственно $\lambda_m = \bar{\lambda} n^2 / t_0 = 5,2 \cdot 10^{-3}$ сут⁻¹. Далее можно убедиться, что теоретическая кривая решения (14.58) вполне удовлетворительно описывает поведение индикаторного графика полевого эксперимента (рис. 16.13).

Таким образом, хотя метод типовых кривых имеет ряд недостатков (в данном случае в силу экстремального характера выходных кривых), он в то же время обладает диагностическим преимуществом, позволяя на качественном уровне контролировать соответствие режима проведения опыта выбранной расчетной схеме.

Пример 5. Рассмотрим на этом примере проявление профильной фильтрационной неоднородности песчаных отложений, опробованых индикаторными запусками при откачке и нагнетании пластовой воды (рис. 16.14). Кривая 1 отвечает пакетному запуску (продолжительность $t_n = 21$ ч) раствора NaCl с концентрацией ионов хлора $c_0 = 280$ мг/л; дебит налива Q составляет $20,7 \text{ м}^3/\text{ч}$. Кривая 2 соответствует импульсному запуску раствора NaCl: индикатор массой $M = 240$ кг (по хлору) был введен в пласт за $0,5$ ч при откачке из центральной скважины с дебитом $Q = 42,3 \text{ м}^3/\text{ч}$. Расстояние между инъекционной и наблюдательной скважинами r равно $12,8$ м. Длина фильтровых интервалов скважин, вскрывших нижнюю часть опробуемого пласта, $m = 10$ м; общая обводненная мощность песчаного пласта $m_{\Sigma} = 30$ м.

Несмотря на различия опытных режимов, выходные кривые (см. рис. 6.14) оказались довольно однотипными: все они характеризуются крутыми, монотонно восходящими ветвями и несколькими экстремумами второго порядка на нисходящих ветвях. Отмеченный характер выходных кривых позволяет однозначно диагностировать послойный режим переноса в неоднородном по разрезу пласте. Характерно, что предварительный гидрофизический каротаж (расходометрия и резистивиметрия скважин) не выявил фильтрационной неоднородности опробованной толщи; это, вообще говоря, свидетельствует о более высокой чувствительности индикаторных запусков по отношению к профильной неоднородности. Вместе с тем, данный

частный пример еще раз подтверждает вывод о неэффективности проведения в песчаных толщах опытов, специально ориентированных на определение миграционных параметров.

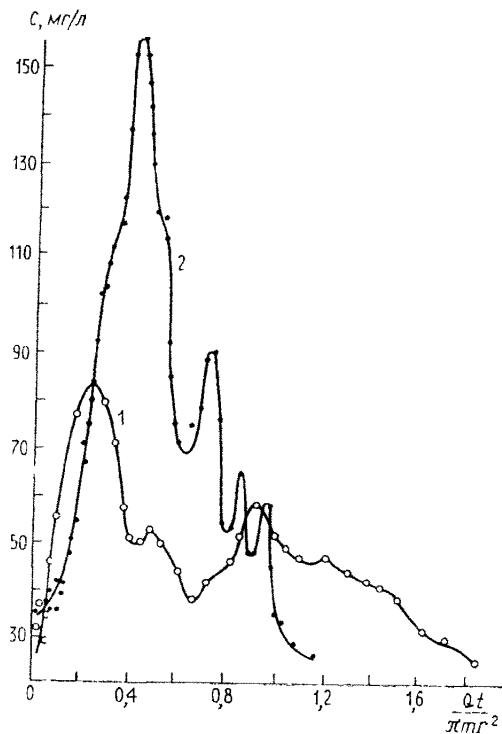


Рис. 16.14. Результаты индикаторного опробования при различных режимах запуска индикатора по радиальной схеме: 1 — пакетный запуск при наливе в центральную скважину, 2 — импульсный запуск в наблюдательную скважину при откачке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 16

1. Коносавский П.К., Мироненко В.А., Румынин В.Г. Разработка и апробация моделей индикаторного опробования комплексов трещиноватых пород. — Геоэкология, 1993, N3, с.104-124.
2. Рошаль А.А. Полевые методы определения миграционных параметров. Обзор ВИЭМС, сер. «Гидрогеология и инженерная геология». 1981. 61 с.
3. Bear J. Dynamics of fluids if porous media. Amer. Els.. Y., 1972. 764 p.
4. Leap D.I. Predicting behavior of contaminants in aquifers using apparent relative retardation of surrogates. «Environmental Geology», v. 22, 3, 1993, p.p. 201-204.

Опытно-миграционные наблюдения (ОМН) в водоносных пластах

ГЛАВА 17

Задачи и условия проведения ОМН

17.1. Роль и задачи ОМН

Наблюдения на участках действующего или предполагаемого загрязнения подземных вод (ЗПВ) имеют двойное назначение: они выполняют не только контрольные, но и опытные функции, обеспечивая детализацию, расширение представлений о возможных механизмах миграции загрязнений в районе, о расчетных моделях миграции и их количественных характеристиках; поэтому о них можно говорить как об опытно-миграционных наблюдениях (ОМН), являющихся, в этом смысле, продолжением гидрогеологической разведки.

Преимущества опытно-миграционных наблюдений перед ОМО с точки зрения изучения схем и параметров миграции определяются рядом обстоятельств: 1) естественным устранением или сглаживанием влияния пространственно-временных масштабных эффектов, обусловленных гетерогенностью среды; 2) максимальным приближением структуры фильтрационного поля к прогнозным условиям (здесь особенно важно отметить отражение в результатах наблюдений профильной анизотропии и неоднородности фильтрационных свойств); 3) проявлением в данных наблюдений техногенных факторов, неизбежно влияющих на процессы миграции, но весьма трудно учитываемых по результатам гидрогеологической

разведки (изменчивость проницаемости экранирующих техногенных отложений, плотностная конвекция и различные эффекты «самоочищения» подземных вод, техногенные изменения фильтрационных свойств водоносных пластов и т.д.); 4) возможностью привлечения для интерпретации опытно-эксплуатационных наблюдений дополнительной информации, связанной с изучением влияния фильтрационных и миграционных потоков на естественные физические (тепловые, электрические) поля.

Из отмеченных преимуществ вытекает не только повышенная достоверность изучения схем и параметров миграции при ОМН, но и принципиальная возможность оценки тех показателей, которые практически не определяются опытными опробованиями (прежде всего показателей поперечной дисперсии и неравновесных физико-химических процессов). В то же время, наблюдения за миграционными процессами часто позволяют получить независимые оценки скорости фильтрации (с выделением в разрезе ее продольной и поперечной составляющих) в различных точках, которая в данном контексте может рассматриваться также как исходный показатель миграции. Наконец, длительная миграция промышленных стоков часто сопровождается проявлением процессов гравитационной дифференциации, обычно не изучаемых при опытных опробованиях.

Вместе с тем, сказанное, конечно, не исключает целесообразности широкого использования результатов предварительных изысканий (в частности, ОМО) для планирования и интерпретации ОМН. В то же время, чрезвычайно важным является эффективное сочетание ОМН с иными видами гидрогеологических работ, проводимых в строительно-эксплуатационный период, которое, в частности, позволяет: 1) дать расшифровку фильтрационной схемы, отражающей гидродинамические условия как в водоносном пласте, так и на контурах бассейнов промышленных стоков, для чего осуществляются гидродинамиче-

ские наблюдения за режимом подземных вод и за интенсивностью утечек из технических водоемов; 2) установить численные значения параметров, контролирующих диффузионные обменные процессы в гетерогенных средах, а также выявить характер равновесных процессов физико-химического преобразования сточных растворов, для чего привлекаются лабораторные и полевые индикаторные эксперименты, позволяющие получить независимые оценки миграционных показателей и расширить возможности диагностики данных ОМН; 3) осуществить контроль за миграцией загрязнений и оценить надежность гидрохимического опробования при ОМН в целом, для чего наиболее эффективны гидрогеологические методы.

Особая важность тесного взаимодействия ОМН с режимными гидродинамическими наблюдениями обусловлена как общностью используемых средств (наблюдательных скважин), так и прямой зависимостью эффективности ОМН от полноты и качества информации о геофильтрационных условиях на объекте. С другой стороны, гидрогеохимические наблюдения часто предоставляют уникальные возможности для расшифровки геофильтрационной картины.

Наконец, ОМН лежат в основе наиболее эффективного — опытно-эксплуатационного — подхода к разработке и оценке результативности активных мероприятий по локализации или ликвидации источников загрязнения и реабилитации подземных вод.

17.2. Типизация условий проведения ОМН

Условия проведения режимных наблюдений за загрязнением подземных вод характеризуются высокой сложностью и исключительным разнообразием действующих факторов, что делает детальную типизацию упомянутых условий задачей чрезвычайной трудности. Поэтому далее попытаемся, с одной стороны, отыскать обобщенные категории, позволяющие отразить сразу ряд факторов, а с другой — выделить те из них, которые учитываются относительно независимо от всех остальных или редко сочетаются на практике. По первому аспекту наибольший интерес представляют следующие подразделения:

- а) по характеру источника загрязнения — поверхностные (приповерхностные)* техногенные источники загрязнения и подземные бассейны некондиционных вод естественного или техногенного происхождения: и те, и другие могут быть сосредоточенными (локальными, «точечными») и рассредоточенными (площадными);
- б) по характеру структуры миграционного потока — ореолы растекания, ореолы рассеяния и область инфильтрации загрязнений;
- в) по характеру мигрирующих загрязнений — трассеры, физически нейтральные стоки, тяжелые или легкие стоки.

По второму аспекту наиболее детальная типизация проводится только для условий потенциально опасных (контролируемых) загрязнений от поверхностных источников промышленных стоков. Причины такого ограничения достаточно просты:

* Предполагается, что речь идет о пластах, в которых необходимо сохранить нормальное качество подземных вод.

** Приуроченные к зоне аэрации.

1) загрязнения, *aприорно* квалифицируемые (для всего прогнозируемого периода эксплуатации объекта) как допустимое снижение качества подземных вод, не требуют постановки специализированной системы мониторинга — изучение изменений качества подземных вод может вестись в традиционных рамках режимных гидрогеологических наблюдений (включающих гидрохимическое опробование);

2) наблюдения за загрязнением, квалифицируемым как недопустимое ухудшение качественных показателей подземных вод, должны в каждом рассматриваемом случае тесно увязываться с конкретными инженерными мероприятиями, направленными на борьбу с загрязнением; в этих условиях мониторинг имеет целью прежде всего оценку эффективности инженерных решений и проводится в каждом конкретном варианте по узкоспециальной программе, в согласии с разработанной нами концепцией контролируемого загрязнения подземных вод ([1, 2]; гл. 25, т. 3);

3) поступление загрязнений из подземных бассейнов некондиционных вод должно контролироваться системами мониторинга, имеющими свою серьезную специфику и требующими в связи с этим отдельного рассмотрения (см. разд. 19.1.2).

Ниже дается наглядная схема, иллюстрирующая основные категории предлагаемой типизации (рис. 17.1). В ней особо выделяются потенциально опасные загрязнения, которые нуждаются в специализированных наблюдениях, проводимых в соответствии с концепцией контролируемого загрязнения подземных вод. Именно для этого варианта наблюдений и дается более развернутая типизация, которая начинается с дифференциации по характеру источников загрязнения.

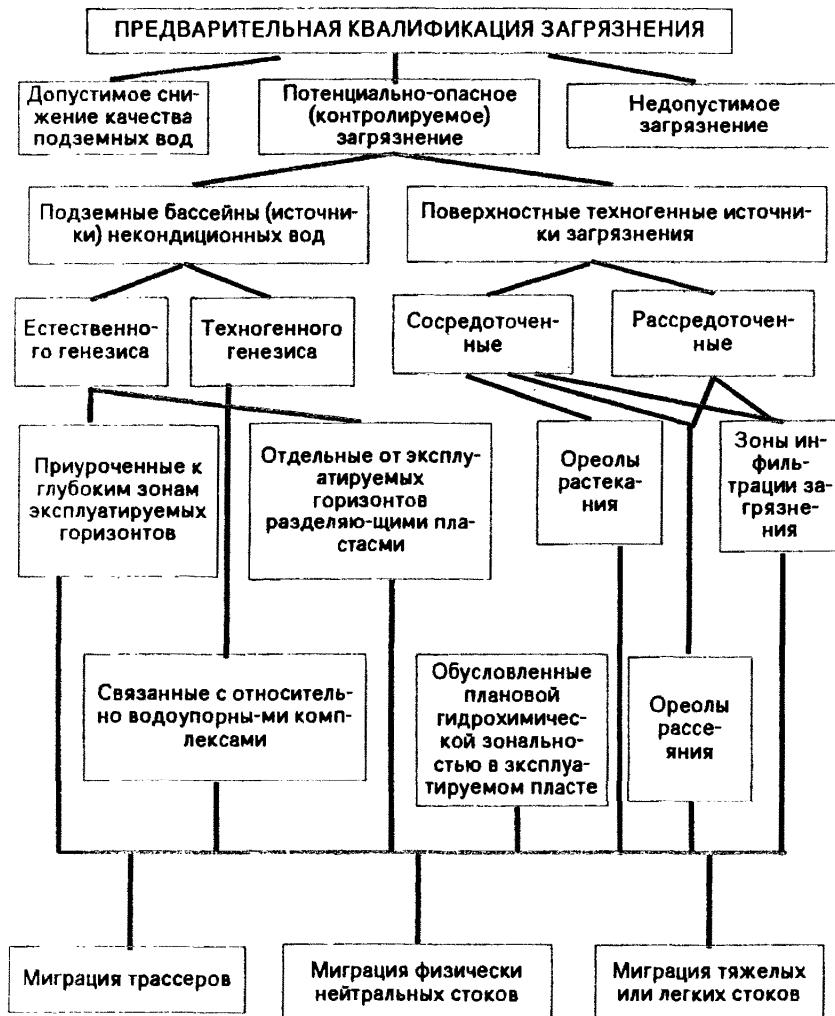


Рис. 17.1. Основные категории для типизации условий проведения режимных наблюдений за процессами загрязнения подземных вод

Поверхностные источники в подавляющем большинстве случаев носят техногенный характер; имеют довольно четкие границы ; располагаются на удалении от техногенных контуров разгрузки подземных вод, обычно существенно превосходящем мощность водоносного комплекса, что предопределяет развитие плановой фильтрации; сильно зависят по своему воздействию от защитных свойств покровных отложений и интенсивности инфильтрации через них; допускают, хотя бы в ограниченных масштабах, регулировку их связи с подземными водами путем различного рода экранирующих мероприятий; заметно отличаются по составу воды от исходного состава подземных вод, находящегося в сравнительном равновесии с горными породами, а это, наряду со значительными длиной и временем переноса, создает предпосылки для интенсивного самоочищения загрязненных подземных вод; имеют относительно длительную фазу «скрытого» загрязнения, не проявляющегося в эксплуатируемых водозаборных сооружениях; предопределяют сравнительно небольшие глубины проникновения основной массы загрязнений. Все это, вместе взятое, обычно резко отличает этот тип источников загрязнения от описанного ниже.

Подземные бассейны некондиционных вод, имеющие естественный генезис, располагаются чаще всего на сравнительно больших глубинах от исходного уровня подземных вод^{**}. В более редких случаях подземные образования некондиционных вод связаны с естественной плановой гидрохимической зональностью в проникаемых пластиах. Не исключается также искусственное возникнове-

* Наиболее частым исключением являются загрязнения, попадающие в подземные воды через атмосферу.

** При горном производстве возможны ситуации, когда приходится вести откачуку и непосредственно из этих бассейнов; в этом случае термин «загрязнение» носит несколько условный характер.

ние такого рода образований при растворении пород вследствие техногенного изменения физико-химической обстановки в водоносных пластах. Во всех вариантах решающим фактором, определяющим возможность и степень загрязнения, является водоотбор: процесс контролируется, главным образом, заглублением водоприемных выработок и интенсивностью водонаполнения. При этом наблюдения за изменением качества подземных вод существенно облегчаются благодаря возможности контроля непосредственно через водозаборные устройства, где, кстати, эти изменения отражены наиболее резко. «Скрытая фаза» загрязнения может быть относительно кратковременной, если, например, она отвечает лишь периоду подтягивания некондиционных вод из глубины водоносного пласта. В то же время, поступление некондиционных вод в эксплуатируемые горизонты из разделяющих слабопроницаемых толщ может иногда проявляться только после длительной эксплуатации водозабора.

Что же касается подземных источников некондиционных вод техногенного характера (аварийные скважины, подземные захоронения отходов — ниже уровня грунтовых вод, и т.п.), то в начальном своем состоянии они сходны по многим аспектам с поверхностными локальными источниками, кроме, конечно, сказанного о роли зоны аэрации и о глубинах проникновения. При мощных, постоянно действующих источниках такого рода, они могут со временем (по мере распространения загрязнения по пласту) все в большей мере приобретать черты,ственные подземным бассейнам природных некондиционных вод*. Из-за такого — смешанного — своего характера

* Подобного рода ситуации характерны, в частности, для анализируемых сценариев утечки радиоактивных отходов из проектируемых подземных репозиториев [3].

и относительно ограниченного развития соответствующих сетей наблюдений, этот тип источников загрязнения здесь пока особо не рассматривается.

Дальнейшая типизация для поверхностных источников развивается путем выделения двух характерных видов ореолов загрязнения — растекания и рассеяния. Первые, сопровождающиеся подчиненным развитием плановой поперечной дисперсии, характерны для гидродинамически активных источников загрязнения; наоборот, в развитии ореолов второго вида, характерных для гидродинамически пассивных источников, поперечная плановая дисперсия играет важнейшую роль (более четкие критерии такой дифференциации приведены ниже). Наряду с этими двумя характерными типами площадей загрязнения в целом, особо выделяется непосредственно прилежащая к источнику область инфильтрации (преимущественно вертикальной) загрязнений, играющая исключительно важную роль в их миграции.

Типизация подземных бассейнов некондиционных вод природного происхождения производится согласно условиям их залегания и, соответственно, особенностям формирования миграционных потоков в нарушенной гидродинамической обстановке. Так, при наличии некондиционных вод в нижних проницаемых зонах водоносного комплекса, эксплуатируемого существенно несовершенными по степени его вскрытия скважинами (выработками), миграция носит преимущественно профильный субвертикальный характер. В то же время в типизации отражена возможность упругого отжатия некондиционных вод из подстилающих слабопроницаемых толщ и (или) перетекания через них растворов с пониженным качеством из смежных водоносных комплексов; в этих вариантах в эксплуатируемом водоносном комплексе сохраняется преимущественно плановый характер миграции подземных вод смешанного состава. В сходной (плановой) постановке могут рассматриваться также задачи о смеще-

ния при водоотборе естественной площадной зональности в составе подземных вод.

Следующим шагом типизации является выделение трех типов мигрантов — стоков: трассеры (полностью нейтральные стоки), физически нейтральные и тяжелые (или, наоборот, легкие) стоки. Важность такой дифференциации, отражающей, в частности, роль процессов самоочищения и гравитационного перераспределения загрязнений, в первом представлении, достаточно очевидна; в дальнейшем она будет также подкреплена более обстоятельным обоснованием, а пока лишь отметим, что она весьма эффективно учитывает постепенное усложнение наблюдаемого физико-химического процесса.

Наконец, внутри каждой из выделенных категорий, при необходимости, учитываются различия в условиях наблюдений для двух основных литолого-генетических комплексов пород (пористых и существенно трещиноватых) при разных обобщенных характеристиках их профильной фильтрационной изменчивости (однородные, упорядоченно-неоднородные, неоднородные неупорядоченного строения). Не исключается, конечно, возможность учета внутри выделенных основных категорий типизации и других многочисленных факторов, не нашедших в ней прямого отражения.

Предложенная типизация позволяет систематизировать задачи режимных гидрогеологических наблюдений, состав, объемы и методику этих работ. Ясно, однако, что целый ряд категорий рассмотренной типизации нуждается в дополнительных разъяснениях, а главное, в обосновании соответствующими качественными и, по возможности, количественными критериями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 17

1. Мироненко В.А. О требованиях и подходах к реабилитации подземных вод на загрязненных территориях. Четвертые Толстихинские чтения. Научные материалы, Санкт-Петербург, 1995, с. 25-34.
2. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Опытно-миграционные работы в водоносных пластах. М., Недра, 1986, 280 с.
3. Fujikava Y., Fukui M. Application of simple model for assessment of undergound radionuclide migration. — Journal of Hydrology, 1993, v. 145, p.p. 125-164.

Принципы и методы теоретического анализа в связи с интерпретацией опытно-миграционных наблюдений

Интерпретация режимных наблюдений за качеством подземных вод требует достаточно ясных представлений о процессе миграции загрязнений в условиях конкретного объекта и о возможных теоретических моделях, описывающих этот процесс. Опыт показывает, что в противном случае допускаются серьезные просчеты даже в качественном понимании тенденции загрязнения, а следовательно, и в принципиальных схемах водоохранных мероприятий.

В этой главе не приводятся многочисленные аналитические решения, так как в зависимости от наличия конкретной информации и квалификации исполнителя, для планирования и интерпретации ОМН могут использоваться различные модели, подробный анализ которых дан в первой части настоящей книги. Здесь же рассмотрение ведется в основном на уровне качественного анализа процесса миграции и описывающих его расчетных моделей, построенных исходя из общих принципов схематизации (см. гл. 9). При этом важно подчеркнуть, что именно данные ОМН могут привести к принципиальному улучшению исходной модели в результате отказа от ряда грубых приближений, сделанных на первом этапе схематизации. Только в таких (на практике пока довольно редких) вариантах может оказаться целесообразным привлечение к последующим интерпретационным оценкам относительно сложных методов, в частности математического моделирования.

Последующее изложение дифференцируется согласно принятой ранее (см. разд. 17.2) типизации. При этом вопросы интерпретации наблюдений за подтягиванием некодиционных вод из подземных источников вынесены в разд. 21.3, так как данные таких наблюдений использу-

ются, в первую очередь, для уточнения фильтрационных свойств.

18.1. Миграция трассеров от поверхностных источников загрязнения

Выбор расчетных моделей основывается на элементах предварительной миграционной схематизации (см. гл. 9). Считается, что, за редкими исключениями, она позволяет свести реальную пространственную форму массового потока трассера к двумерной (профильно или плановой) или даже к одномерной. К этому побуждает и то обстоятельство, что для построения трехмерных моделей обычно имеющейся информации явно недостаточно.

Для ореолов растекания обычно можно ограничиться расчетом по отдельным лентам тока, не учитывая взаимодействия между ними за счет поперечной дисперсии. Тогда все оценки ведутся в рамках профильных моделей вдоль осевых линий таких лент тока. Для гомогенных комплексов эти оценки тривиальны, поэтому остановимся лишь на анализе гетерогенных систем.

18.1.1 Профильные модели для гетерогенных систем

В общем случае рассматриваемые здесь модели предполагают дифференциацию замеряемых значений концентрации по вертикали. Обращение к профильным двумерным моделям и обусловливается необходимостью учета такой дифференциации, вызванной: 1) неоднородностью в разрезе водоносных толщ, которая обычно определяет гетерогенный характер миграционного процесса в целом; 2) профильной двумерностью фильтрационного процесса; 3) поступлением вод иного состава (в частности, инфильтрационных) по площади распространения

водоносного пласта; 4) деформацией структуры массово-го потока вблизи бассейнов промышленных стоков и контуров разгрузки, существенно несовершенных по степени вскрытия водоносных комплексов, когда сам характер граничных условий определяет неоднородность гидрохимического разреза. Впрочем, последняя задача, требующая обычно привлечения математического моделирования, представляет больший интерес для ранних стадий развития ореолов рассеяния (см. разд. 9.3.2): вблизи бассейнов с заметной гидродинамической активностью достаточно быстро происходит субвертикальный «разнос» загрязнений по пласту конвективным путем вследствие сильной профильной деформации сетки движения подземных вод.

Исследование задач миграции в профильной постановке имеет первостепенное значение для комплексов *стратифицированных пористых пород*. Так, в существенно нарушенных гидродинамических условиях (например, когда формируются *ореолы растекания* от поверхностных бассейнов промстоков), для анализа данных по отдельным плановым лентам тока привлекаются профильные двумерные или квазидномерные модели (разд. 3.1), позволяющие выявить роль профильной неоднородности и гетерогенности пластов в формировании массово-го потока.

Первым этапом построения расчетной модели неоднородной среды, носящим, по существу, схематизационный характер, является представление изучаемых пород в виде упорядоченно-слоистой толщи. В этом случае выдержаные профильные зоны пласта могут рассматриваться в качестве базовых расчетных элементов, причем достигаемая на практике относительно невысокая детальность профильного расчленения разрезов позволяет, как правило, ограничиться моделями двух- и трехслойных пластов. В пределах каждого слоя почти всегда проявляются различные механизмы гетерогенного обмена, обус-

ловленного неоднородностью более высокого порядка, которые, однако, уже не могут быть заданы на модели в явном виде; они отражаются в обобщенных показателях продольного рассеяния.

Для первых периодов миграции справедлива расчетная схема послойного переноса. Обработка данных по каждому слою осуществляется с использованием зависимостей для гомогенных пород. При этом рассчитываются усредненные по слоям показатели v/n и D/n , дальнейшая расшифровка которых базируется на сведениях о гидродинамических характеристиках (коэффициенты фильтрации или независимые оценки скорости фильтрации).

По мере развития процессов загрязнения все большее значение приобретает обмен веществом между соседними слоями (в водоносном горизонте) и пластами, который происходит диффузионно-дисперсионным и/или конвективным путем; в связи с последним механизмом отметим, что при обосновании профильных моделей миграции должны учитываться площадная инфильтрация и перетекание через разделяющие слои. Вместе с тем, оценка по данным ОМН показателей межслоевого взаимодействия часто представляется мало реальной, ибо на практике не обеспечивается детальное прослеживание за изменением концентрации по мощности водоносного пласта, а балансовые оценки малоочувствительны к показателям попечерного обмена и не позволяют выявить физическую природу последних. Поэтому при построении интерпретационных моделей миграции в стратифицированных пластах целесообразно задаваться параметрами, контролирующими интенсивность межслоевого и межпластового обмена, опираясь на независимые их оценки по данным лабораторных определений, опытных работ и гидродинамических (в основном специализированных) наблюдений.

Так, если из анализа общей гидрогеологической ситуации следует, что ведущим механизмом обмена является молекулярная диффузия из хорошо проницаемого слоя в

подстилающий и перекрывающий его слои, то коэффициент диффузии должен задаваться по результатам лабораторных индикаторных опытов. Аналогично в моделях переноса может быть учтена роль процессов перетекания: вертикальная составляющая скорости фильтрации в разделяющих слоях определяется по данным режимных пьезометрических и гидрогеофизических (см. разд. 21.2.2) наблюдений. Таким образом, и на этом этапе миграции интерпретация данных ОМН сводится в основном к оценке параметров, определяющих интенсивность конвекции трассера по напластованию пород.

На весьма длительных этапах миграции поперечная дисперсия и процессы перетекания приводят к выравниваю концентрационного профиля в пласте (поэтому здесь лучше ориентироваться на суммарное гидрохимическое опробование), что позволяет рассматривать данные ОМН в свете одномерных асимптотических расчетных моделей диффузионного типа (см. разд. 3.1.1). При этом определяются параметры миграции - суммарная емкость пород n^* (параметр, близкий к средневзвешенной по мощности пласта пористости) и коэффициент продольной макродисперсии D^* , в котором эффективно учитываются все кинетические механизмы межслоевого взаимодействия.

Относительная простота и доступность анализа данных эксплуатационных наблюдений на основе одномерных асимптотических моделей не должны затушевывать того обстоятельства, что они являются идеализацией, оправданной лишь при пренебрежении плановой дисперсией и выполнении достаточно жестких критериев относительно профильного рассеяния. В частности, из теоретического анализа (см. разд. 3.1.1) следует, что усредненные (квазигомогенные) схемы здесь применимы на этапах миграции, по продолжительности нередко выходящих за период проведения режимных наблюдений; впрочем, во многих случаях наступление асимптотического режима

ускоряется реальной трехмерностью фильтрационного течения (см. разд. 3.3).

Для гетерогенных трещиновато-пористых сред двумерные профильные модели не находят столь широкого применения. Если в разрезе и наблюдается закономерное изменение проницаемости, то субвертикальная конвекция и относительно высокая интенсивность поперечной профильной дисперсии обусловливают довольно быстрое выравнивание концентрационных профилей по глубине водоносных комплексов (при отсутствии выдержаных по площади относительно водоупорных зон), так что подобная фильтрационная неоднородность эффективно учитывается в расчетных параметрах продольной макродисперсии (см. разд. 3.2.1); соответствующие асимптотические режимы переноса выделяются и диагностируются достаточно определенно. В этих условиях анализ результатов ОМН на базе одномерных моделей переноса (см. разд. 3.2.1) обычно позволяет эффективно исследовать все периоды миграции, если они не искажены сильным влиянием плановой поперечной дисперсии. При интерпретации отыскиваются показатели конвекции в трещинах и массообменные характеристики пористых блоков. При длительном и крупномасштабном переносе, когда становится справедливой предельная схема макродисперсии, оценки ведутся как для квазигомогенного пласта, т.е. резко упрощаются. В таком варианте найденные в лабораторных условиях значения емкости блоков позволяют расшифровать коэффициент действительной скорости фильтрации (k/n) и тем самым оценить коэффициент фильтрации по данным гидрохимических наблюдений за движением фронта загрязнения [2].

18.1.2. Планово-двумерные квазигомогенные модели переноса (для ореолов рассеяния)

Плановая поперечная дисперсия приводит к распространению загрязнения за пределы крайних траекторий движения жидкости, выходящих от источника загрязнения. Ее роль в интерпретационной схеме особенно велика, если поступление воды из источника мало по сравнению с фильтрационным расходом транзитного потока (см. разд. 9.3.2.1). Схематизация режима миграционного потока во времени позволяет выделить две характерные зоны концентрационного режима — квазистационарного (вблизи источника загрязнения) и нестационарного (вблизи фронта вытеснения). Для анализа миграции в квазигомогенных средах предпочтительнее использовать данные по первой зоне, ориентируясь на стационарные аналитические решения для точечного или линейного солевого источника в одномерном фильтрационном потоке (см. разд. 2.3.1). При этом в исходных моделях рекомендуется пренебречь ролью продольной дисперсии по сравнению с однонаправленной конвекцией, ибо упомянутая зона ореола рассеяния чувствительна лишь к изменению показателя поперечной дисперсии.

В частности, если допустимо представление бассейна стоков в виде точечного концентрационного источника, то падение концентрации от осевой линии ореола рассеяния к его периферийным зонам описывается экспоненциальной зависимостью (2.256); соответственно при фиксированном значении x графоаналитическая обработка результатов ведется в координатах $\ln(1/c) + y$ и по тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс определяется константа поперечной гидродисперсии $\delta_{\tau_y} = 1/4 \times \operatorname{tg} \varphi$. При обработке данных наблюдений по главному лучу скважин ($y = 0$) индикаторный график строится в координатах $c + x^{-1/2}$; по тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс находим

$$\delta_{\tau_y} = q_o^2 / 4\pi^2 v_e^2 \operatorname{tg}^2 \beta. \quad (18.1)$$

Более сложным оказывается анализ для источников конечных размеров. В качестве начального приближения здесь допустимо сведение источника к линейному, характерный размер которого $2l_o$ принимается равным расстоянию между крайними линиями тока, оконтуривающими его в плане. Интерпретация наблюдений может основываться на решении (2.26). Для ориентировочных оценок константы δ_{T_y} может использоваться информация об уменьшении средней относительной концентрации $\bar{C}(x)$ в расчетных сечениях, находящихся на расстоянии x от бассейна:

$$\delta_{T_y} \approx \frac{l_o^2}{x} \left[\frac{1 - \bar{c}_{cp}(x)}{c_{cp}(x)} \right]^2. \quad (18.2)$$

Следует отметить также, что при тех же исходных допущениях упомянутые здесь модели могут быть распространены и на гетерогенные трещиновато-пористые породы согласно обобщающей зависимости (3.49), пренебрегающей продольной дисперсией.

Серьезные ограничения на применимость плановых квазигомогенных моделей, учитывающих поперечную дисперсию, накладывает двумерность миграционного потока в разрезе (см. разд. 2.3.2). Их использование оправдано лишь при достижении асимптотического режима переноса, допускающего усреднение концентрации трассера по мощности всего пласта или в пределах выделяемых расчетных квазигомогенных элементов. Однако, учитывая, что в этом варианте эффективные параметры продольной макродисперсии могут достигать значительных величин, для обработки данных наблюдений должны использоваться более общие расчетные модели (см. разд. 10.1.2). В противном случае оценка параметра δ_{T_y} (D_{T_y}) выполняется с существенной погрешностью (в сторону завышения).

18.1.3. Значение и учет структуры фильтрационного поля

В действительности интерпретация данных режимных наблюдений оказывается намного сложнее, чем это следует из приведенного рассмотрения, вследствие сложного пространственного характера фильтрационного поля. Так, например, постепенное расширение «лент тока», выходящих из бассейна промышенных стоков, находит свое отражение в росте поперечных размеров (в плане) ореола загрязнения, вызванном конвекцией; между тем при недостаточном учете плановой двумерности потока результаты наблюдений за распространением загрязнения могут ошибочно увязываться с поперечной плановой дисперсией, что, естественно, приведет к завышению соответствующего расчетного параметра при его оценках по зависимостям (см. разд. 2.3.1), не учитывающим влияния бассейна на фильтрационную сетку.

В этой ситуации возможны два варианта внесения уточнений в расчетную схему. Первый, весьма приближенный, заключается в том, что после построения крайних траекторий фильтрации (нейтральных линий тока) поперечная плановая дисперсия учитывается простейшими балансовыми оценками для зоны области миграции, находящейся за пределами этих траекторий; естественно, это предполагает использование данных по скважинам упомянутой зоны. Второй подход сводится к решению задачи миграции в новой системе координат, соотнесенных с линиями тока и эквипотенциалами, — см. решение (2.37) при аргументах, определяемых в соответствии с зависимостями (2.37a). Во всех случаях точность подобных оценок может оказаться сомнительной, если не учитывается роль периодических флуктуаций конвективного поля (значений напоров) и плановой фильтрационной анизотропии; последняя особенно характерна для закарстованных пород, где направление максимальной проницаемости часто приурочено к генеральному направлению естественного потока, вдоль которого шло длительное растворение карбонатных пород.

К еще более серьезным и трудно интерпретируемым осложнениям может привести влияние двумерности фильтрационного потока в разрезе, причем в условиях, когда соответствующие фильтрационные задачи вполне допускают, согласно теории плановых потоков, профильное усреднение расчетной скорости фильтрации.

Перечислим лишь некоторые из подобных осложнений.

1. Наличие вертикальной компоненты скорости фильтрации v_z , особенно значимой вблизи границ водоносного пласта, несовершенных по степени вскрытия, может вызвать разновременное появление трассера в различных точках вдоль мощности пласта; как и в предыдущем примере, результаты наблюдений за этим процессом могут неверно приписываться влиянию продольной или поперечной (в данном случае — профильной) дисперсии. Сравнительно надежные корректировочные процедуры, в принципе аналогичные только что изложенным, требуют предварительного построения профильной фильтрационной сетки, для чего, как правило, приходится ориентироваться не непосредственно на данные наблюдений, а на результаты расчетов на фильтрационной профильной модели — со всеми вытекающими отсюда погрешностями. К тому же такая корректировка возможна лишь при дифференцированном (вдоль вертикали) отборе проб.

2. Влияние вертикальной компоненты скорости фильтрации может оказаться весьма важным и на участках, где горизонтальная составляющая является доминирующей; так, в плановых безнапорных потоках трассер разносится вертикальной конвекцией (даже при малых значениях v_z), усиленной инфильтрационным питанием, от верхних зон пласта к нижним, что внешне также проявляется подобно поперечной дисперсии.

3. Не нуждается в специальном пояснении возможность решающего влияния процессов инфильтрации и перетекания (т.е. вертикальной конвекции) на профильное распределение трассера (см. разд. 2.3.2 и 10.2.2.3).

4. Существенно неопределенной оказывается интерпретация данных о площадном распределении трассера в неоднородных по разрезу пластах при невыявленной закономерности изменчивости горизонтальной составляющей скорости фильтрации по мощности водоносного горизонта.

В целом, асимптотические процессы миграции в неоднородных системах обычно определяются в большей степени флуктуациями поля скоростей, нежели диффузионными эффектами. Поэтому во всех приведенных примерах надежность определения миграционных параметров на базе решения обратных задач миграции окажется весьма низкой, если предварительно не будет построена достаточно обоснованная фильтрационная схема. Детальность ее в принципе должна быть намного большей, чем при геофильтрационных построениях, причем в детализации нуждается не только поле напоров, но и поле скоростей фильтрации. Однако чаще всего возможности здесь резко ограничены имеющейся информацией, поэтому при постановке геофильтрационных наблюдений должны широко привлекаться вспомогательные методы прямой оценки скоростей фильтрации в водоносных пластах (см. разд. 21.2).

18.1.4. Значение погрешностей наблюдений

До сих пор предполагалось, что сами наблюдения не привносят дополнительных погрешностей и, в частности, однозначно оценивают текущую концентрацию трассера в той или иной точке пласта; между тем, наблюдательные скважины являются отнюдь не идеальной измерительной системой. Если исключить из рассмотрения влияние гидрохимической инерционности (см. разд. 14.4) и дополнительных изменений химического состава воды в скважине (считая, что эти факторы устраняются путем прокачки пьезометра), то важнейшим является вопрос о соответствии принятой расчетной модели, с одной стороны, и профильного расположения фильтрующего интервала наблюдательной скважины — с другой. При несоблюдении такого соответствия возможны серьезные погрешности.

Если, например, расчетная модель не принимает во внимание профильную дифференциацию трассера по

пласту, то наблюдательная скважина, несовершенная по степени вскрытия пласта, может фиксировать как сильно заниженные, так и завышенные концентрации трассера в зависимости от профильной структуры фильтрационного потока и, в частности, от относительной проницаемости той зоны пласта, в которой установлен фильтр. Возможные погрешности определения миграционных параметров, при прочих равных условиях, будут тем больше, чем выше степень фильтрационной неоднородности пласта (в разрезе), рассматриваемого расчетной моделью как однородный; в то же время, подобные погрешности не исключаются и для однородного пласта, если в нем имеет место профильная дифференциация трассера. В среднем, лучшие результаты в рамках такой модели дают совершенные наблюдательные скважины, хотя и они фиксируют заниженные концентрации трассера из-за его разбавления в скважине (имеются в виду условия, когда средняя концентрация трассера в точке наблюдения растет). Однако при регулярном характере поступления трассера в пласт погрешности будут убывать с ростом используемых в расчетных оценках значений концентраций, усредненных (посредством наблюдательной скважины) по мощности пласта.

Если же, наоборот, расчетная модель учитывает профильную дифференциацию трассера по отдельным элементам водоносного пласта, то расчеты по ней справедливы лишь при использовании данных по наблюдательным скважинам, оборудованным обособленными фильтрами на выделенные элементы. При несоблюдении этого требования погрешности интерпретации растут с увеличением различий в физических свойствах пород и в механизмах переноса в пределах объединяемых скважиной элементов пласта.

Например, в характерном случае двухслойной толщи, представленной песками (с проводимостью T_1) и подстилающими трещиноватыми породами (с проводимостью $T_2 \ll T_1$), обработка результатов

наблюдений при отсутствии дифференцированного — послойного — опробования всегда будет приводить к занижению активной пористости песков при одновременном завышении показателей дисперсии трещиноватых пород. Учитывая, что в данном примере пески играют основную роль в формировании расхода фильтрационного потока, такого рода просчеты в определении их пористости особенно нежелательны.

Сказанное, конечно, не исключает ситуаций, когда степень совершенства наблюдательной скважины не играет существенной роли. К тому же, этот фактор влияет неравнозначно на оценки различных параметров: сильнее исказяет значения дисперсионных параметров и слабее — активную пористость (трещиноватость), особенно при использовании в расчетах высоких величин относительной концентрации. Применительно к приведенному выше примеру, можно ожидать, что погрешности интерпретации длительных наблюдений при использовании усредненных данных по концентрации будут заметно падать, если трещиноватые породы обладают хорошо выраженной двойной пористостью, сближающей их по емкостным свойствам с песчаным горизонтом. В целом, однако, в любом случае всегда следует принимать во внимание потенциальную важность рассмотренного фактора. В особенности это относится к тонким переходным зонам в профиле пласта между водами разного состава, образующимся за счет профильной поперечной дисперсии: на оценку значения параметра поперечной дисперсивности можно рассчитывать лишь при наличии в такой зоне скважин с короткими фильтрами.

Специфические дополнительные погрешности могут возникать при опробовании трещиновато-пористых пород, если проба существенно отражает концентрацию трассера в блоках (отличную от концентрации в трещинах, относительно которой обычно записывается расчетная схема). Подобная ситуация возникает и при наблюдениях за тепловым трассером, когда температура воды в

скважине определяется не только конвекцией через фильтровую зону, но и кондукцией через «глухую» трубу.

Наконец, при увязке схем скважинного опробования с принимаемыми интерпретационными моделями приходится считаться даже с таким фактором, как продолжительность и интенсивность прокачки пьезометра перед отбором пробы, ибо усредняющее действие скважины зависит тогда от характера создаваемого при этом гидродинамического возмущения. При ориентации на осредненные интерпретационные модели интенсивная прокачка из совершенной скважины чаще будет способствовать улучшению качества исходной гидрохимической информации; наоборот, при использовании послойных моделей, принимающих в расчет профильную дифференциацию трассера, такая прокачка (даже если она осуществляется из изолированного интервала) может привести к подтягиванию воды из соседних зон, влияние которых в расчетных схемах вовсе не учитывается. Это обстоятельство должно приниматься во внимание и при использовании в расчетах данных, полученных по эксплуатационным скважинам в пределах изучаемого ореола загрязнения подземных вод.

18.2. Миграция реальных стоков от поверхностных источников загрязнения

18.2.1. Общий подход к построению расчетных моделей

Расчетная схема миграции конкретного компонента должна, вообще говоря, учитывать в явном виде каждый тип массообмена, деструкции и других процессов, определяющих дополнительные (по отношению к случаю трассера) изменения его концентрации; параметры этих

процессов обычно и подлежат оценке. При таком подходе, однако, может резко возрастать число определяемых параметров, что сделает надежное решение обратной задачи нереальным. Поэтому наиболее целесообразно строить модель миграции по ранговому принципу, ориентируя ее каждый раз на определение, как правило, одного искомого параметра. Ранжирование по значимости процесса осуществляется на базе анализа чувствительности, исходя из аналогии, на основе данных лабораторных испытаний или предшествующих наблюдений. При этом важно, чтобы другие миграционные параметры считались в такой модели известными из ранее проведенных независимых определений — по лабораторным испытаниям, опытно-миграционным работам, наблюдениям за миграцией трассера или стоков*. Так, если подлежит определению параметр равновесной (линейной) сорбции, то должно считаться известным значение активной пористости; тогда, определив из наблюдений эффективную пористость (в рамках тех же моделей, что и для случая трассера), легко найти коэффициент распределения. Если параметры сорбции оценены достаточно надежно ранее, то в модель миграции включается в явном виде следующий по значимости процесс (например, деструкция) с неизвестными параметрами, подлежащими определению.

Такое последовательное построение расчетных моделей, требующее каждый раз сильных априорных допущений, конечно, ни в коем случае не должно превращаться в комплекс формальных операций: на каждом этапе следует проводить всестороннюю оценку достоверности модели по всей совокупности значений параметров, пол-

* Следует отметить целесообразность независимой оценки скорости фильтрации на участках пласта, уже занятых промышленными стоками, — для изучения возможных изменений проницаемости пород под влиянием массообменных процессов.

ученных в рамках независимых определений, и по соответствуи «прогонов» конечного, наиболее детализированного варианта модели данным наблюдений. Однако к последнему виду проверки (решение обобщенной обратной задачи) следует относиться с большой осторожностью, сопровождая его, в частности, внимательным анализом чувствительности модели.

Следует ожидать, что при описанном подходе каждый раз будут определяться лишь некоторые фиктивные, «обобщенные», параметры, формально отраженные коэффициентами дифференциальных уравнений (отвечающих данному рангу модели). В одних случаях к этому обстоятельству приходится относиться как к неизбежному недостатку, пытаясь устраниить его с привлечением дополнительного материала. В других случаях можно рассматривать такие обобщенные оценки как вполне удовлетворительный конечный результат, но только если считается доказанным отсутствие ощутимых масштабных переходов между наблюдавшимися условиями миграции и теми прогнозными условиями, для которых используются (причем обязательно в рамках той же формальной модели) полученные значения параметров.

Особого внимания заслуживает вопрос об адекватности задания граничного условия на контуре водоема: растворы, находящиеся в бассейне, могут претерпевать значительную метаморфизацию при фильтрации через экранирующие отложения в пределах приграничной области еще до попадания в водоносный горизонт. Следовательно, на границе модели должны задаваться концентрации компонентов или их общий массовый поток, рассчитанные из решения соответствующей задачи переноса в экранирующем слое либо зарегистрированные под ним по специальному оборудованным наблюдательным пунктам.

Итак, надежная интерпретация данных наблюдений за миграцией стоков — задача весьма сложная, требующая отражения в расчетной модели совокупности влияющих

факторов. В виде первого шага разумно ориентироваться на усредненные балансовые оценки или на асимптотические представления рассмотренных выше формализованных моделей, причем чаще всего в вариантах, предусматривающих усреднение по профилю пласта (точнее, по профилю того его элемента, который в фильтрационном отношении рассматривается как единое целое). В дальнейшем можно рекомендовать последовательное уточнение и, если это будет признано необходимым, усложнение расчетной модели, для чего, с учетом найденных значений параметров и других данных, осуществляется поверочные оценки первоочередной модели по четырем направлениям:

- 1) проверяется выполнение критериев наступления асимптотического режима, априорно принятого на первом этапе;
- 2) ориентировочно оценивается миграционное взаимодействие элементов, рассматривавшихся исходной моделью как взаимно изолированные;
- 3) предпринимаются попытки расшифровки миграционной (и, естественно, фильтрационной) картины внутри элементов;
- 4) проверяется чувствительность модели по отношению к определяемым параметрам.

Впрочем, последний вопрос должен рассматриваться гораздо шире, совместно с представлениями (в том числе и априорными) о совокупности параметров, подлежащих определению в данной конкретной ситуации (см. также разд. 16.2.3).

18.2.2. Простейшие схемы интерпретации данных наблюдений за миграцией стоков

При наличии достаточно большого объема информации об ореоле загрязнений полезно предварительно (до выбора первоочередной формализованной модели пере-

носа) провести балансовые оценки в пределах отдельных лент тока, принимаемых в качестве расчетных, и (или) для полных поперечных сечений, заключенных между крайними границами ореола загрязнения подземных вод. Такие оценки особенно эффективны для объемных ореолов рассеяния, в формировании которых большую роль играют механизмы поперечной дисперсии и смешения, хотя очевидна их польза и для других форм существования миграционных потоков. Идея балансовых расчетов проста: оценивается обеспеченность солями, поступившими из бассейна промыщленных стоков, различных полных сечений, ортогональных направлению основного переноса. Расчеты должны проводиться как по сумме веществ, так и дифференцированно — для трассерных компонентов и неустойчивых или химически активных ингредиентов. Если, например, оказывается, что массовый поток *трассера* через расчетное сечение отвечает интенсивности солевого источника по данному компоненту, то можно предположить, что режим массопереноса в рассматриваемой области близок к квазистационарному, а наблюдаемые концентрации близки к предельным; в противном случае следует внести корректизы на возможный дисперсионный отток вещества в поперечном направлении (см. далее), и если его роль незначительна, то можно ожидать дальнейшего роста концентрации. Для неинертных ингредиентов сопоставление балансовых оценок по ряду сечений дает общее представление об интенсивности таких процессов, как сорбция, ионный обмен, деструкция. Таким образом, балансовые оценки помогают контролировать тенденции процесса переноса в пространстве и во времени, отражая суммарный вклад многих факторов в наблюдаемое распределение вещества; их применение правомочно и при интенсивном развитии поперечного рассеяния или разбавления мигрирующих компонентов в естественном потоке. Балансовый подход следует считать наиболее оправданным, когда форма ореола, его размеры,

а также гидродинамические характеристики фильтрационного потока сравнительно надежно установлены в процессе гидрогеологической разведки или последующими наблюдениями.

Элементы балансовых построений могут быть использованы и для упрощения расчетных схем при предварительной (сугубо ориентировочной) оценке параметров переноса по данным режимных наблюдений за развитием концентрационных полей сложной пространственной формы. Так, если стабилизация крайних границ области дисперсионного рассеяния для двух- и трехмерных миграционных потоков отмечается значительно быстрее, чем стационарное распределение внутри ореола (такая картина характерна, например, для миграции в гетерогенных трещиновато-пористых средах), то процессы поперечного смешения учитываются приближенным соотношением $c_{cp}(x) \approx K_p(x) c(x)$, где $c_{cp}(x)$ — средняя концентрация в пределах выделенного расчетного сечения, находящегося на расстоянии x от входной границы; $c(x)$ — функция концентрации, отвечающая решению для одномерного переноса; $K_p(x)$ — эффективный коэффициент разбавления, равный Q_o/Q_x (Q_o, Q_x — фильтрационные потери из бассейна и расход фильтрационного потока, приходящийся на выделенное сечение).

На основании балансовых оценок, при наличии необходимой информации, далее приступают к построению более сложных расчетных моделей — если, конечно, к этому располагает характер имеющейся информации.

В качестве примера рассмотрим обоснование моделей для интерпретации данных наблюдений за миграцией сорбируемых и неустойчивых (подверженных деструкции, распаду, детоксикации и т.п.) загрязнителей. Так как кинетикой сорбции обычно можно пренебречь (см. разд.), то в оценках используется эффективная емкость пород $n_s = n + \Delta n$ (где Δn — дополнительная емкость, возникающая за счет сорбционных процессов). В частности, для линейной изотермы $\Delta n = k_r$ (где k_r — коэффициент распределения), а для нейлинейной выпуклой изотермы Лэнгмюра $\Delta n \approx Q_V / (b + c_o)$ (где Q_V — предельная емкость сорбционного насыщения пород, b — эмпирическая константа изотермы, C_o — постоянная граничная концентрация). Таким образом, оценка параметров равновесной сорбции производится по величине смещения кривых распределения концентра-

ции, полученных по наблюдательным скважинам для трассеров и активных стоков.

Для количественного описания однонаправленных процессов распада неустойчивых ингредиентов можно использовать простейшие линейные модели вида (5.2.1), где λ_p — обобщенная константа скорости распада. При $\lambda_p t \gg 2+3$ за фронтом переноса достигается стационарное распределение c_{λ} неустойчивых компонентов. Если в той же части области переноса стабилизировались и значения концентрации трассера c , то выполняется соотношение

$$c_{\lambda}/C = e^{-\lambda_p x_n/v_e},$$

справедливое для одномерных фильтрационных потоков (со скоростью v_e), из которого рассчитывают константу скорости деструкции.

Уместно заметить, что, по крайней мере, для ореолов растекания простейшие модели интерпретации, использующие данные лишь вдоль фиксированных лент тока, вовсе не обязательно окажутся на деле хуже пространственных моделей, для которых, как правило, все равно не хватает необходимой информации. Анализ показывает, что одномерные оценки по линиям тока гораздо менее чувствительны к влиянию различных побочных факторов и достаточно представительно отражают основные черты миграционного процесса. При этом полезным контрольным показателем, позволяющим сопоставлять между собой отдельные характерные траектории, является время миграции вдоль них загрязнений; при сильно растянутых во времени кривых наблюдаемых концентраций (от длительно действующего источника загрязнения) рекомендуется [1] вводить осредненное по ним значение

$$t_{cp} = \frac{\int_0^{t_n} tc(t) dt}{\int_0^{t_n} c(t) dt}, \quad (18.3)$$

где t_n — время наблюдений. Наоборот, для кривых экстремального вида (с четким максимумом, обусловленным

источником загрязнения сравнительно кратковременного действия), предпочтительнее ориентироваться на время t_{cp} , которое отвечает половине массы вещества, достигнувшей данной точки пласта (наблюдательной скважины):

$$\int_0^{t_{cp}} c(t) \, dt = 0,5 \int_0^{\infty} c(t) \, dt. \quad (18.4)$$

Преимущество последнего подхода в том, что осредненное время миграции не зависит от разбавления, мало чувствительно к несистематическим ошибкам опробования, слабо зависит от дисперсии и отражает в интегральном виде фильтрационную неоднородность вдоль траекторий миграции.

18.2.3. Особенности анализа условий миграции разноплотностных жидкостей

Плотностная конвекция (см. разд. 1.1.1) резко усложняет профильное распределение стоков, вызывая образование внедряющихся «языков» в нижней (или в верхней) части пласта; длины таких «языков» часто соизмеримы с областями переноса. Кроме того, она вызывает сравнительно быстрые вертикальные перемещения стоков, которые могут усиливать поперечный (вкрест напластования) конвективно-дисперсионный перенос или, наоборот, ослаблять, а иногда и полностью «забивать» его (см. разд. 2.3. и 9.3.3). Важно, наконец, что в отличие от традиционной задачи о вторжении океанических вод, стоки поступают из бассейнов ограниченной плановой протяженности, а это часто придает миграционному процессу ярко выраженный трехмерный характер. Решение системы соответствующих дифференциальных уравнений (1.32) —

(1.35), хотя бы в рамках прямой задачи, весьма трудоемко даже для наиболее сильных численных методов. Поэтому вряд ли можно рассчитывать на разработку эффективных алгоритмов решения соответствующей некорректной обратной задачи (направленной на оценку параметров миграции) без серьезных упрощений в расчетной модели. Так, приближенная интерпретация наблюдений за миграцией слабоминерализованных стоков от гидродинамических пассивных бассейнов (см. разд. 9.3.2.1) может основываться на решении (2.40), полученном в предположении весьма слабой плановой деформации сетки движения подземных вод по сравнению с профильным искривлением линий тока под действием плотностной конвекции. Для исследования миграции высокоминерализованных растворов, внедрение которых в водоносный горизонт приводит к формированию объемных интрузий, может применяться и физическое моделирование (см. разд. 2.3.2). Данные его подтверждают допустимость фрагментации процесса в пространстве и во времени, позволяющей учитывать на разных стадиях миграции различные доминирующие факторы.

При интерпретации начальной стадии загрязнения следует учесть, что минерализованные стоки довольно интенсивно погружаются в глубь пласта. Поэтому именно ограниченность пласта по мощности и его профильная анизотропия (в сочетании с плотностным градиентом) определяют главные особенности такой субвертикальной миграции, а плановые гидродинамические границы весьма слабо влияют на перенос — пласт можно считать неограниченным по простиранию. В более поздние периоды, когда стоки достигают подошвы пласта и перемещаются по потоку подземных вод, пространственное положение «интрузии» стоков контролируется, в большей степени, рельефом подстилающих водоупорных слоев (см. гл. 39, т. 3), так что пренебрежение профильной анизотропией и вертикальной составляющей скорости фильтрации сла-

бо влияет на общее описание миграционного процесса. Подобная фрагментация позволяет оценить миграционные параметры в диапазонах их наибольшей чувствительности — на тех или иных стадиях массопереноса. Так, в начальный период внедрения рассолов, когда роль дисперсионного рассеяния мала, может быть определена активная емкость пласта и уточнено значение коэффициента профильной анизотропии. В то же время, интерпретируя поздние этапы миграции, определяют показатели продольного и поперечного рассеяния в плановом потоке.

Ряд принципиальных трудностей возникает при попытках интерпретации наблюдений за миграцией минерализованных стоков в гетерогенных водоносных комплексах: реально могут быть, очевидно, исследованы лишь миграционные процессы, отвечающие асимптотическому режиму переноса для фиктивной гомогенной (квазигомогенной) среды.

К изложенным сложностям анализа миграции разнодостоинственных жидкостей необходимо добавить трудности устранения погрешностей измерений по наблюдательным скважинам. Кроме очевидных отклонений, связанных с расположением фильтра (см. разд. 18.1), возможны серьезные погрешности в данных наблюдений, возникающие в результате перетоков и процессов плотностной конвекции в самой скважине. Особенно неопределенной является фиксация границы (узкой переходной зоны) между стоками и пластовой водой. Действительно, если наблюдательная скважина вскрывает пласт на полную мощность, то наличие в пласте даже небольшого перепада напоров по вертикали ΔH будет смещать контакт соленых и пресных вод тем больше, чем меньше относительная разность их плотностей ($\Delta \bar{\rho}$), т.е. величина такого смещения имеет порядок $\Delta H / \Delta \bar{\rho}$. Если фильтр оборудован лишь на нижнюю часть пласта, то положение контакта в скважине может смещаться под влиянием любых случайных возмущений в ней; например, прокачка будет поднимать

этот контакт (до предельной величины подъема $\Delta H/\Delta \bar{\rho}$), а поступление пресной воды сверху — опускать его (до предельной отметки, отвечающей верхнему краю фильтра).

Перечисленные выше обстоятельства часто заставляют ориентировать интерпретацию наблюдений за движением разноденственных жидкостей на заведомо грубые — профильно-двумерные или даже одномерные — модели, причем в двумерном случае положение внедряющегося «языка» стоков может аппроксимироваться на каждый текущий момент, исходя из элементарных соображений гидростатики (подобно известной формуле Гибена-Герцберга). Для проверки возможной роли вертикальной составляющей скорости фильтрации полезна оценка отклонений от гидростатического распределения давлений, согласно которому $\Delta p_z = \rho g \Delta z$ (p_z — разность давлений вдоль вертикали на интервале Δz). При $\Delta p_z < \rho g \Delta z$ вертикальная составляющая скорости ориентирована вниз, и наоборот. При использовании гидродинамических моделей интерпретации следует помнить, что строгая оценка градиентов в разноденственном потоке возможна лишь для условий горизонтальной стратификации вод по плотности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 18

1. Leij F.J., Toride N. Descretete time - and length - averaged solutions of the advection - dispersion equation. — Water Resources Res., 1995, v.31, N7, p.p. 1713-1724.
2. Zuber A., Motyka J. Matrix porosity as the most important parameter of fissured rocks for solute transport at large scale. — Journal of Hydrology, 1994, v. 158, p.p. 19—46.

19.1. Общие положения

Режимные гидрогеохимические наблюдения на участках контролируемого загрязнения подземных вод правильно рассматривать в качестве специального вида гидро-геологических опытных работ (ОМН). Постановка и проведение наблюдений включают: 1) обоснование сети режимных скважин (постов) — схемы размещения точек наблюдений в плане и в разрезе, а также их конструктивных особенностей; 2) обоснование последовательности бурения скважин и оборудования водопостов; 3) назначение частоты опробования; 4) оценку качества подземных и связанных с ними поверхностных вод — по физическим, химическим и микробиологическим показателям — с целью выявления источников и оконтуривания площадей загрязнения, а также контроля интенсивности загрязнения с учетом динамики его развития во времени и по площади; 5) систематическую оценку достоверности данных наблюдений путем экспериментальной проверки состояния скважин сети; 6) обоснование и проведение специальных гидрофизических работ (в том числе опытного характера) для независимого изучения фильтрационных и миграционных потоков, а также условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод на участках загрязнения; 7) проведение дополнительных опытно-фильтрационных и индикаторных опробований на ключевых участках, а также лабораторных экспериментов.

Перед лабораторными исследованиями ставится несколько взаимосвязанных задач: определение основных

миграционных параметров пористых образований для нейтральных стоков; выявление физико-химической природы процессов преобразования сточных растворов при миграции; оценка параметров, контролирующих протекание гетерогенных физико-химических реакций; изучение диффузионных (в том числе нелинейных) и осмотических процессов; изучение влияния состава стоков и напряженного состояния пород на фильтрационные свойства последних (подробнее — см. гл. 20). В целом, ОМН всегда должны ставиться и проводиться в тесном интерактивном взаимодействии с лабораторными экспериментами.

Анализ и количественная интерпретация миграционных процессов и определение их параметров используются для: а) планирования дальнейшего развития наблюдательной сети; б) долгосрочных прогнозных оценок, последовательно уточняемых по мере накопления информации на различных этапах наблюдений; в) разработки водоохраных мероприятий и оценки их эффективности.

В состав режимной сети для гидрохимических наблюдений входят: наблюдательные скважины — специальные или совмещенные с пьезометрами режимной сети, предназначенные для гидродинамических наблюдений; пункты гидрохимического опробования по эксплуатируемым (дренажным, водозаборным и др.) скважинам, в пределах горных выработок, на естественных источниках, поверхностных водотоках и водоемах, сбросах загрязненных вод; специальные пункты наблюдений (в частности, лизиметрических) в экранирующих отложениях (естественных и техногенных), т.е. в приграничной области, через которую осуществляется взаимодействие техногенных некондиционных вод с подземным потоком. Нередко только контроль за качеством и количеством вод, инфильтрующихся через экранирующие отложения, дает возможность установить истинную концентрацию компонентов и их общий массовый поток на участке непосред-

ственного загрязнения. Важным элементом наблюдений является отбор проб грунтов зоны аэрации (гл. 19.3.2).

Основным источником информации о загрязнении являются систематические замеры характерных показателей по специализированной сети режимных скважин. Следует подчеркнуть, что существующая региональная режимная сеть практически не решает задачу изучения загрязнений на локальных участках [2, 3]: в лучшем случае получаемая по ней информация служит характеристикой естественного гидрохимического фона. Вместе с тем, постановка специализированных наблюдений должна тесно увязываться с региональной режимной сетью, позволяющей получить дополнительные пункты для контроля режимообразующих факторов с использованием существующих скважин, а также колодцев и родников. Важную роль в системе режимных наблюдений играет регулярное опробование эксплуатируемых скважин.

По общей направленности наблюдения за загрязнением подземных вод подразделяются на собственно гидро-геохимические и гидродинамические; на последние возлагаются важные функции по детализации фильтрационных потоков, во многом определяющих особенности развития контролируемых процессов загрязнения подземных вод (см. разд. гл. 9).*

Постановка наблюдений должна исходить из основных закономерностей формирования гидродинамических и гидрохимических полей на участках нарушенного режима подземных вод. Сложность этих закономерностей делает необходимым тщательное планирование наблюдений на базе принципа обратной связи. В основе такого

* Следует считать обязательными периодические отборы гидрохимических проб и замеры температуры и при любых опытных откачках по скважинам на наблюдаемой территории.

планирования лежат разведочные оценки возможных процессов загрязнения подземных вод, проводимые согласно изложенным ранее теоретическим построениям. Исходными данными для них сначала служат преимущественно результаты опытных опробований, проведенных при разведке месторождений. В дальнейшем эти данные, так же как и сами прогнозные оценки и запланированный по ним исходный вариант наблюдательной сети, корректируется по мере накопления результатов наблюдений. Таким образом, при постановке наблюдений должен использоваться гибкий адаптационных подход, который оказывается возможным лишь при поэтапной схематизации изучаемых процессов загрязнения, последовательном уточнении прогнозных оценок и соответственно стадийности в планировании, организации и проведении наблюдений. В частности, без тщательного планирования ОМН нередко оказываются практически бесполезными; в определяемой степени планирование здесь важнее интерпретации, и для его осуществления нередко требуются разведочные оценки*, существенно более сложные, чем при последующей обработке данных наблюдений.

19.2. Принципы размещения пунктов гидрохимического контроля в водоносных пластах

В условиях контролируемого загрязнения подземных вод наблюдениями охватываются участки размещения как возможных поверхностных источников загрязнения, так и дренажей или водозаборов пресных подземных ис-

* Следует заметить, что теоретические основы планирования наблюдений этим не исчерпываются, так как они должны включать также теорию исследования соответствующих оптимизационных задач.

точников некондиционных вод. Естественно, что при практическом использовании излагаемых ниже рекомендаций по размещению пунктов гидрохимических наблюдений необходимо предусматривать их теснейшую увязку с системой для гидродинамических наблюдений — прежде всего путем использования по возможности одних и тех же элементов наблюдательной сети [2, 8].

19.2.1. Загрязнение от поверхностных источников

При постановке наблюдений особое внимание следует обратить на профильную фильтрационную анизотропию и наличие в разрезе резко выраженных зон преимущественно гидравлического переноса. Как правило, области, охватываемые наблюдениями в трещиноватых средах, должны быть заметно шире, чем в пористых породах.

Коротко охарактеризуем основные факторы, которые определяют наиболее рациональную схему размещения точек гидрогеохимических наблюдений в плане и в разрезе водоносного горизонта, загрязняющегося от поверхностного бассейна стоков.

Прежде всего, характер наблюдений зависит от конкретных литологического-структурных особенностей и естественно-гидрогеологических условий, качественно устанавливаемых уже при предварительной схематизации области фильтрации. При этом следует особо учитывать профильную фильтрационную анизотропию, наличие в разрезе резко выраженных зон преимущественного гидравлического переноса, высокие действительные скорости фильтрации (большие масштабы переноса) и сильные дисперсионные эффекты рассеяния (наличие широких переходных зон) в трещиноватых породах; наоборот, в пористых комплексах действительные скорости движения ниже, рассеяние в пределах относительно однородных толщ вы-

ражено слабее, но существенную роль играют сорбционные эффекты.

Принципы организации режимных наблюдений заметно различаются в зависимости от ожидаемого *режима рассеяния* загрязняющих компонентов — от пространственно-временных закономерностей формирования и строения ореола загрязнения. Для ореолов растекания основным показателем интенсивности переноса служит конвекция, а смешение некондиционных и пластовых вод происходит в основном вблизи фронта вытеснения; сам процесс является резко нестационарным на всех этапах миграции, и поэтому для изучения его показателей необходимо детальное временное прослеживание. При этом, даже если фронт загрязнения и не выражен достаточно четко, общая гидродинамическая ситуация, а именно структура сетки движения, установленная по геофильтрационным наблюдениям, позволяет выделить наиболее важные ленты тока и сосредоточить на них основной объем наблюдательных скважин. В то же время подобная система наблюдений будет малоэффективной в условиях ореолов рассеяния. Для них характерно сильное влияние поперечной дисперсии и заметное разбавление мигрирующих стоков; сам процесс рассеяния тяготеет к стационарности (квазистационарности), по крайней мере, в областях, прилежащих к источникам загрязнения. Здесь первостепенное значение приобретает изучение пространственных закономерностей, обусловленных процессами смешения. Такие загрязнения наиболее надежно контролируют площадные системы наблюдательных скважин, расположенных по линиям не только вдоль, но и вкrest направления основного переноса: они позволяют оценить роль эффектов поперечного рассеяния и обеспеченность веществом различных расчетных сечений, что является обязательным элементом эпигнозных, а затем и прогнозных построений (см. разд. 17.2).

Особого подхода требует постановка наблюдений в условиях *гравитационной дифференциации промысленных стоков*, когда естественные гидродинамические границы пласта в плане и структура исходного фильтрационного потока слабо контролируют геометрию ореола загрязненных вод, деформируемого плотностной конвекцией; предсказание конфигурации ореола часто усложняется и ввиду отсутствия данных о профильной фильтрационной анизотропии и неоднородности водоносных пород. Все это делает весьма неопределенным планирование гидрохимических наблюдений за миграцией разноплотностных жидкостей. Полезно поэтому отметить некоторые, достаточно типичные черты развития такого загрязнения, которые должны учитываться при выборе общей схемы гидрохимического контроля: 1) быстрая стабилизация границы раздела между разноплотностными жидкостями в центральной части ореола, прилежащей к бассейну, так что наблюдения за положением этой границы почти ничего не говорят о вероятных масштабах процесса за пределами данной области; 2) при весьма значительном превышении плотности сточных вод над плотностью пластовых растворов, вблизи бассейна-накопителя и под его дном формируется интрузия неразбавленных рассолов, так что загрязнение водоносного горизонта может происходить в основном в результате сноса солей с ее поверхности огибающим естественным потоком; при этом размеры самого тела концентрированных рассолов могут оставаться стабильными весьма длительное время.

В целом, уже из самого общего анализа следует, что всестороннее изучение загрязнения подземных вод возможно только при условии наблюдения концентрационных полей на достаточном удалении от бассейна. Контроль по скважинам, расположенным вблизи источника загрязнения, которые очень быстро оказываются за фронтом переноса, не позволяет надежно установить характер миграции в пласте, поскольку для оценки физико-

химических и дисперсионных эффектов основной интерес представляют точки наблюдения в пределах переходной зоны. Отсюда следует, что требования к плотности и расположению скважин режимной сети с позиций гидродинамики, с одной стороны, и гидрохимии — с другой, существенно различаются. С учетом сказанного можно дать некоторые конкретные рекомендации по размещению пунктов гидрохимического контроля в водоносных пластах.

Прежде всего, намечается расположение основных наблюдательных створов. При наблюдениях за ореолами растекания скважины размещаются по нескольким лучам, отходящим от бассейна-накопителя и замыкающимися на охраняемых объектах. При наблюдениях за ореолами рассеяния необходимо учитывать влияние естественного фильтрационного потока, концентрируя основной объем скважин в пределах площади, оконтуренной предполагаемыми нейтральными линиями тока, причем здесь, в дополнение к основному наблюдательному лучу скважин, задаются два-три створа вкрест направления естественного потока. Первоначально на каждом створе по потоку, помимо пунктов наблюдений в приграничной области, располагаются как минимум две-три наблюдательные скважины — при размерах контролируемой области порядка нескольких километров: первая находится на расстоянии 50–100 м от бассейна (в пористых породах) или 200–300 м (в трещиноватых породах), а расстояния до последующих скважин примерно удваиваются. Дальнейшее наращивание числа наблюдательных скважин и их размещение в плане определяются результатами наблюдений по первоочередной группе скважин [3]. Так, если по времени прихода фронта загрязнения к ближайшим скважинам удается оценить истинную асимптотическую скорость переноса, то это позволяет рассчитать расстояние между последующими скважинами: оно должно быть таким, чтобы фронт загрязнения проходил его не более

чем за полтора-два года (в пористых породах), или за полгода-год (в трещиноватых породах). Отсюда легко находится общее число скважин на лучах. Подобный подход оправдан при условии, что расчетные расстояния между скважинами не превышают $1/7 + 1/10$ части общего пути миграции загрязнений от бассейна до охраняемого объекта; в противном случае, плотность скважин должна быть увеличена.

Далее, по мере накопления информации о контролируемом процессе и с учетом результатов гидрогеологических прогнозов, для наблюдений за ореолами рассеяния задаются поперечные створы скважин, ориентированные ортогонально направлению основного переноса. В частности, такие створы должны обязательно разбуживаться, если результаты наблюдений за миграцией устойчивых компонентов дают по ближайшим скважинам установившиеся (стационарные) концентрационные распределения со значениями ниже исходных, что может расцениваться как проявление интенсивного поперечного дисперсионного рассеяния.

Особо следует остановиться на специфике требований к размещению точек гидрохимического контроля по вертикали. С учетом профильной фильтрационной неоднородности и анизотропии, а также важного фактора гравитационной дифференциации загрязненных и естественных вод, основное загрязнение может идти лишь в пределах ограниченной по мощности зоны водоносного пласта. Поэтому пробы из скважин, фильтры которых расположены вне зоны преобладающего загрязнения или, наоборот, заметно превышают их мощность, оказываются здесь

непредставительными. Отсюда вытекает необходимость детального опробования фильтрующей толщи по всей ее мощности*, что не увязывается с существенно менее жесткими требованиями к гидродинамическим наблюдениям по пьезометрам в условиях плановой фильтрации. Необходимость вертикальной дифференциации проб воды, отбираемых на участке загрязнения, требует увеличения объемов бурения или применения пьезометров с секционными фильтрами (см. разд. 19.2), поинтервально изолируемыми перед прокачкой скважины и отбором пробы.

В общем случае, расположение фильтров наблюдательных скважин в разрезе и длина интервалов опробования устанавливаются после анализа материалов гидрогеологической разведки, на основе которого проводится профильное расчленение пород по проницаемости. В условиях нерасчлененной водоносной толщи число интервалов гидрохимического контроля, оборудованных ярусными пьезометрами, определяется ее суммарной мощностью m_c : при $m_c \leq 10$ м — один интервал, при $10 \text{ м} \leq m_c (30 \div 50)$ м — два интервала (на верхнюю и нижнюю части горизонта), при $m_c > (30 \div 50)$ м — не менее трех интервалов (на верхнюю, нижнюю и среднюю части горизонта). Обязательным во всех случаях является наличие точек наблюдения вблизи депрессионной поверхности грунтовых вод. Повышенные требования к профильному распределению наблюдаемых интервалов возникают при необходимости фиксации тонких переходных зон между ореолом загрязнения и природными водами, обусловленных вертикальной поперечной дисперсией: результаты таких наблюдений дают основу для оценки параметра δ_{T_z} .

* Это требование следует считать обязательным, как минимум, вблизи входной границы миграционного потока — в пределах зоны, равной 3-5-кратной мощности пласта.

Однако, их реализация требует очень частого этажного расположения коротких («точечных») интервалов опробования.

Как уже отмечалось, наиболее существенные изменения в химическом составе стоков происходят в пределах приграничной области, где степень их метаморфизации определяется повышенной дисперсивностью, аэрируемостью, насыщенностью органическим веществом донных и примыкающих к ним приповерхностных отложений. С позиций оценки процессов самоочищения в придонном слое и в экранирующих отложениях, целесообразно еще до заполнения бассейна в донной его части установить специальные стационарные пробоотборники; этой же цели должна служить и группа специально оборудованных режимных скважин, расположенных вблизи уреза бассейна. Данные, полученные по этим элементам системы наблюдений, позволяют отдельно изучить гидрохимические процессы, не свойственные основной области миграции, и установить граничные условия на «входном» контуре загрязняемого водоносного пласта; пренебрежение этими требованиями может привести к совершенно неверным выводам о динамике процессов переноса в подземных водах.

Описанные системы тесно увязываются с наблюдениями в зоне аэрации (гл. 23).

19.2.2. Загрязнение от подземных бассейнов некондиционных вод

В пределах зон загрязнения верхних, интенсивно дренируемых водоносных горизонтов подтягивающимися снизу минерализованными растворами (от природных бассейнов некондиционных вод) наиболее эффективны наблюдения, проводимые непосредственно по пробам воды из водозаборных скважин, так что расположение и число наблюдательных скважин здесь трудно регламенти-
264

ровать без привязки к конкретной ситуации. Как правило, необходимы, в частности, наблюдательные скважины с секционными фильтрами или кусты скважин-дублеров, обеспечивающие периодический поинтервальный отбор проб с различных глубин. Контроль за изменением минерализации может проводиться и по стационарным резистивиметрическим датчикам, устанавливаемым по ярусной схеме в качественно изолированных интервалах скважин.

При выборе схемы размещения наблюдательных секций по мощности относительно однородной водоносной толщи необходимо учитывать, что скорость подтягивания границы раздела пресных и минерализованных вод в субвертикальном направлении возрастает обратно пропорционально квадрату текущего расстояния от этой границы до контура водозаборных устройств (см. разд. 21.3).

Соответственно, целесообразно увеличивать расстояния по вертикали между соседними точками опробования снизу вверх. Так, при первоначальной глубине залегания границы раздела (h_o) в первые сотни метров пьезометры отстоят от нее на расстояниях $h_o/10$; $h_o/5$; $h_o/2$ (для трехъярусного наблюдательного пункта), причем фильтр наиболее глубокой наблюдательной скважины располагается в нескольких десятках метров от границы раздела. При перетекании некондиционных вод через слабопроницаемые разделяющие толщи необходимы дополнительные точки наблюдений в пределах последних; наиболее важными здесь являются наблюдательные пункты вблизи контакта эксплуатируемого пласта с разделяющими породами.

Общая логика размещения пунктов и интервалов наблюдений здесь такова: чем ближе (в плане) расположена участок наблюдения к контуру водопонижения (дрена-

жа), тем плотнее (и в плане, и в разрезе) должна быть наблюдательная сеть.* Для наиболее целесообразной в этих условиях схемы размещения скважин по двум-четырем створам, отходящим от контура разгрузки, можно ограничиться в среднем оборудованием пяти-семи наблюдательных пунктов по каждому лучу, концентрируя их главным образом на удалениях от контура разгрузки, не превышающих первых сотен метров**; в периферийных зонах достаточно предусмотреть возможность использования для гидрохимических наблюдений пьезометров режимной сети, предназначенных для гидродинамических наблюдений. Кстати, специфика последних для рассматриваемых условий нуждается в особых пояснениях: здесь необходима оценка как темпов изменения напоров на различных гипсометрических уровнях, так и профильного распределения водопритоков из отдельных горизонтов, характеризующихся различными качественными показателями подземных вод.

Решение первой из упомянутых задач требует достаточно дробной вертикальной дифференциации точек наблюдений за напорами вблизи водозаборных устройств. Для этого необходимо устройство этажных пьезометров как минимум на два-три рабочих интервала***, что позволяет оценить профильную проницаемость (или, точнее, фильтрационное сопротивление) пород, через которые осуществляется субвертикальная миграция рассолов. Важно, что другой необходимый для таких оценок показатель — расход фильтрационного потока — определяет-

* В частности, на расстояниях x , в несколько раз превышающих величину h_0 (глубину горизонтального контакта пресных и соленных вод), можно вообще отказаться от профильной дифференциации интервалов наблюдений.

** Число ярусов наблюдений убывает к краям этой зоны от трех-четырех до одного-двух.

*** В этом плане, требования к размещению пунктов гидродинамического и гидрохимического контроля непротиворечивы.

ся в этом случае с достаточно высокой надежностью благодаря прямым замерам на водозаборных устройствах.

Для профильной дифференциации водопритоков могут использоваться данные: 1) о расходометрии водозаборных устройств, полученные до, а иногда и в процессе их эксплуатации; 2) о погоризонтном водоотливе из дренирующих подземных выработок; 3) о минерализации (или покомпонентном и изотопном составе) вод отдельных дренируемых горизонтов, с одной стороны, и откачиваемых вод — с другой, что дает основание для дифференциации водопритоков на основе простейших уравнений смешения (при длительной эксплуатации); 4) химических анализов вод, отобранных из наблюдательных скважин; 5) о поровых водах слабопроницаемых образований, позволяющие определить естественную скорость фильтрации в разделяющем пласте по стационарному распределению вдоль его мощности какого-либо инертного компонента (обычно СІ) поровых вод, если имеются существенные различия в концентрации этого компонента по обе стороны пласта [1].

19.3. О дополнительных требованиях к оборудованию наблюдательных скважин*

Как уже отмечалось в предшествующих разделах, эффективность наблюдений определяется прежде всего надежностью расчленения гидрохимического разреза при отборе проб из режимных скважин и возможностями прослеживания миграции сточных вод через экранирующие (донные) отложения бассейнов-накопителей. Между тем, существующие конструкции наблюдательных скважин и

* Раздел написан совместно с Е. В. Мольским.

традиционные способы отбора проб отнюдь не всегда позволяют достигнуть необходимой детальности наблюдений. Если иметь в виду идеальный вариант, то основные требования к бурению и оснащению скважин сводятся к следующему:

- 1) при выборе технологических схем бурения должна предусматриваться возможность отбора проб воды и измерения напоров в изолированных призабойных интервалах — на каждой наперед заданной глубине;
- 2) конструкция скважин должна предусматривать надежную изоляцию (постоянную или временную) отдельных интервалов-секций — для отбора проб, прослеживания напоров, температуры и электрического сопротивления воды непосредственно в скважине вдоль ее вскрытого интервала;
- 3) число секций определяется результатами предварительного фильтрационного расчленения толщи: для мощных водоносных комплексов (десятки метров) их число должно быть равным, как минимум, трем — для опробования нижней, средней и верхней части водоносного горизонта;
- 4) рабочая длина интервала (секции) режимных скважин не должна превышать $1/10$ — $1/15$ (в пористых породах) или $1/5$ — $1/10$ (в трещиноватых породах) мощности водоносного горизонта (при минимальной длине 1-2 м);
- 5) каждая секция должна включать автономное водоподводящее устройство, обеспечивающее не только подачу необходимого для анализа объема жидкости, но и предварительную прокачку опробуемого интервала для отбора представительной пробы;
- 6) должна быть предусмотрена возможность оснащения каждой секции глубинными приборами для замера давления воды, ее температуры и электрического сопротивления;

7) возможности перетоков по затрубному пространству (в частности, при прокачках скважин) должны быть сведены к минимуму;

8) после завершения операций, связанных с бурением и оснащением скважины, она должна быть хорошо промыта и опробована откачками или экспресс-наливами;

9) с целью оценки качества затрубной цементации в скважине проводятся специальные геофизические исследования.

Так как на практике нередко требования, связанные с оборудованием нескольких наблюдательных секций в одной скважине, оказываются технических трудно выполнимыми, то приходится прибегать к единственной альтернативе — оборудованию куста скважин на разные глубины.

Понятно, что в настоящее время, по крайней мере, некоторые из изложенных требований не могут быть удовлетворены при массовых наблюдениях. Приведем поэтому дополнительные пояснения по возможным схемам технического оснащения и опробования наблюдательных скважин.

Гидрохимическое опробование при бурении скважин. В устойчивых трещиноватых породах для этого применяются односторонние пакерные устройства, перекрывающие сверху опробуемый интервал (рис. 19.1а). В пористых (песчано-глинистых) породах целесообразно определяющее опробование (см. рис. 19.1б) путем гидрозадавливания ниже забоя специального снаряда, оборудованного в нижней части сетчатым фильтром.

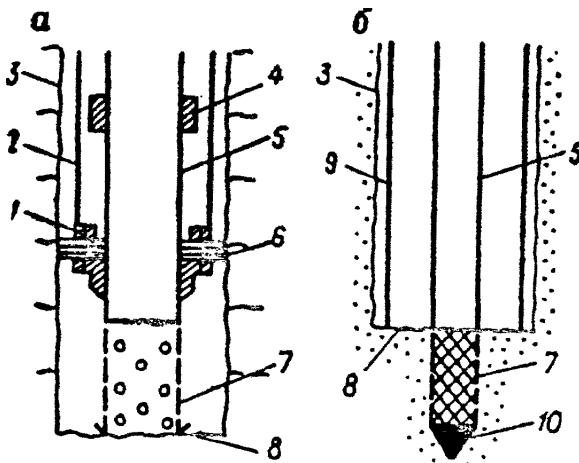


Рис. 19.1. Схема к гидрохимическому опробованию в процессе проходки скважин в трещиноватых (а) и пористых (б) породах: 1 — покерные держатели; 2 — несущая труба; 3 — стенка скважин; 4 — верхний стопор; 5 — коллектор; 6 — пакерный манжет в рабочем положении; 7 — фильтр; 8 — забой скважины; 9 — обсадная труба; 10 — наконечник наружного снаряда

Оборудование скважин стационарными секционными устройствами. В первом варианте, на заданных отметках в скважине устанавливаются специальные водоприемные камеры (рис. 19.2а), обсыпанные хорошо проницаемым материалом. Интервалы между секциями изолируются глинистыми или цементными тампонирующими перемычками (см. рис. 19.2б). В устойчивых породах, не требующих предварительной обсадки, установка упомянутых устройств и послойная засыпка производится непосредственно в предварительно прокачанный ствол скважины. В неустойчивых породах засыпка осу-

ществляется под защитой колонны обсадных труб, которая извлекается по мере оборудования скважины пробоотборниками. Пластовая вода, поступающая в камеру через ее пористую перегородку и клапан, поднимается на поверхность под действием избыточного давления нагнетаемого инертного газа (например, азота).

Существует и другой вариант оснащения пункта гидрохимического контроля стационарными секционными пробоотборниками, приемлемый для пористых комплексов небольшой (до 10 м) мощности. Для получения гидрохимических проб с различных глубин используются короткие ("точечные") фильтры, жестко закрепленные на основной (несущей) трубе и соединенные тонкими металлическими трубками с устьем скважины (рис. 19.3); при этом фильтры могут фиксироваться на расстояниях друг от друга по вертикали, измеряемых всего лишь десятками сантиметров. Сама несущая труба оборудуется сетчатым фильтром и может использоваться для отбора усредненных проб и замера уровней. Вся конструкция помещается в породу под защитой обсадной трубы, которая впоследствии извлекается. Для дифференцированного поднятия проб на поверхность можно применять распределительное устройство, соединенное гибкими шлангами со всеми секциями.

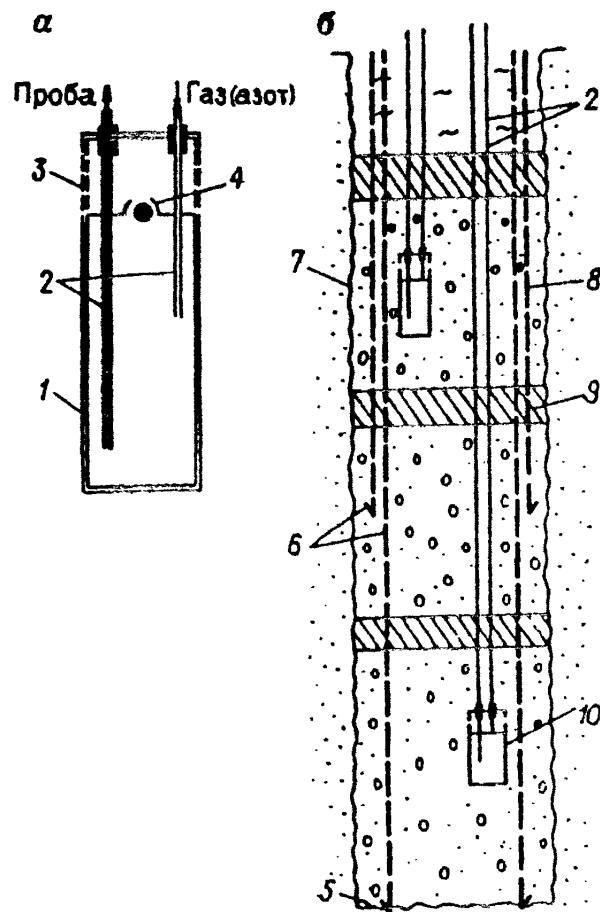


Рис. 19.2. Конструкция секционного пробоотборника (а) и схема установки капсул в скважину (б): 1 — пластиковая стенка капсулы-коллектора; 2 — нейлоновые трубы; 3 — пористая мембрана секции; 4 — шариковый клапан; 5 — забой скважины; 6 — извлекаемые колонны обсадных труб; 7 — стенка скважины; 8 — пористая обсыпка; 9 — глинистые перемычки; 10 — пробоотборник.

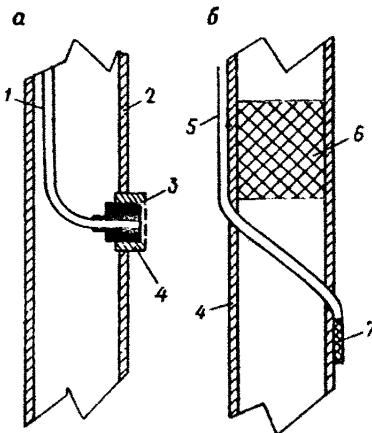


Рис. 19.3. Типовые конструкции секционных пьезометров с внутренней (а) и внешней (б) водоотборными трубками: 1 — полимерная трубка; 2 — несущая труба; 3 — пористая мембрана; 4 — герметичная пробка; 5 — металлическая трубка; 6 — фильтр для отбора усредненных проб; 7 — «точечный» сетчатый фильтр.

В последнее время все шире стали использоваться аналогичные стационарные секции, содержащие колонку грунта природного состава и состояния. Такая колонка, полученная из отобранного с определенной глубины образца грунта, помещается в капсулу, которая опускается в скважину на исходную глубину и оставляется там на длительный период. В дальнейшем капсула вновь поднимается на поверхность для всесторонних анализов грунта и внутрипоровой жидкости. Возможен также вариант периодического отбора раствора из капсулы без ее извлечения. Таким образом создаются уникальные возможности для изучения состояния грунта и содержащегося в нем подземного флюида в гидрогеохимической и биогеохимической установке, максимально приближенной к реальной.

Стационарные пробоотборники под дном технических водоемов. Они устанавливаются для контроля за изменениями в химиче-

ском составе воды, инфильтрующейся из бассейна промышленных стоков через донные отложения. При выборе конструкций наблюдательных систем (закладываемых до заполнения бассейна) необходимо учитывать возможность их эксплуатации в различных гидродинамических режимах нисходящей инфильтрации — не только при полном, но и при частичном водонасыщении порового пространства. В условиях полного водонасыщения для отбора проб могут быть рекомендованы либо секционные пьезометры, аналогичные по своим техническим характеристикам описанным выше, либо еще более простые системы автономных камер — коллекторов, располагаемых на различных глубинах. Представительность таких наблюдений определяется прежде всего надежностью изоляции (посредством цементации и глинизации) интервала отбора от прямой инфильтрации воды через зону, нарушенную при оборудовании контрольного пункта. Для отбора поровых вод из донных отложений, инфильтрация через которые происходит при неполном водонасыщении, могут применяться системы типа лизиметров, также этажно размещаемых под дном водоема. Конструкции подобных пробоотборников-лизиметров достаточно детально разработаны; высокая эффективность их внедрения подтверждается практикой исследований в зоне аэрации. Одна из типовых конструкций и схема установки представлены на рис. 19.4. Основным элементом является пористая керамическая чашка, через которую поровая влага поступает в герметичную капсулу в результате создаваемого в ней разрежения (порядка 1000 Па); последнее достигается при помощи вакуумного насоса, соединенного с камерой полиэтиленовой трубкой. После накопления необходимого объема пробы, вакуумная установка отключается, а собранная вода вытесняется на поверхность нагнетаемым в камеру воздухом (или инертным газом) через другую трубку. Для установки пробоотборника проходится шурф или скважина; на забое устраивается бентонитовая подушка для изоляции лизиметра снизу. Вокруг керамической чашки и несколько выше пространство заполняется тонким кварцевым порошком — для улучшения ее контакта с вмещающими породами. Выше лизиметра ствол скважины (шурф) на некотором интервале тампонируется бентонитовой смесью и заполняется экранирующими дно бассейна отложениями. В одной точке наблюдений могут быть расположены два-три лизиметра (один под другим).

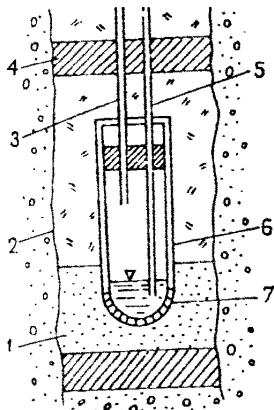


Рис. 19.4. Конструкция и схема установки пробоотборника-лизиметра: 1 — кварцевая засыпка; 2 — стенка скважины; 3 — полиэтиленовая трубка для создания разрежения воздуха; 4 — бетонитовая перемычка; 5 — вспомогательная (водоподъемная) трубка; 6 — пластиковая оболочка; 7 — пористая керамическая чашка.

Временная изоляция опробуемых интервалов. Производится непосредственно перед отбором гидрохимических проб. Намеченный для опробования интервал изолируется сверху и снизу тампонами (пакерами) и оборудуется одновременно техническими средствами для откачки из него пластовой воды. Однако в настоящее время существуют лишь единичные опытные разработки подобных систем. Так, для двухстороннего перекрытия интервала может применяться скважинный снаряд, схематично изображенный на рис. 19.5. Пере-крытие опробуемого интервала здесь происходит в результате расширения резиновых тампонов (баллонов) под действием нагнетаемо-го в них воздуха. При помощи сжатого воздуха осуществляется и выталкивание некоторого объема воды на поверхность. Заметим, что существующие системы двухстороннего пакерного перекрытия ин-тервала весьма громоздки, а установка пакеров требует большого числа спуско-подъемных операций.

Изоляция затрубного пространства. Проводится в сочетании с установкой нескольких (не менее трех) секционных фильтров в одной скважине, отделенных друг от друга по «затрубью». Если по отдельности такие операции относятся к разряду стандартных и дав-но освоены специалистами-буровиками, то их сочетание представля-ет определенные технические трудности (при больших глубинах бу-

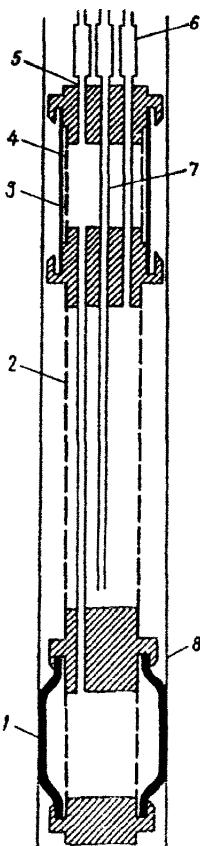


Рис. 19.5. Конструкция системы «двойной пакер» для отбора проб из изолированных интервалов: 1 — пакер (в рабочем положении); 2 — фильтр принимающей емкости; 3 — воздушные фильтры; 4 — резиновый пакер (в исходном положении); 5 — трубка для нагнетания в пакерные камеры сжатого воздуха; 6 — трубка для подъема пробы на поверхность; 7 — трубка для нагнетания воздуха при выталкивании пробы воды; 8 — стенка скважины (или обсадной трубы).

рения). В качестве одного из вариантов, можно предложить известный способ установки труб «вспотай» с цементацией (глинизацией) затрубного пространства при смене диаметра бурения (рис. 19.6а), хотя эта операция не столь проста при больших (более 100-150 м) глубинах. Еще одна возможность заключается в выводе обсадных колонн на поверхность (образование так называемой системы «телескоп»). Цементация затрубного пространства при каждом переходе на меньший диаметр осуществляется по уже рассмотренной стандартной схеме. Однако для исключения возможных перетоков воды по межтрубному пространству все обсадные колонны (кроме кондуктора) снабжаются фиксируемыми на поверхности кольцами из мягкой резины; они устанавливаются с таким расчетом, чтобы при спуске обсадной колонны участок смены диаметра скважины оказался перекрытым под действием веса труб (см. рис. 19.6б). В этом случае необходимо предусмотреть также перфорацию всех устанавливаемых колонн в интервалах, подлежащих опробованию. В трещиноватых породах локальная цементация затрубного пространства, например, выше установленного фильтра (рис.

19.7) может осуществляться непосредственно из обсаженной скважины. Для этого перед фильтром устанавливается временный цементный «мост», выше которого обсадная труба перфорируется. Тяжелый цемент, подаваемый в колонну, достигает «моста» и выдавливается через отверстия в обсадной трубе, заполняя промежуток между стенками скважины и трубой и изолируя фильтр от вышерасположенной области пласта; после затвердевания цементного раствора образовавшуюся перемычку разбуривают.

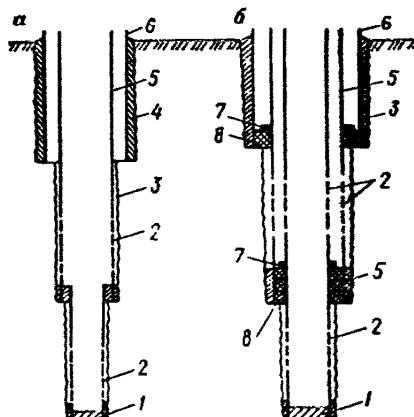


Рис. 19. 6. Схема изоляции при установке труб «впоптай» (а) и при телескопической конструкции наблюдательной скважины (б): 1 — пробка; 2 — фильтр; 3 — стенка скважины; 4 — область цементации затрубного пространства; 5 — обсадные трубы с фильтром; 6 — кондуктор; 7 — металлическое кольцо-фиксатор; 8 — резиновое кольцо.

Качество затрубной цементации проверяется каротажем (термометрическим, радиационным и др.).

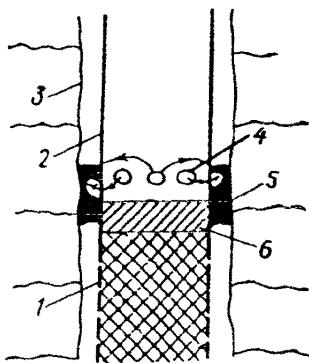


Рис. 19. 7. Схема изоляции затрубного пространства над фильтром в трещиноватых породах: 1 — фильтр; 2 — трубы с фильтром; 3 — стенка скважины; 4 — отверстия в трубе, через которые выдавливается цемент; 5 — цемент в затрубном пространстве; 6 — временный цементный мост.

19.4. Гидрохимическое опробование при наблюдениях и его достоверность

19.4.1. Показатели, контролирующие качество подземных вод

При наблюдениях за гидрохимическим режимом подземных вод контролируются следующие группы их качественных показателей: 1) концентрации компонентов и соединений, входящих в состав сточных растворов; 2) показатели, регламентируемые общими санитарно-гигиеническими требованиями к питьевым водам; 3) показатели, характеризующие агрессивность сточных растворов; 4) прочие физико-химические и микробиологические характеристики подземных вод, определяющие или отражающие условия развития полей загрязнения водоносных горизонтов; 5) концентрации природных и техногенных индикаторов — маркирующих элементов, распре-

деление которых характеризует особенности подземной гидродинамики и условия взаимосвязи поверхностных вод с подземными.

Среди микрокомпонентов, нормируемых соответствующим Гостом, можно выделить две основные группы [4]: первая включает элементы, ПДК которых обычно намного больше их фоновых концентраций в слабоминерализованных водах (сюда, например, относятся ионы меди, молибдена, свинца, цинка); вторая объединяет элементы, ПДК которых близки к фоновым (например, ионы железа, марганца, фтора, селена, бериллия). При изучении естественных вариаций химического состава подземных вод особое внимание должно уделяться второй группе элементов. Однако, в нарушенных гидрогеохимических условиях загрязнение подземных вод часто определяется резким ростом концентраций элементов первой группы.

Особое место должно отводиться изучению параметров гидрогеохимических систем, контролирующих возможные сдвиги в общем химическом балансе подземных вод при их загрязнении; таковым является, например, окислительно-восстановительный потенциал природного раствора ($\text{pH} - \text{Eh}$). В то же время, условия миграции компонентов определяются в значительной степени преобразованием природного органического вещества микробиологическими процессами [7]. Отсюда следует, что контроль качества подземных вод должен включать в себя изучение содержания в воде органических веществ и микроорганизмов на основе специальных видов физико-химических и микробиологических анализов водных проб.

Важное значение имеют выявление и последующий контроль за распределением маркирующих компонентов. К ним могут относиться любые (естественные или техногенные) элементы и соединения, повышенные или, наоборот, пониженные (по сравнению с фоновыми) концентрации которых характерны для наблюдаемых источников загрязнения или пополнения подземных вод. Наблю-

дения за миграцией этих компонентов позволяют:

- а) идентифицировать поверхностные и глубинные источники питания водоносных горизонтов; б) определить пути транзита, участки и интенсивность разгрузки подземных вод; в) оценить скорость движения подземных вод и величину инфильтрационного питания через зону аэрации (гл. 23).

19.4.2. О требованиях к качеству гидрохимического опробования

Гидрохимическое опробование базируется на использовании прямых методов (отбор проб воды или образцов водоносных пород) или косвенных (гидрогеофизические методы индикации). Основным источником информации являются химические анализы проб из пунктов режимной сети, состав которых не должен быть искажен физико-химическими процессами, активно протекающими в стволах скважин [6, 9, 10]. Для исключения существенных погрешностей гидрохимического опробования, отбору проб должна обязательно предшествовать прокачка скважин, причем обычно ее минимальный объем трудно определить заранее. Как показывает опыт, рекомендуемый в ряде руководств отбор воды в количестве двух-трех обводненных объемов скважины может оказаться недостаточным. Наиболее надежными показателями необходимой интенсивности прокачки можно считать параметры, непосредственно отражающие состояние физико-химической системы [11]: удельная электропроводность, pH-Eh и температура; все они достаточно легко оцениваются в полевых условиях. Стабилизация этих параметров при прокачке может служить критерием для допустимости отбора гидрохимической пробы (в любом случае она должна отбираться на уровне фильтра); если требуемый для этого объем прокачки слишком велик, то скважина должна рассматриваться как некондиционная: следует помнить, что

увеличение интенсивности и продолжительности прокачки в условиях неоднородного гидрохимического разреза может вызвать «подтягивание» к фильтру (сверху или снизу) вод иного состава. В то же время, на такого рода прокачку иногда имеет смысл идти сознательно, коль скоро существует опасение, что загрязнение приурочено к тонкой проводящей зоне, не вскрытой наблюдаемым интервалом скважины. С другой стороны, даже при интенсивных прокачках отбор проб по наблюдательным скважинам часто не отражает наличия так называемых «микрозитов» в гетерогенных водоносных средах: в относительно застойных зонах химический состав раствора может ощутимо отличаться от наиболее водопроводящих зон.

Для оценки качества опробования может применяться и скважинная резистивиметрия: отбор проб ведется после стабилизации показаний резистивиметра по ходу прокачки. Резистивиметрия наблюдательных скважин может вообще исключить необходимость отбора гидрохимических проб, например, в наблюдениях за процессами загрязнения подземных вод по общей минерализации [6].

При больших значениях последней, возникают дополнительные погрешности опробования в скважинах, вскрывающих одновременно два или более водоносных горизонта с различающимися по химическому составу водами: в них идет процесс гравитационного перемешивания вследствие различной плотности воды. Как показали лабораторные исследования, интенсивность подобных процессов достаточно велика и возникают они уже при относительном различии в минерализации вод смежных горизонтов порядка первых десятков процентов. В этом же направлении действуют термоконвективные точки в стволе. Поэтому поинтервальный отбор проб в подобных условиях ненадежен, и такие скважины должны исключаться из опробования или оборудоваться по специальной схеме фильтрами из изолированных секций (см. разд. 19.3). В противном случае, например, границу раздела (узкую переходную зону) между плотными сточными растворами, фильтрующимися от бассейнов промстоков, и пластовой водой удается зафиксировать достаточно надежно лишь в

процессе бурения, так что гидрохимическому опробованию при проходке скважин здесь должно уделяться первостепенное внимание.

В слабопроницаемых отложениях даже интенсивная прокачка скважин перед отбором не всегда обеспечивает требуемое качество пробы, ибо скорость заполнения пьезометра после прокачки соизмерима со скоростью протекания реакций, ведущих к изменению химического состава воды в скважине. Поэтому для слабопроницаемых пород предпочтительнее строить опробование на отборе образцов пород для последующих выжимок поровых вод. На отбор образцов ориентируются и некоторые биогеохимические методы контроля загрязнения.

Частота отбора проб из скважин режимной сети должна выбираться с учетом возможной интенсивности развития процессов загрязнения во времени. С этой точки зрения, с максимальной частотой должны опробоваться наблюдательные скважины, оборудованные фильтрами на трещиноватые породы: пробы из ближайших к источнику загрязнения скважин должны отбираться в первое время 2-3 раза в месяц, для удаленных скважин назначается одно опробование в месяц. Пробы из скважин на песчаные толщи отбираются ежеквартально. При появлении в пробах загрязняющих компонентов, частота отбора должна быть заметно повышена.

Для прокачки скважин желательно использовать насосы; не исключается и желонирование скважин, однако прокачка в этом случае получается менее равномерной. Применение эрлифта приводит к загрязнению проб кислородом воздуха, при этом легко окисляются металлы (такие, например, как железо, марганец), нарушается газовый режим, происходит смещение физико-химических равновесий; поэтому прокачка эрлифтом часто приводит к отбору непредставительных проб. Впрочем, в любом случае, рекомендуется отбирать гидрохимические пробы в процессе откачки несколько раз: откачка смещает гидродинамическое равновесие в слоистой или крупноблоч-

ной трещиноватой системе и меняет, соответственно, концентрации в скважине, особенно при отборе проб в «длинных» интервалах. С этой точки зрения, состав воды в скважине — почти всегда неравновесный, и до следующей прокачки «стационар» вообще не достигается (в этом смысле, температура воды — гораздо более стабильный показатель, коль скоро речь идет о задачах индикации или мониторинга).

При опробовании режимных скважин, с целью выявления распределения скоростей потока по ее стволу и оптимальных точек отбора проб, используют расходометрию и резистивиметрию. Кроме того, для контроля можно рекомендовать оценку состояния прифильтровой зоны наблюдательных скважин режимной сети периодическими экспресс-наливами.

Таким образом, качество гидрохимического опробования во многом зависит от широкой группы природных и технических факторов; среди них:

- 1) методика отбора и погрешности сопутствующих замеров,
- 2) глубина отбора и длина фильтра,
- 3) частота отбора проб,
- 4) качество гидрохимических анализов,
- 5) макронеоднородность пласта,
- 6) микронеоднородность (на уровне, меньшем масштаба опробования),
- 7) физические свойства подземного раствора (в первую очередь, плотность).

Все эти и другие факторы определяют неизбежный «шум» в данных гидрохимического опробования, ослабление которого посредством прямых оценок соответствующих погрешностей или их статистического сглаживания — особая задача исследований.

19.5. Изучение миграции минерализованных стоков методами поверхностной геофизики*

Задача оконтуривания в плане и в разрезе ореолов загрязнения обычно решается на основе дорогостоящего бурения скважин с поинтервальным гидрохимическим опробованием водоносных пород. Дополнительную информацию может дать гидрогеологическая съемка района возможного загрязнения подземных вод, однако на «закрытых» площадях ее проведение часто лишено всякого смысла. В то же время, при загрязнении подземных вод минерализованными промышленными стоками его границы могут быть вполне надежно определены с помощью методов электроразведки. Опыт показывает, что наиболее эффективным и универсальным в этом плане является метод вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ), позволяющий расчленить геолого-гидрогеологический разрез по вертикали и оценить удельное электрическое сопротивление пород, связанное с минерализацией подземных вод. Поэтому, если геофизическими работами выявлено, что электропроводность массива определяется, в основном, минерализацией насыщающей породы жидкости, то ВЭЗ могут успешно применяться для оконтуривания ореолов загрязнения в плане и в разрезе. При этом детализация ореолов, по данным ВЭЗ, основывается на экспериментально выявляемой (для конкретных условий) функциональной связи между удельной электропроводностью пород и минерализацией воды. Если наличие такой связи установлено, то по данным ВЭЗ могут быть построены геоэлектрические карты или разрезы в изолиниях удельных или кажущихся электросопротивлений пород. Далее (в случае удельных электросопротивлений) они могут быть трансформированы в карты (разрезы) минерализации подземных вод, которые позволяют судить о границах ореola подземных вод с повышенной — в результате проникновения промышленных стоков — минерализацией, об источниках загрязнения и путях миграции промышленных стоков, областях их разгрузки, интенсивности загрязнения подземных вод на различных участках и т.д. Такие карты и разрезы, кроме того, служат незаменимой

* Данный раздел написан Е.В.Мольским и В.В.Щемилинином.

основой для постановки и решения прогнозных задач и для разработки мероприятий по охране подземных вод.

Постановка и интерпретация ВЭЗ в целом осуществляются по достаточно стандартизованной методике; выделим лишь некоторые моменты:

1) электрораззондирования наиболее эффективны на площадях с детально расчлененным геологическим разрезом и с хорошо изученными гидрогеологическими условиями;

2) достаточно надежная количественная интерпретация кривых ВЭЗ возможна лишь для двух- и трехслойных геоэлектрических разрезов, когда удается определить мощности отдельных слоев и истинное удельное электрическое сопротивление слагающих их пород; во всех остальных случаях многослойных разрезов, в силу принципа эквивалентности, приходится, как правило, ограничиваться качественной интерпретацией полученных данных;

3) удельное электрическое сопротивление пород зависит от их температуры: соответствующие изменения могут достигать 10% и должны обязательно учитываться при обработке тех частей кривых ВЭЗ, которые попадают в зону сезонных температурных колебаний;

4) наиболее трудными для интерпретации являются геоэлектрические разрезы с низким сопротивлением горных пород;

5) для оценки возможной эффективности ВЭЗ рекомендуется предварительное электромоделирование конкретных условий проведения наблюдений.

В зависимости от геолого-гидрогеологических условий того или иного участка, постановка и интерпретация результатов ВЭЗ имеют свои характерные особенности.

В пористых песчано-глинистых отложениях, при достаточно простых гидрогеологических условиях (один водоносный горизонт, четкий горизонтальный водоупор большой мощности, глубина электрораззондирований — первые десятки метров), приходится иметь дело в основном с двухслойным геоэлектрическим разрезом — до загрязнения и с трехслойным — после него; контакт между растворами с различными минерализациями выражен обычно достаточно четко. Это наиболее простой для интерпретации случай, хотя и в данном варианте полученные результаты могут быть искажены влиянием литологической неоднородности, изменениями пористости и температуры пород; тем не менее ВЭЗ чаще всего дают однозначно интерпретируемые результаты. Подавляющее большинство публикаций

посвящено использованию электроразведки именно в подобных простых условиях. В них приводятся надежно положительные результаты, а метод ВЭЗ рекомендуется к использованию в широком круге условий.

В трещиноватых и трещиновато-пористых коллекторах использование ВЭЗ сопряжено со значительно большими трудностями, причем практически отсутствуют публикации, посвященные методике проведения и гидрогеологической интерпретации ВЭЗ в подобных ситуациях. Для рассматриваемых типов коллекторов характерно непостоянство степени трещиноватости и физико-механических свойств пород в плане и в разрезе. В то же время, в водоносных горизонтах, приуроченных к трещиноватым породам, формируются ореолы наиболее сложной пространственной конфигурации; в частности, переходная зона в плане между сточными (минерализованными) и пластовыми водами обычно имеет масштаб, сопоставимый с протяженностью всего ореола засоления, так что четко выраженный контакт между ними отсутствует. Именно эти обстоятельства в основном и обуславливают трудность и неоднозначность интерпретации исходных материалов; поясним данное положение.

1. Основной задачей ВЭЗ является выделение в уже изученном геологическом разрезе зон пониженных электрических сопротивлений, которые, в принципе, в дальнейшем должны отождествляться с зонами проникновения в породы промышленных стоков с повышенной минерализацией. Однако, в сложном многослойном геологическом разрезе и при частых фациальных замещениях по простиранию в толще осадочных трещиноватых пород, заранее даже приблизительно неизвестно, на каких глубинах в той или иной точке измерений следует ожидать загрязнения (в отличие от выдержанного разреза песчано-глинистых отложений). Поэтому приходится значительно уменьшать шаг измерений для более детального геоэлектрического расчленения толщи.

2. Литологическая и фильтрационная неоднородность обуславливает чаще всего многослойный характер геоэлектрических разрезов, для которых возможна только качественная интерпретация. Двух- и трехслойные разрезы могут быть получены обычно только для верхней части изучаемой толщи (до 50-60 м, в зависимости от литологии).

3. Всегда существует опасность принять наличие зон пониженных сопротивлений, обусловленных ростом трещиноватости массива

горных пород, за признак загрязнения водоносного комплекса минерализованными стоками. Затруднения такого рода оказываются весьма существенными, главным образом, в скальных трещиноватых породах, особенно при «низкоомном» геоэлектрическом разрезе. В подобных условиях понижение сопротивления породы вследствие роста ее трещиноватости, в том числе и на незагрязненных промышленными стоками участках, может оказаться сопоставимым по величине с изменениями в электропроводности пород, вызванными насыщением трещинного пространства минерализованными промышленными стоками (степень разбавления которых, а следовательно, и их электросопротивление заранее неизвестны).

В то же время, в трещиновато-пористых коллекторах, характеризующихся значительной пористостью блоков (на один-два порядка более высокой, чем трещинная пустотность), влияние неоднородной трещиноватости на геоэлектрические свойства среды заметно сглаживаются: электрическое сопротивление пород в этом случае определяется, в основном, электропроводностью пористых блоков — параметром, значительно более устойчивым по сравнению с электропроводностью трещинного пространства. Учитывая далее, что продвижение основного фронта происходит по мере насыщения солями поровых вод (соответственно, заметно возрастает электропроводность блоков), можно говорить о повышении надежности метода в трещиновато-пористых водоносных комплексах.

В любых случаях существенно трещиноватых водоносных пород, результаты наземной электросъемки должны интерпретироваться с широким использованием данных каротажа скважин, а также результатов параметрических и лабораторных исследований (в частности, данных о суммарной электропроводности и других свойствах водовмещающих пород). Основные требования к методике интерпретации ВЭЗ в трещиновато-пористых водоносных породах представляются в следующем виде.

1. На первом этапе интерпретации необходимо получить четкие представления о типах исходного (фонового) разреза на исследуемом участке и оценку электросопротивлений водовмещающих пород. Примерная оценка сопротивлений может проводиться как путем использования данных каротажа скважин, так и по ВЭЗ для тех точек, где соответствующие породы залегают близко к дневной поверхности. При этом следует учитывать, что типы кривых ВЭЗ могут различаться в зависимости от литологического состава пород, с которых

начинается разрез в точке постановки ВЭЗ. Кроме того, в зависимости от мощности и глубины залегания, тот или иной слой пород может проявляться на кривых электроздондирования с различной степенью отчетливости, а иногда (при слишком малой мощности по сравнению с перекрывающей толщиной) — совсем не отражаться на этих кривых. Поэтому для получения типового фонового геоэлектрического разреза (или нескольких таких разрезов для отличающихся по геологическому строению и гидрогеологическим условиям участков) необходимо выполнить серию графических построений различных возможных его вариантов.

2. На следующем этапе изучаются данные измерений в пределах предполагаемого ореола загрязнения и в его ближайшей окрестности (т.е. с выходом на заведомо «фоновые» участки). Из всей совокупности полученных при этом кривых отбираются только те, которые не отвечают полученному ранее представлению о фоновом разрезе.

3. Выделенные путем такой отбраковки кривые подвергаются дополнительной обработке: вводятся поправки на влияние наклонных к дневной поверхности границ раздела (например, тектонические нарушения), неровностей рельефа (овраги, лога, и т.п.) и др. Только после этих операций такую нестандартную кривую (если она сохранила нестандартный облик) можно расценивать как аномальную, фиксирующую более минерализованные, по сравнению с естественным фоном, подземные воды.

4. Следует подчеркнуть необходимость использования (для уточнения и расшифровки данных электроразведки) других методов поверхностной геофизики. Так, очевидно, что изменения в минерализации подземных вод практически не оказывают влияния на упругие свойства пород. В этом плане представляется перспективной постановка сейсмоакустических исследований в качестве дополнения к ВЭЗ для расшифровки возможного влияния степени трещиноватости пород, в том числе и техногенной, неведенной горными работами [5].

В целом, использование методов поверхностной геофизики в рамках контроля качества подземных вод на участках их загрязнения минерализованным стоками весьма перспективно и уже в настоящее время может рассматриваться как вполне стандартная процедура. Отсюда разумно требовать постановку ВЭЗ на таких участках до начала загрязнения: эта операция придает интерпретации повторных ВЭЗ по тем же профилям большую надежность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 19

1. Боревский Б.В., Плугина Т.А. Возможности использования гидрохимических данных при оценке взаимосвязи водоносных горизонтов и проницаемости раздельных слоев. Тр. ВСЕГИНГЕО, 1976, вып. 93, с. 15-29.
2. Гольдберг В.М. Методические рекомендации по гидрогеологическим исследованиям и прогнозам для контроля за охраной подземных вод. М., ВСЕГИНГЕО, 1980, 86 с.
3. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М., Недра, 1984. 262 с.
4. Крайнов С.Р., Щвец В.М. Основы геохимии подземных вод. М., Недра, 1980, 285 с.
5. Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румынин В.Г. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах. Л.: Недра, 1988, 279 с.
6. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л., Недра, 1980, 320 с.
7. Тютюнова Ф.И. Физико-химические процессы в подземных водах. М., Наука, 1976. 127 с.
8. Фоменко В.И., Забейда М.И., Новоселова Т.Н. Методические рекомендации по организации режимных наблюдений в горнорудных районах. Белгород, ВИОГЕМ, 1981, 48 с.
9. Ярцева Е.Н. Опреснение подземных вод в скважинах над фильтром и гидрохимическое опробование. — Разведка и охрана недр. 1973, N4, с. 43-46.
10. Walker W.H. Monitoting toxic chemical pollution flow land disposal sites in human regions. — Ground Water, 1974, v. 12, N4, p.p. 213-218.

11. Wood W.W. Guidelines for collection and field analysis of groundwater samples for selected unstable constituents (Book 1) — Techniques of Water-Resources Investigations of the USGS. Washington, 1976, 24 p.

ОПЫТНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИНДИКАТОРНЫМИ МЕТОДАМИ В СВЯЗИ С ОЦЕНКОЙ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ГЛАВА 20

Использование индикаторных методов при опытно-фильтрационных опробованиях

В предшествующих разделах неоднократно подчеркивалось, что качестве гидрохимических прогнозов зачастую резко снижается из-за недостаточной обоснованности миграционных моделей необходимой геофильтрационной информацией. В частности, традиционная постановка опытно-фильтрационных работ обычно не обеспечивает требуемую детальность: а) профильного расчленения водоносных комплексов (включающего оценку изменчивости и анизотропии фильтрационных свойств пород в разрезе); б) расшифровки плановой и, особенно, профильной структуры фильтрационных потоков; в) изучения взаимосвязи бассейнов промостков с подземными водами, а нередко — и отдельных водоносных горизонтов между собой. Поэтому заслуживают внимания любые пути роста информативности ОФР, причем особую значимость они имеют для увеличения достоверности прогнозов загрязнения подземных вод, требующих резко повышенной детальности изучения фильтрационных условий и свойств водоносных пород. Большие возможности для этого предоставляют, в частности, специальные индикаторные исследования. Учитывая опытно-фильтрацион-

ную направленность такого рода работ, мы будем далее пользоваться для их обозначения аббревиатурой ОФИР*, подразделяя их на опробования (ОФИО) и наблюдения (ОФИН).

Имея ввиду реальную практическую ситуацию с опробованиями, в данной связи основной упор разумно сделать на индикаторные эксперименты, не требующие больших дополнительных затрат и осуществимые в сравнительно короткие сроки. Этим условиям отвечают индикаторные запуски, привязанные к традиционным видам опытных работ — кустовым откачкам, нагнетаниям, наливам в скважины. Одновременно подобные запуски можно рассматривать и как предварительные миграционные эксперименты, позволяющие лучше спланировать ОМО. Правда, индикаторные запуски могут иногда оказаться не вполне совместимыми с традиционными видами ОФО — с позиций требуемого масштаба и продолжительности эксперимента или оборудования скважин; в таких случаях их приходится ориентировать лишь на ближние наблюдательные скважины опытного куста или на бурение дополнительных скважин.

Наряду с этим следует проанализировать и целесообразность некоторых специализированных модификаций ОФИО, — в тех случаях, когда таким путем существенно расширяются возможности изучения фильтрационных свойств горных пород; последнее относится, главным образом, к изучению профильной фильтрационной анизотропии водоносных комплексов, надежные оценки которой чаше всего остаются за рамками традиционных видов ОФО.

* Индикаторные работы опытно-фильтрационной направленности.

20.1. Использование индикаторов для детализации фильтрационного процесса при опытных откачках (нагнетаниях)

20.1.1. Предварительное опробование индикаторными методами скважин опытно-фильтрационных кустов

Резистивиметрия и термометрия (наряду с расходометрией) гидрогеологических скважин являются сейчас достаточно традиционными при постановке и проведении ОФО. Исходя из практических потребностей предварительного опробования скважин опытных кустов, заслуживают внимания три задачи исследований: 1) изучение перетоков по стволам скважин (до начала собственно опытного возмущения); 2) определение направления и скорости фильтрации естественного потока на участке опытного куста; 3) оценка скин-эффекта опытных скважин.

Для изучения достаточно интенсивных перетоков по стволу скважины индикаторные запуски обычно более трудоемки и менее надежны по сравнению с расходометрией. Особо выделим оценку перетоков поискажению скважиной естественного температурного поля. Так, если последнее характеризуется довольно четкой ($1-2^{\circ}\text{C}$) разностью температур по отдельным водоносным слоям (зонам), то термограмма вполне однозначно фиксирует наличие перетоков и их направленность, т.к. вместо плавного изменения температуры от одного прослоя к другому в пределах разделяющей пачки фиксируется примерно по-

стоянная температура, отвечающая прослою, из которого идет переток.*

Вторая из упомянутых задач уже достаточно подробно рассмотрена в рамках предварительного опробования скважин опытно-миграционных кустов; к тому же, для опытно-фильтрационных работ она имеет подчиненное значение, так как на практике чаще всего представляется интерес лишь стандартный гидрогеофизический каротаж, ориентированный на выделение в разрезе прослоев или зон с достаточно резко различающимися друг от друга скоростями естественной фильтрации (что при плановом движении отвечает предварительной дифференциации опробуемого разреза по проводимости).

Для определения естественной действительной скорости потока можно использовать запуск индикатора в одиночную скважину с последующей откачкой из нее [8]:

$$v_d = \sqrt{Q t / \pi n m} / t_4, \quad (20.1)$$

где t_4 — отвечает времени фиксации центра меченого тела (центра массы индикатора на «возвратной» кривой), считая от момента запуска, t — период от начала откачки до времени фиксации центра меченого тела. Для устранения влияния инерционности скважин время выставления не должно быть слишком малым.

Последняя задача исследований, связанная с оценкой дополнительных сопротивлений фильтров опытных скважин по данным резистивиметрии, подробно обсуждалась в разд. 16.4. Отметим лишь, что определяемый по результатам резистивиметрии в возмущенном потоке коэффициент искажения ξ связан с показателем скин-эффекта

* Для изучения перетоков в затрубном пространстве также используется термометрия.

(сопротивления прифильтровой зоны) скважины ζ простой зависимостью [3]: $\xi = 4/(2 + \zeta)$.

Наконец, сочетание запусков и расходометрии не только увеличивает вероятность правильной диагностики фильтрационного процесса при откачке, но и заметно повышает качество интерпретации запусков; в частности, если расходометрия наблюдательной скважины при откачке выявляет наличие интенсивных перетоков по ее стволу, то более надежно устанавливаются возможные интервалы миграции трассера.

Аналогичные подходы могут применяться и при интерпретации запусков в центральные скважины при опытных нагнетаниях (наливах). Несмотря на то, что в этом варианте приходится изыскивать специальные возможности для гидрохимического опробования наблюдательных скважин или для прослеживания трассера *in situ*, подобные запуски могут оказаться вполне оправданными в следующих ситуациях: 1) при фильтрационном опробовании пород, находящихся выше уровня грунтовых вод (необходимость в таких опробованиях усиливается в связи с прогнозами миграции загрязнений от бассейнов промышленных стоков); 2) при фильтрационном опробовании пластов с четко выраженной плановой анизотропией (см. разд. 20.1.4); 3) когда для нагнетания используется вода с температурой, существенно отличной от пластовой, — в этом случае остается лишь следить за изменениями температуры воды в наблюдательных скважинах; при этом, однако, приходится считаться с возможностями плотностной конвекции.

20.1.2. Изучение профиля проницаемости водоносного пласти

Достаточно разработанными и апробированными являются гидродинамические методы оценки параметров слоистых систем, допускающих использование расчетных схем «с перетеканием». Однако, применительно к задачам миграции особую значимость приобретает изучение слоистого разреза с различиями проницаемостей отдельных слоев в пределах одного порядка. Традиционная постановка фильтрационных опытов, ориентированная на суммарное опробование пластов и, соответственно, на модель плановой фильтрации, мало рассчитана на решение этой важной задачи, а одиночные поинтервальные откачки и нагнетания приносят информацию лишь качественного характера (о степени фильтрационной неоднородности можно судить, например, на основе изменчивости удельного водопоглощения). Ситуация несколько улучшается постановкой специально ориентированных откачек из несовершенных скважин при наличии разноуровневых «точечных» пьезометров: с более-менее удовлетворительной точностью реально могут рассчитываться двухслойные системы или системы, приводимые к таковым; соответствующие рекомендации для интерпретации опробований можно найти в работе [1]. Заметим, однако, что даже в этом, простейшем, случае корректность интерпретации часто остается под вопросом и должна обосновываться внимательным анализом чувствительности.

В конечном счете, основным способом дифференциации фильтрующего разреза остается расходометрия возмущающих скважин, хотя известные технические ограничения и ненадежность количественной интерпретации расходограмм отнюдь не позволяют считать эту важную задачу решенной.

Таким образом, не пренебрегая возможностями расчленения неоднородных толщ по данным фильтрацион-

ных опробований, целесообразно изыскивать пути повышения информативности такого рода опытных работ — без существенного их удорожания.

Наиболее естественно применять для этого пакетные запуски трассеров в наблюдательные скважины на последних этапах кустовых откачек*. Желательно использовать совершенные скважины, так как результаты опытов с несовершенными скважинами (как и в случае гидродинамических опробований) гораздо менее определены, особенно при несоответствии фильтровых интервалов по отдельным скважинам. Планирование и проведение таких запусков, в общем, идентично ОМО того же вида (см. разд. 16.1 и 16.3). Интерпретация осуществляется исходя из предпосылки послойного переноса индикатора в условиях плановой фильтрации. При этом используются графики изменения концентрации трассера в откачиваемой воде. Если на таком графике достаточно четко выделяются отдельные пики концентрации, отвечающие времени t_{max_i} поступления меченной воды по слоям с существенно различающимися коэффициентами действительной скорости фильтрации ($\chi_i^j = K_i/n_i$), то [5]:

$$\chi_i = \frac{\pi T r^2}{Q t_{maxi}}; \quad T_i = \frac{\pi r^2 T (m_i n_i)}{Q t_{maxi}}, \quad (20.2)$$

где T — суммарная проводимость пласта, определенная по результатам кустовой откачки**. При известных значениях n_i (найденных, например, из данных ОМО, лабораторных определений или по аналогии) можно опреде-

* Повышение информативности индикации при наливах и нагнетаниях может способствовать предпочтительности этих видов ОФО (по сравнению с откачками).

** При наличии данных о плановой анизотропии фильтрационного потока к скважине, приведенные расчетные зависимости должны корректироваться с учетом этого фактора (см. разд. 20.1.4).

лить послойные коэффициенты фильтрации k_i . Приближенный вариант определения значений k_i , предполагающий близость величин n_i , ориентируется на очевидные соотношения:

$$\sum_1^n k_i m_i = T; k_i t_{max\ i} = k_{i+1} t_{max\ (i+1)} = \dots = \text{const.} \quad (20.3)$$

Для правильной диагностики запусков по изложенной схеме необходимы, однако, представления о временной последовательности привноса трассера в скважину отдельными слоями, что реально при малом (два-три) их числе и при достаточно очевидно различающихся действительных скоростях движения по ним. В этой связи заметим, что точность приведенных здесь построений существенно повышается в важных частных вариантах, когда водоносный пласт содержит тонкий прослой с резко увеличенной проницаемостью или является двухслойным (при наличии разделяющего прослоя или без такового) при заметно различающихся фильтрационных свойствах слоев: в противном случае возможно взаимоналожение «пиков» отдельных концентрационных волн.

Наоборот, при близких показателях свойств пород в пределах многослойного пласта выходная индикаторная кривая, имеющая сравнительно плавный и симметричный характер, может трактоваться, в первом приближении, как отражение закона распределения коэффициента действительной скорости фильтрации k_i/n_i в пределах пласта. В частности, предполагая значения пористости для отдельных слоев близкими, получим значение коэффициента вариации W_k послойной проницаемости (см. разд. 16.2.1).

Описанный подход по своему назначению и логике интерпретационных формул аналогичен расходометрии центральной скважины; при необходимости, заменяя расходометрию, индикаторные запуски в среднем дадут несколько худшие (по крайней мере, в толщах с резко диф-

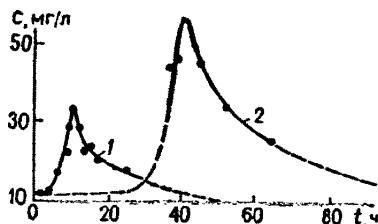
ференцированной проницаемостью) по качеству данные для оценки значений послойной проницаемости. Если же эти оценки необходимы для последующих миграционных прогнозов в рамках схемы послойного переноса, то индикаторные запуски подчас предпочтительнее расходометрии, ибо дают непосредственно расчетный параметр χ_i . Кроме того, при умеренной изменчивости проницаемости запуски выявляют ее более эффективно из-за их повышенной чувствительности к этому фактору.

В условиях, когда отдельные элементы опробуемой толщи характеризуются заметно различающимися химическими или температурными показателями подземных вод, большую помощь в расшифровке результатов откачек могут оказать также расчетные модели, учитывающие смешение воды в центральной скважине [2]. Прежде всего это касается откачек из слоистых пластов: таким путем наиболее четко контролируется соотношение расходов, поступающих из разных элементов разреза, вскрытого центральной скважиной. Наоборот, при откачках из пластов с перетеканием такой подход малоэффективен, за исключением весьма долговременных опытов (разд. 21.3).

Приведем простой пример использования индикаторного запуска для фильтрационной дифференциации разреза — оценки изменчивости χ_i в неоднородном по разрезу пласте. Индикаторный запуск NaCl в наблюдательную скважину был осуществлен на заключительном этапе откачки в процессе опробования водоносного горизонта, приуроченного к трещиноватым известнякам. Были приняты следующие опытные характеристики: расход откачки $Q = 51 \text{ м}^3/\text{сут}$, расстояние между скважинами $r = 30 \text{ м}$, общая мощность опробуемого интервала $m = 10 \text{ м}$. Предшествующий опыту расходометрический каротаж позволил выделить две заметно отличающиеся по проницаемости зоны: верхнюю, более проницаемую ($m_1 = 2 \text{ м}$) и нижнюю ($m_2 = 8 \text{ м}$), которая на расходометрических диаграммах трактовалась как менее проницаемая. На графике временного прослеживания (рис. 20.1) отчетливо выделены два максимума концентрации инди-

катора ($t_{max,1} = 10$ ч и $t_{max,2} = 40$ ч), существенно сдвинутые один относительно другого. По всей вероятности, пики максимальной концентрации связаны со временем прихода индикаторной волны по различным слоям: первый отвечает верхнему слою, второй — нижнему. Подставив исходные значения в первую формулу (20.1), получаем $\chi_1 = 4 \cdot 10^3$ м/сут, $\chi_2 = 1 \cdot 10^3$ м/сут (по данным откачки $T = 30$ м²/сут).

Рис. 20.1. Выходная кривая по данным замеров концентрации индикаторов в эксплуатационной скважине: 1-2 слои (1 — верхний, 2 — нижний)



Для решения рассмотренных задач может быть применен и тепловой индикатор (особенно в комплексах пористых пород): он сглаживает влияние скин-эффекта скважин, удобен для прослеживания *in situ*. В трещиноватых породах лучше ориентироваться на трассеры, не усваиваемые пористыми блоками. Иногда полезно сочетание теплового и солевого индикаторов. В ряде случаев при планировании запусков целесообразно выбирать индикатор, исходя из возможности использования плотностной конвекции; например, если желательно опробовать преимущественно верхнюю часть вскрытого скважиной интервала, то используется легкая трассирующая жидкость (например, теплая вода), в противном случае — тяжелая (например, холодная вода). Однако интерпретация таких запусков существенно осложняется.

Отметим, что все изложенные здесь модификации индикаторных запусков могут, конечно, применяться и при поинтервальном фильтрационном опробовании, причем в 300

этих условиях, как и в общем случае трассерных экспериментов (см. гл. 15), их эффективность обычно возрастает. Особо следует отметить наливы в скважины, вскрывающие сравнительно слабопроницаемые породы, в которых мало надежная расходометрия с успехом заменяется прослеживанием (резистивиметрами, термисторами и т.п.) за скоростью перемещения по стволу скважины контакта вод разного качества.

20.1.3. Изучение раскрытия индивидуальных трещин

Изоляция отдельных трещин, вскрытых скважиной, пакерами позволяет использовать методы гидравлического (фильтрационного) и трассерного опробования с целью нахождения параметра эффективного раскрытия трещин.

Формулы, используемые для интерпретации данных таких опробований, довольно просты [9, 10]:

для фильтрационного опробования —

$$b_h = \left[\frac{Q}{\Delta H} \cdot \frac{6\mu}{\pi \rho g} \cdot \ln \left(\frac{r_o}{r_w} \right) \right]^{1/3}, \quad (20.4)$$

для индикаторного опробования —

$$b_t = \left[\frac{6\mu}{\rho g} \cdot \frac{\ln(r_o/r_w)}{t_o \Delta H} (r_o^2 - r_w^2) \right]^{1/2}, \quad (20.5)$$

где b_h и b_t — «гидравлическое» и «трассерное» раскрытие трещины; μ и ρ — вязкость и плотность пластового раствора; g — гравитационная постоянная; Q — расход откачки; ΔH — перепад гидравлических напоров между точками r_o и r_w ; t_o — время движения трассера от точки ввода его в пласт (r_o) до откачивающей скважины (r_w). Формулы (20.4) и (20.5) вытекают из анализа процессов фильтрации и массопереноса в идеальных трещинах с постоянным раскрытием.

На практике фильтрационный и индикаторный методы дают заметно различающиеся результаты: обычно $b_h \ll b_r$. Причиной тому является реальная геометрия трещинного пространства. Так, гидравлическое сопротивление трещины (контролирующее расход откачки/нагнетания при оценке b_h) зависит преимущественно от участков с минимальным расстоянием между стенками трещины, отвечающих максимальным фильтрационным сопротивлениям. С другой стороны, время пребывания трассера в трещине (используемое при оценке b_r) зависит от ее общей — суммарной — емкости, т.е., в том числе, и от объема, не принимающего участия в формировании фильтрационного расхода.

К сожалению, в природных условиях существует множество факторов (двумерность потока в опробуемой трещине, наличие неучтенных в модели ее пересечений с более мелкими трещинами и др.), которые могут привести к существенным погрешностям в оценке раскрытия трещин.

20.1.4. Об эффективности фильтрационного опробования пластов по дуплетной схеме

Неоднократно отмеченные достоинства индикаторных экспериментов, проводимых по дуплетной схеме, заметно повышают ее дееспособность и в качестве способа фильтрационного опробования водоносных пластов, по крайней мере, когда основным искомым параметром является проводимость. Эффективность дуплетной схемы здесь определяется:

- сокращением требуемых объемов бурения на участке опытного куста;
- устранением трудностей, связанных с подачей или отводом и сбросом воды;
- возможностью четкой локализации опробуемого участка и априорной фиксации преобладающего направления фильтрации, что важно, соответственно, для планово-неоднородных и планово-анизотропных пластов, а также при опробовании объектов малой протяженности;
- возможностью дополнительного контроля результатов чередованием различных режимов возмущения, а также сопоставлением площадного и временного прослеживания, особенно — при наличии дополнительной наблюдательной скважины (в противном случае, площадное прослеживание может существенноискажаться влиянием «скинэффекта» возмущающей скважины);
- повышенными (при прочих равных условиях) возмущениями естественного фильтрационного потока, снижающими влияние последнего, а также резко уменьшающими или вообще устраниющими значение фоновых колебаний уровня;
- простотой ограничения понижения в скважине;
- возможностью достижения в эксперименте ясно выраженного стационарного режима, полностью исключающего влияние на результаты опыта гетерогенности емкостных свойств пласта;
- простотой диагностики опыта;
- возможностью создания (при опробовании отдельных интервалов в пределах зоны аэрации) наведенного потока с фиксированными расходами на входной и выходной границах; это придает дуплетной схеме наибольшую надежность при интерпретации, когда имеет место интенсивный вертикальных отток подаваемой в пласт воды.

На фоне всех отмеченных достоинств дуплетного фильтрационного опробования, индикация подаваемой в пласт воды дает важные дополнительные доводы в пользу применения этой схемы, по крайней мере, в комплексах чисто трещиноватых пород*:

- появляется возможность оценки соотношения расходов нагнетаемой и пластовой воды в общем объеме откачиваемой жидкости и, следовательно, дополнительного контроля «степени стационарности» фильтрационного процесса;
- при известной пористости, важным контролирующим показателем служит средневзвешенный коэффициент фильтрации, который вычисляется по величине действительной скорости, определенной в процессе запуска; для этих целей особенно полезен трассер, не усваиваемый пористыми блоками;
- на идентичном масштабном уровне одновременно оцениваются и фильтрационные, и миграционные параметры одного и того же участка пласта (в рамках одного эксперимента), что в конечном счете существенно экономит и средства, и время (если на объекте необходимо проводить не только ОФО, но и миграционные опробования);
- появляется возможность эффективной интерпретации фильтрационных опробований в субвертикальных потоках (см. разд. 21.2).

Решение фильтрационной задачи для дуплетного опробования легко получается из принципа суперпозиции [6]:

$$\Delta H = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r}{r'}, \quad (20.6)$$

* В гетерогенных комплексах, а также в гомогенных пористых породах приходится считаться с возможностью несовместимости фильтрационного опробования и индикаторного запуска с точки зрения требуемой продолжительности опыта.

где ΔH — изменение напора по сравнению с исходным, r и r' — расстояния от расчетной точки до нагнетающей и откачивающей скважин, соответственно.

Для точек на оси дуплета имеем:

$$\Delta H_d = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{2l - r}{r} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left(\frac{2}{\bar{r}} - 1 \right), \quad (20.7)$$

где $2l$ — расстояние между скважинами дуплета, имеющими расчетные радиусы r_c и r'_c ; $\bar{r} = r/l$.

Введем перепад напоров дуплетной системы:

$$\Delta H_d^o = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{(2l)^2}{r_c \cdot r'_c}, \quad (20.8)$$

и перепишем (20.8) в симметричном виде:

$$\frac{\Delta H_d}{\Delta H_d^o} = \frac{\ln \left(\frac{2}{\bar{r}} - 1 \right)}{\ln \left(\frac{2}{\bar{r}} \cdot \frac{2}{\bar{r}'_c} \right)}. \quad (20.9)$$

Зависимость $\Delta H_d = f(\bar{r})$ в интервале $0,4 < \bar{r} < 1,0$ близка к линейной; поэтому, принимая во внимание симметрию поля напоров, расположение здесь наблюдательных скважин мало целесообразно. С учетом: а) искажения потока «скин-эффектом» нагнетающей скважины, б) требований к сплошности трещиноватой среды и в) возможных отклонений от планового потока вблизи его границы (скважины), — мало целесообразно расположение наблюдательной скважины и в зоне $\bar{r} > (0,05+0,1)$. Очевидно, наиболее разумно иметь наблюдательную скважину в интервале $0,1 \leq \bar{r} \leq 0,4$, одновременно ориентируясь, по возможности, на выполнение дополнительных требований: $r > (5+10) l_t$ и $r > (0,3+0,5) m$, где l_t — характерное расстояние между водопроводящими трещинами, m — мощность пласта. Если эти, последние, условия не вносят серьезных ограничений, то наилучшая точка расположенная пьезометра отвечает $\bar{r} = 0,1$; при этом реальная величина ΔH_d составит здесь около половины от избыточного напора в нагнетающей скважине, т.е. будет обеспечено наиболее равномерное прослеживание поля напоров.

Однако, если пьезометр одновременно предназначается для фиксации проходящего трассера, то, с учетом резкой неравномерности скоростей вблизи нагнетательной скважины, лучше ориентироваться на расположение его в точке $\bar{r} \approx 0,4$. Наличие такого пьезометра позволяет исключить влияние «скин-эффекта» основных скважин при оценке проводимости на ограниченном ими участке (по стационарной зависимости вида (20.6)), а также независимо оценить проводимость времененным прослеживанием возмущения при первоначальном введении в работу лишь одной из них: в последнем случае оценивается осредненная проводимость в зоне влияния такого фильтрационного возмущения «за вычетом» области квазистационарного режима вблизи возмущающей скважины.

20.1.5. Оценка плановой фильтрационной анизотропии

Прослеживание движения трассера по разным лучам скважин опытно-фильтрационных кустов позволяет выявить плановую анизотропию коэффициента действительной скорости фильтрации (k/n) и, следовательно, получить приближенную оценку анизотропии коэффициента фильтрации k . При небольших глубинах опробования отсутствие наблюдательных скважин может компенсироваться использованием метода заряженного тела (см. разд. 15.4.2). Полезно заметить, что методы, основанные на запуске трассера, в целом гораздо чувствительнее к анизотропии, чем пьезометрия.

При размещении наблюдательных (запускных) скважин куста на главных осях анизотропии (на расстояниях r_{x1} и r_{y2}) время фиксации пиков индикаторной волны (t_{max}) в откачивающей скважине связано с коэффициентом анизотропии $\kappa' = \sqrt{(k_x/n_x)/k_y/n_y}$:

$$\frac{t_{max1}}{t_{max2}} = \frac{1}{(\kappa')^2} \cdot \left(\frac{r_{x1}}{r_{y2}} \right)^2. \quad (20.10)$$

При расположении скважин по лучам, образующим углы φ_i с направлением минимальной проницаемости [4],

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДИКАТОРНЫХ МЕТОДОВ
ПРИ ОПЫТНО-ФИЛЬРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЯХ

$$\frac{t_{\max 1}}{t_{\max 2}} = \frac{\kappa' \sin^2 \varphi_1 + \cos^2 \varphi_1}{\kappa' \sin^2 \varphi_2 + \cos^2 \varphi_2} \cdot \frac{\omega^2 \sin^2 \varphi_2 + \cos^2 \varphi_2}{\omega^2 \sin^2 \varphi_1 + \cos^2 \varphi_1} \cdot \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2,$$

(20.11)

где $\omega = \sqrt{n_x/n_y}$.

Весьма приближенно о плановой анизотропии можно судить и по коэффициентам разбавления индикатора $K_p = C_{\max}/C_o$ при пакетных запусках в пьезометры, расположенные на главных осях анизотропии: грубо говоря $\kappa \approx K_{px}/K_{py}$; однако гидродисперсия и массообмен между блоками и трещинами могут резко смещать эту оценку, особенно при большой разнице в удалениях пьезометров от центра куста.

Для сведения к минимуму возможного искажения результатов, возникающего вследствие наложения на опытное возмущение естественного фильтрационного потока, желательно выполнение критерия (15.5). В то же время, для количественной оценки показателя κ необходимы представления о структуре пласта, определяющие выбор пространственных осей анизотропии. Для этого полезно привлечение информации о геолого-структурных особенностях опытного участка; весьма уместным, в этом плане, оказывается и применение методов поверхностной геофизики, в частности метода заряженного тела.

Влияние плановой анизотропии на характер индикаторных криевых, полученных по данным запусков трассера в пьезометры при откачке из трещиноватых известняков, иллюстрирует рис. 20.2. Видно, в частности, что скорость переноса индикатора существенно определяется ориентацией пьезометров относительно главных осей анизотропии (их примерное положение установлено при помощи электропрофилирования опытного участка). Значение коэффициента плановой анизотропии κ' , рассчитанное по формуле (20.10), составляет 0,8.

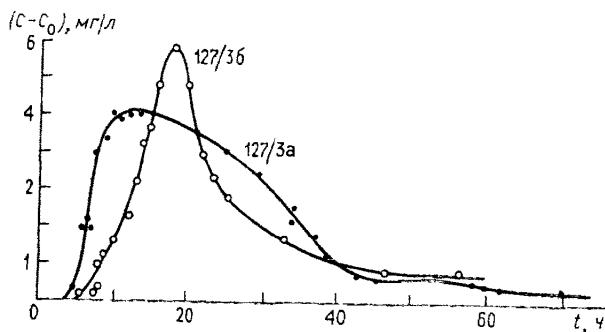


Рис. 20.2. Выходные кривые, полученные при пакетных запусках индикатора.

20.1.6. Об использовании естественных трасеров

В условиях, когда отдельные элементы опробуемой толщи характеризуются заметно различающимися химическими или температурными показателями подземных вод, встает вопрос о расшифровке результатов откачек путем анализа изменений содержания маркирующих компонентов (или колебаний температуры) в откачиваемой воде*. Чаще всего эта возможность реальна лишь для длительных (эксплуатационных) откачек (см. разд. 21.3). Интересен вариант оценки показателей интенсивности отжатия поровых растворов из разделяющих глинистых слоев или из блоков трещиноватых пород по гидрохимическим наблюдениям. Возможны также оценки по данным об изменении температуры окачиваемой воды в результа-

* К маркирующим компонентам могут быть отнесены также глобальные техногенные индикаторы (разд. 21.1).

те подтока из рек или водоема (при заметной разности в температурах подземных и поверхностных вод). Следует, однако, отметить, что под рекой (водоемом) уже в естественных условиях может оказаться зона подземных вод с аномальной температурой, обусловленной длительным и интенсивным кондуктивным переносом. С этой точки зрения, для малых рек дополнительная информация об их реакции на откачуку может быть получена термозондированием дна (см. разд. 21.2.2).

20.2. Использование трассеров при изучении опытными опробованиями вертикальной проницаемости и профильной фильтрационной анизотропии

Если при решении вопросов, рассмотренных в предыдущем разделе, индикаторные запуски играли, в основном, вспомогательную роль, то при опытной оценке вертикальной проницаемости и профильной анизотропии водоносных пластов* они могут нередко выдвигаться на первое место. Соответственно, здесь могут оказаться целеобразными и специализированные экспериментальные схемы, отходящие от традиционных ОФО; во всяком случае, к ним следует обращаться в тех случаях, когда исходная информация заставляет ожидать сильную зависимость условий работы намеченного инженерного сооружения от профильной фильтрационной анизотропии. Наиболее характерными примерами являются: подтягивание глубинных рассолов к водозаборам и дренажам; гравитационная дифференциация тяжелых промышленных стоков, поступающих в водоносные пласти из поверхностных техногенных бассейнов; поступление водопри-

* Для водоупорных толщ это реально лишь на основе ОМН.

токов в подземные горные выработки из залегающих непосредственно над ними обводненных пород; питание или разгрузка водоносных комплексов вдоль несовершенных (по степени вскрытия) естественных границ и др. Во всех случаях прогноз гидродинамического и гидрохимического режима затруднен из-за отсутствия надежных данных о показателе профильной фильтрационной анизотропии ($\kappa = k_z/k_x$), определение которого при гидрогеологической разведке или вообще не проводится, или дает слишком большие погрешности. Так, например, практикуемая оценка величины κ по данным откачек из несовершенных скважин является, как правило, малокорректной из-за слабой чувствительности пьезометрии к изменчивости этого параметра.

Весьма эффективными здесь представляются индикаторные запуски в условиях перемещения меченой жидкости вкрест напластования. Соответствующее гидродинамическое возмущение может достигаться различными способами. Наиболее надежной является схема «вертикальный дуплет», предполагающая наличие нагнетательного и откачивающего (с одинаковой интенсивностью) узлов примерно на одной вертикали (рис. 20.3а). Для этого могут использоваться либо две несовершенные скважины с фильтрами, в которой создается два изолированных друг от друга фильтрующих интервала с независимо задаваемыми режимами откачки — нагнетания (написа). Так образуется четко выраженный стационарный поток вкрест напластования, причем интерпретации гидродинамического и индикаторного возмущения взаимно дополняют друг друга.

Технически более простая экспериментальная схема «с подошвенным засолением» (см. рис. 20.3б) основана на предварительной индикации воды в нижней части пласта с последующей откачкой из скважины, пройденной в верхнюю его зону; здесь тем более возможно применение односкважинных вариантов. Однако, эта схема не столь

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДИКАТОРНЫХ МЕТОДОВ
ПРИ ОПЫТНО-ФИЛЬРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЯХ

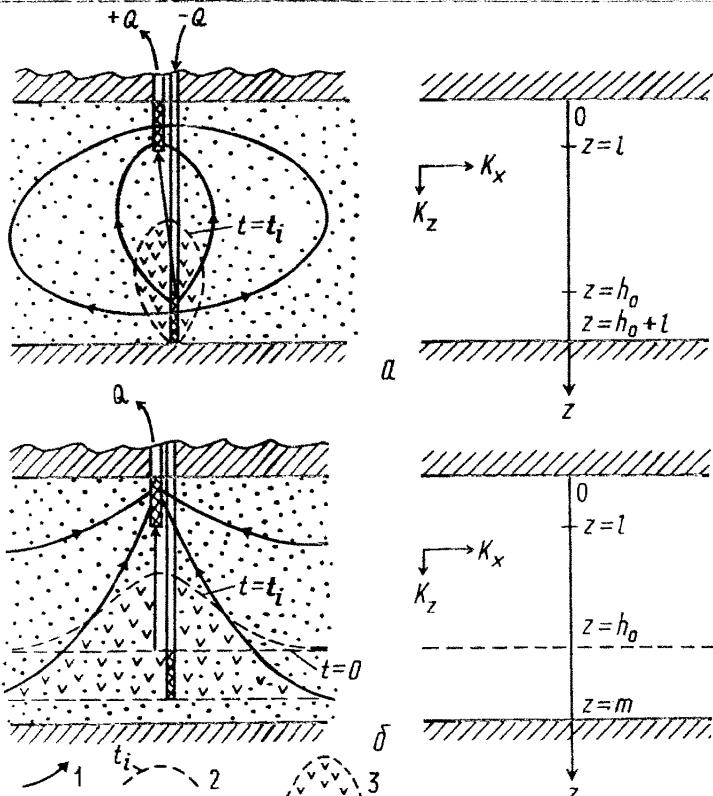


Рис. 20.3. Основные экспериментальные схемы индикаторного опробования профильно-анизотропных водоносных толщ и их расчетные представления (*а* — «вертикальный дуплет»; *б* — «с подошвенным засолением»): 1 — линии тока; 2 — положение фронта засоления на фиксированный момент времени t_i ; 3 — область, занятая индикаторным раствором.

надежна с позиций интерпретации; в частности, эксперимент проводится в существенно нестационарном фильтрационном режиме и, кроме того, приходится оценивать расчетным путем долю воды, поступающей снизу, в общем расходе откачки. Определенные возможности в этом смысле представляют нагнетания (наливы) индикатора повышенной плотности в верхнюю часть пласта с прослеживанием за появлением меченой жидкости по пье-

зометрам, оборудованным на нижележащие интервалы. В этом случае фильтрационный процесс близок к стационарному, а вертикальное перемещение индикатора интенсифицируется в результате плотностной конвекции.

Наконец, наиболее простыми, но, к сожалению, и наименее представительными являются запуски индикатора по ходу проведения откачек в несовершенные пьезометры, расположенные вблизи центральной скважины и оборудованные на интервалы, не совпадающие с интервалом откачки; результатам интерпретации таких запусков стоит приписывать в лучшем случае качественный характер.

Для интерпретации индикаторных экспериментов достаточно ограничиться простейшими оценками по скорости v_z и времени t_o перемещения индикаторного фронта вдоль главной (кратчайшей) линии тока, связывающей нагнетательную скважину с откачивающей (в дуплетной схеме опробования) или контур первоначального засоления с откачивающей скважиной (в схеме с подошвенным засолением).

Для нахождения показателя t_o используется кинематическое условие

$$n \frac{\partial z}{\partial t} = v_z = - k_z \frac{\partial S(z)}{\partial z}, \quad (20.12)$$

где z — вертикальная координата, совпадающая с главной линией тока; $S(z)$ — понижение напора. Аналитический вид функции $S(z)$ зависит от граничных условий, отвечающих той или иной схеме опробования.

Интегрирование уравнения (20.12) дает [7]:

$$t_o = \frac{\pi k_x n h_o^3}{Q k_z} R, \quad (20.13)$$

где h_o — расстояние между центрами фильтров скважин (для дуплетной схемы) или от кровли пласта до верхней границы засоленного слоя (для схемы с подошвенным засолением).

засолением). Графики функций R приведены на рис. 20.4, где $\bar{m} = m/h_o$, $\bar{l} = l/h$ (m — мощность пласта, l — длина фильтра скважины). Приближенные аналитические представления функций $R(\bar{l})$ и $R(\bar{l}, \bar{m})$ даются в работах [5, 7].

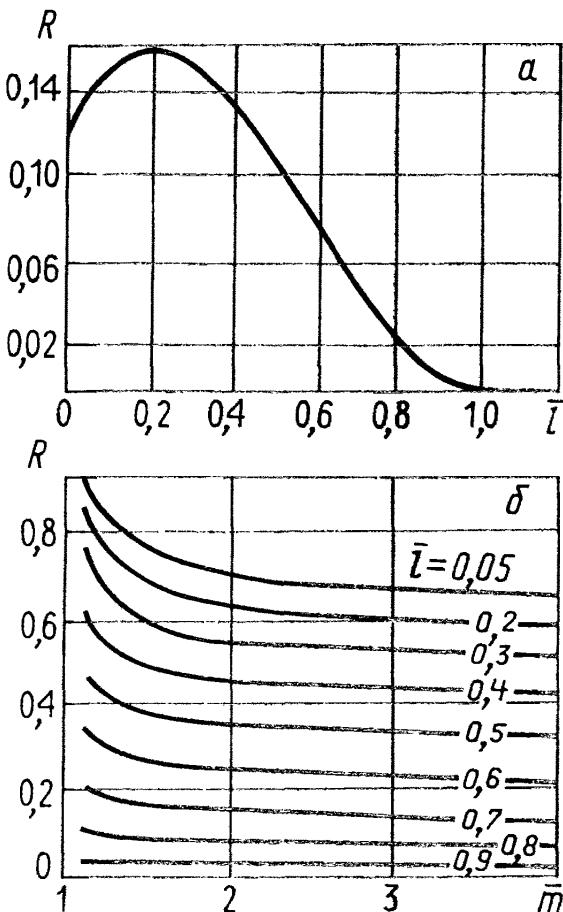


Рис. 20.4. Графики безразмерной функции R : а — для экспериментальной схемы «вертикальный дуплет», б — для схемы «с подошвенным засолением»

Зависимость (20.13) позволяет по времени t_o определить коэффициент действительной скорости вертикальной фильтрации k_z/n . При дуплетной схеме опробования одновременно может проводиться контрольная оценка значений k_z по соответствующим зависимостям стационарной фильтрации, легко получаемым из известных решений для несовершенных скважин. В то же время запуски в наблюдательные скважины по напластованию (см. разд. 20.1.2)* позволяют оценить горизонтальный компонент коэффициента действительной скорости фильтрации $\chi_x = K_x/n$. Таким образом, коэффициент профильной анизотропии пласта составляет $\kappa = k_z/K_x = \chi_z/\chi_x$ (в предположении о примерном равенстве значений n при движении индикатора в направлениях Ox и Oz).

Результаты опытов могутискажаться частичным сносом индикатора естественным фильтрационным потоком. Однако этими погрешностями в оценках параметров можно пренебречь, если выполняется критериальное условие $Q/\pi v_e h_o^2 > 2+3$.

Приведем пример опробования водоносных известняков (мощностью 65 м), подстилаемых слабопроницаемыми терригennыми отложениями. Схема опытного куста показана на рис. 20.5а. Нагнетание индикатора осуществлялось в скв. 53, откачка — из скв. 63. Помимо замеров концентраций индикатора в откачиваемой воде, контрольные замеры производились в скв. 62, фильтр которой располагался в средней плоскости пласта. Выходные кривые представлены на рис. 20.5б. Дебит откачки — закачки Q составлял $25,9 \text{ м}^3/\text{ч}$, коэффициент фильтрации k_x и пористость n , рассчитанные по результатам фильтрационного опробования и трассерных запусков по напластованию, составляют, соответственно, $14,5 \text{ м}/\text{сут}$ и $0,002$.

* Возможен и вариант совмещения обоих запусков — по вертикали и горизонтали.

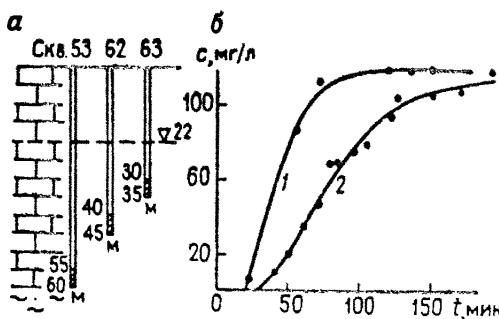


Рис. 20.5. Расположение опытных скважин (а) и выходные кривые (б) опробования по схеме «вертикальный дуплет»: 1 — данные по скв. 62; 2 — по скв. 63.

Полагая $h_o = 25$ м и $l = 5$ м, по графику (см. рис. 20.4а) находим $R = 0,16$. В соответствии с индикаторными кривыми на рис. 20.5б имеем $t_o = 50$ мин. Из формулы (20.13) рассчитываем параметры $\chi_z \approx 5,3 \cdot 10^3$ м/сут и $k_z \approx 10,5$ м/сут ($\kappa \approx 0,72$).

Для обработки выходной кривой (дуплетный эксперимент) с использованием всей совокупности опытных точек можно рекомендовать приближенное решение, полученное для скважин с очень короткими фильтрами, примыкающими к кровле и подошве пласта [4]:

$$\bar{c} = 1 - \left(\frac{t_o}{t} \right)^{3/2}, \quad (20.14)$$

где $t_o = 0,4 m^3 n / \kappa^2 Q$. Для схемы с подошвенным засолением рекомендуется другое приближенное решение — формула (10.48).

В заключение следует отметить, что некоторые из элементов рассмотренных здесь моделей могут успешно применяться и при анализе данных гидрохимических наблюдений, проведенных при длительном водопонижении

в условиях неоднородных гидрохимических разрезов, когда отмечается подтягивание к водозаборам глубинных минерализованных растворов (см. разд. 21.3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 20

1. Бабушкин В.Д., Плотников И.И., Чуйко В.М. Методы изучения фильтрационных свойств неоднородных пород. М., Недра, 1974, 208.
2. Бочевер Ф.М., Лапшин Н.М., Орадовская А.Е. Защита подземных вод от загрязнения. М., Недра, 1979, 254 с.
3. Веригин Н.Н., Васильев С.В., Саркисян С.В., Шержуков Б.С. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород. М., Недра, 1977, 271 с.
4. Коносавский П.К., Мироненко В.А., Румынин В.Г. Разработка и апробация моделей индикаторного опробования комплексов трещиноватых пород. — Геоэкология, 1993, N3, с. 104-124.
5. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Опытно-миграционные работы в водоносных пластах, М., Недра, 1986, 280 с.
6. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М., Недра, 1978, 326 с.
7. Румынин В.Г., Атрощенко Ф.Г. Экспериментальные и расчетные модели для оценки параметра скорости вертикальной миграции растворов в профильно-анизотропных пластах. — В кн.: Методы и практика математического моделирования. Белгород, ВИОГЕМ, 1982, с. 48-53.
8. Leap D.I., Kaplan P.G. A single-well tracing method for estimating regional advective velocity in a confined aquifer: Theory and preliminary laboratory verification. Water Resources Res. 1988, v.24, N7, p.p. 1111-1117.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДИКАТОРНЫХ МЕТОДОВ
ПРИ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЯХ**

9. Novakowski K.S., Flavelle P.A., Raven K.G., Cooper E.L. Determination of groundwater flow pathways in fractured plutonic rock using a radioactive tracer. *Int. J. Appl. Rad. Isot.*, vol. 36, N 5, 1985, pp. 399-404.
10. Smith L., Mase Ch.W., Schwartz F.W. Estimation of fracture aperture using hydraulic and tracer tests. *28th US Symposium on Rock Mechanics*, 1987, Tucson, p.p. 453-463.

ГЛАВА 21

Опытное изучение условий и параметров фильтрации индикаторными методами при проведении режимных наблюдений

Опираясь на ранее предложенную (разд. 17.2) типизацию условий проведения наблюдений, мы рассмотрим возможности опытного изучения механизмов и параметров фильтрации с использованием, прежде всего, ландшафтных (природных) индикаторов для следующих типовых ситуаций:

- 1) наблюдения за региональными геофильтрационными потоками и взаимосвязью подземных и атмосферных вод;
- 2) наблюдения вблизи сосредоточенных поверхностных источников — водотоков и водоемов;*
- 3) наблюдения за подтягиванием некондиционных вод из подземных бассейнов.

В первом случае наиболее эффективными метками являются так называемые глобальные техногенные индикаторы, во втором варианте фильтрующиеся воды, если они не имеют хорошо выраженных гидрохимических отличий, дополнительно маркируются, а в качестве природного индикатора используются температурные отклонения. В третьем случае оценки базируются на повышенной минерализации некондиционных вод.

* Поверхностные рассредоточенные (площадные) источники инфильтрационного типа будут рассмотрены в связи с наблюдениями в зоне аэрации.

21.1. Использование глобальных техногенных индикаторов для калибровки гидрогеологических моделей

21.1.1. Общие сведения о глобальных индикаторах

При обосновании гидрогеологических (фильтрационных и миграционных) моделей, особенно регионального характера, всегда существует высокая степень неопределенности в выборе параметров и задании граничных условий. Поэтому желательно привлечение любой дополнительной информации, в явном виде характеризующей структуру фильтрационного поля и интенсивность перемещения водных масс в подземной гидросфере. Такую информацию дают наблюдения за трассерами, привносимыми в водоносные пласты инфильтрационными водами. В зависимости от постановки задачи*, количественная интерпретация данных наблюдений позволяет:

- оценить величину площадного инфильтрационного питания подземных вод, а в некоторых случаях, — и интенсивность их разгрузки;
- детализировать структуру фильтрационных потоков (т.е. выявить направление движения подземных вод и характер распределения расходов потоков между различными зонами разреза, а также определить профильную или плановую картину течения);
- оценить составляющие скорости миграции/фильтрации подземных вод;

* Здесь не рассматриваются задачи, связанные с идентификацией источников загрязнения.

—рассчитать те или иные гидрогеологические параметры.

Все эти оценки прямо или косвенно связаны с определением различными методами возраста подземных вод, т.е. времени, прошедшего с момента поступления (инфилтрации) атмосферной влаги в почвенные отложения. При этом, однако, понятие «возраст подземной воды» является в известном смысле условным, так как в разных частях одного и того же горизонта могут присутствовать водные массы, времена нахождения которых в нем с момента инфильтрации будут существенно различаться. Поэтому более корректно говорить о возрасте воды в отдельной пробе, отобранный в той или иной точке пласта, и то с оговоркой, что процессы дисперсии не привели к смешению исходных вод существенно различного возраста. Дополнительную неопределенность в обсуждаемом понятие вносят процессы, обусловленные двойной пористостью фильтрующей среды; так в одном и том же макрообъеме возраст воды в трещинах и порах может существенно различаться.

В основном, речь здесь пойдет о так называемых глобальных трассерах, загрязнение атмосферы которыми произошло в последнее десятилетия вследствие человеческой деятельности. К глобальным трассерам относятся, прежде всего, тритий (^{3}H) и дочерний продукт его распада гелий-три (^{3}He), появление которых обусловлено испытанием ядерного оружия (1952–1967 годы) в атмосфере. Тесно связаны с ядерными испытаниями, а также с урановой промышленностью и атомной энергетикой такие изотопы, как углерод-14 (^{14}C), криптон-85 (^{85}Kr), хлор-36 (^{36}Cl). С развитием химической промышленности связаны первые появления в 1930–40-х годах в атмосфере хлорфторуглеродных соединений — CCl_3F (сокращенно, CFC-11) и CCl_2F_2 (CFC-12), для которых вообще нет природных источников.

Если говорить об атмосферных осадках как об исходном носителе упомянутых изотопов и CFC в подземных водах, то необходимо отметить, что: 1) концентрация каждого из индикаторов в инфильтрационных водах является довольно сложной временной функцией, 2) для каждого географического пункта, при сохранении общего тренда в глобальных распределениях, вид данной концентрационной функции индивидуален и может заметно варьировать, так что без детальной информации о составе атмосферных вод в многолетнем разрезе времени результаты соответствующих оценок могут оказаться заметно смещенными (исключение составляют оценки, основанные на комбинированном $^3\text{H}/^3\text{He}$ методе, не нуждающемся в столь детальной информации — разд. 21.1.4); 3) за исключением датирования, основанного на ^3H -данных, все расчеты требуют дополнительных геохимических построений (корректировок), так как равновесные концентрации изотопов в атмосферных и поровых водах могут быть различными (за счет изменения химического состава, температуры и давления).

Наибольшее распространение в гидрогеологии получили оценки возраста воды по тритиевым данным. Характер изменения концентрации трития в атмосферных водах иллюстрируется рис. 21.1, откуда видно, что на 1963–1964 годы приходится пик привноса трития. Именно этот пик долгое время служил «маркером» для прослеживания миграции подземных вод. Однако, из-за относительно небольшого периода полураспада ($T_{1/2} = 12,43$ года) и постепенного уменьшения глобальных содержаний, начиная с середины 60-х годов (рис. 21.1), чувствительность метода в целом падает. Погрешности метода обусловлены также неопределенностью в характере входного концентрационного сигнала для географических областей, где не проводились детальные замеры атмосферного трития.

В отличие от ^3H , концентрации изотопа ^{85}Kr и хлорфторуглеводородов монотонно возрастают (см. частный пример на рис. 21.2 и 21.3), причем отношение CFC-11/CFC-12 остается, начиная с 1975 г., примерно, постоянным [5]. Основное преимущество ^{85}Kr ($T_{1/2} = 10,76$

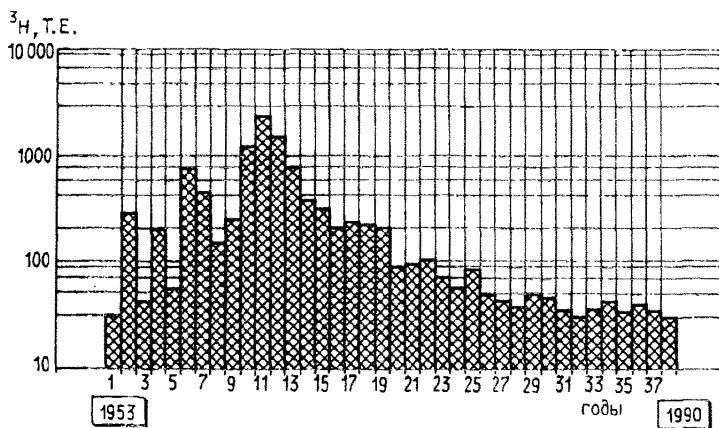


Рис. 21.1. Закономерности изменения среднегодовых концентраций трития в атмосферных водах (Оttава, Канада).

года) в том, что это инертный газ, концентрации которого в природных водах незначительны [10, 5]. Напротив, хлорфтогравеловодороды подвержены микробиологической деструкции (по разным оценкам $T_{1/2}$ колеблется от $74 - 17$ до $111 + 22$ лет, соответственно, для CFC-14 и CFC-12 [5]), интенсивность которой зависит от многих природных факторов; отмечено сорбционное взаимодействие CFC с породой [7]. Равновесная концентрация CFC вблизи поверхности подземных вод может быть рассчитана при данной температуре по известным значениям их концентраций в атмосферных осадках.

Радиоактивный углерод ($T_{1/2} = 5568$ лет) наиболее чувствителен к карбонатным равновесиям и некоторым обменным процессам в системе «вода-порода», поэтому соответствующее датирование должно сопровождаться специальными термодинамическими расчетами.

Наконец, благодаря последним достижениям в области повышения чувствительности аналитических методов, оказалось возможным проследивание миграции подземных вод с помощью долгоживущего изотопа ^{36}Cl ($T_{1/2}$ около 301000 лет). Его глобальный пик,

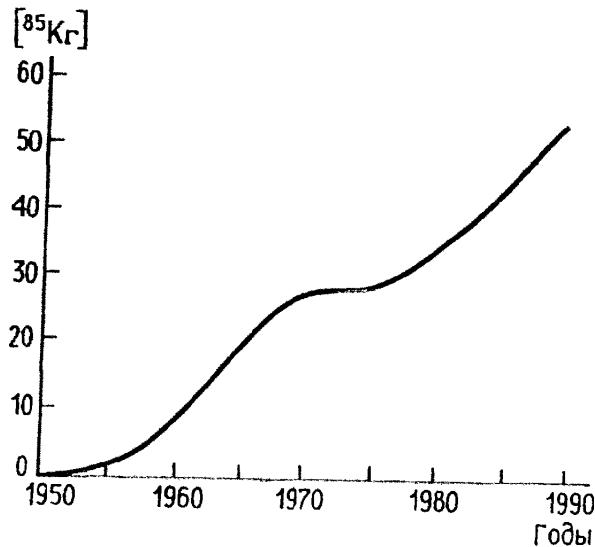


Рис. 21.2. Временные закономерности изменения удельной активности криптона-85 в атмосфере (Северное полушарие $[^{85}\text{Kr}]$, распад/(мин \cdot см 3)) (данные из работы W.M. Smetive с соавторами).

превышающий почти в 1000 раз фоновые содержания, также связан с испытаниями ядерного оружия и приходится на конец 1950-х — начало 1960-х годов [4].

21.1.2. О расчетных моделях

Некоторые приближенные, полукачественные оценки, касающиеся изучения взаимосвязи поверхностных и подземных вод, а также возраста последних, могут

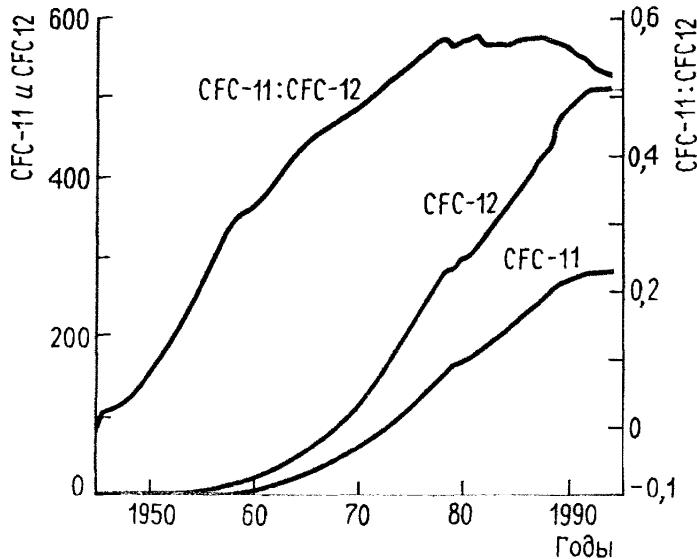


Рис. 21.3. Кривые, характеризующие изменение концентраций соединений CFC в атмосфере (в частях на триллион) и отношения CFC-11:CFC-12 в многолетнем разрезе времени (данные из работы B. Ekwurzel с соавторами).

быть выполнены на основе единичных замеров концентраций глобальных индикаторов в водозаборных устройствах. Если при этом предположить, что отобранные пробы характеризуют средние по разрезу концентрации, то для расчета может использоваться балансовая формула (10.22), записанная для случая меняющихся во времени концентраций в атмосферных водах.

На рис. 21.4, в качестве примера приведены кривые «отклика» для базовой концентрационной функции, представленной на рис. 21.1. Ха-324

рактер кривых $c+t$ зависит от комплекса $\varepsilon^* = \varepsilon / (mn)$, т.е. при известных значениях емкости пласта (mn), базируясь на типовых кривых (рис. 21.4), можно определить величину инфильтрационного питания подземных вод.

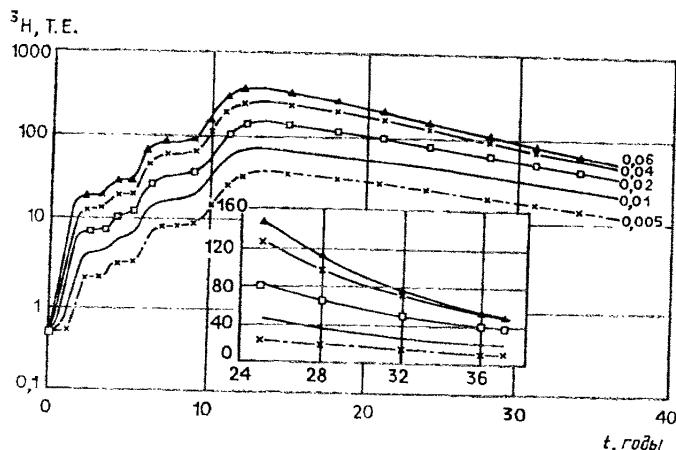


Рис. 21.4. Кривые «отклика» для функции ${}^3\text{H}(t)$ на рис. 21.1. Шифр кривых — комплекс ε^* , град^{-1}

Вместе с тем, в ряде случаев такая интерпретация для трития неоднозначна в силу наличия двух (восходящей и нисходящей) ветвей входной концентрационной функции: одному и тому же замеренному значению концентрации трития могут соответствовать существенно различные по возрасту подземные воды.

Достоверность и полнота исследований с использованием глобальных трассеров резко возрастают при наличии информации о профильном их распределении в водоносной толще. В настоящее время такого рода данные

начинают рассматриваться в качестве важнейшего элемента калибрации численных гидродинамических и миграционных моделей [7]. Главная идея такой калибрации заключается в модельной корректировке значений инфильтрации, профильной анизотропии пластов и пористости (трещиноватости) с таким расчетом, чтобы на модели воспроизводилось профильное распределение глобального трассера, близкое к наблюдаемому для того или иного фрагмента потока. Авторами многочисленных публикаций отмечается, что такая калибрация много чувствительнее к изменчивости упомянутых параметров, нежели традиционный подбор функции напора.

В целом, возможны различные подходы к модельной интерпретации данных замеров глобальных индикаторов в подземных водах. Так, в работе [7] излагается методика построения профильных моделей на базе компьютерных программ MODFLOW-MODPATH. Критерием согласованности модельных решений и полевых концентрационных замеров служит совпадение времени миграции инертных частиц вдоль фиксированных траекторий, попадающих в интервал опробования, с возрастом воды, установленным для этого интервала на основе изотопного метода. В другой работе [11] предлагается прямое решение миграционных задач, что позволяет оценить роль дисперсионных эффектов, приводящих к внутрипластовому смешению разновозрастных вод. К сожалению, подобных работ пока немного и на их основе трудно сделать выводы обобщающего характера.

Если же говорить о результатах решения обратных задач, то можно отметить некоторую тенденцию к занижению расчетных значений поперечной дисперсивности — по сравнению с цифрами, которые можно было бы ожидать, исходя из представлений о реальной гетерогенности фильтрующих сред. Правда, с другой стороны, эта тенденция не противоречит выводам теоретического ана-

лиза о затухании текущей расчетной величины δ_{T_z} по мере развития миграционного процесса (разд. 3.3.2).

В ряде случаев вполне удовлетворительные результаты приносит интерпретация наблюдений в рамках аналитических построений. Рассмотрим их особенности на примере анализа тритиевых распределений.

В верхней части пласта, вблизи уровня подземных вод, вертикальная составляющая скорости фильтрации v_z примерно отвечает величине удельной инфильтрации ε . Такое соответствие тем строже, чем ближе рассматриваемый участок находится к водораздельной области. Тогда положение пика максимальной концентрации трития

на графике $c+z$ определяется значением $z_{max} \approx \frac{V_z t}{n} \approx \frac{\varepsilon t}{n}$, откуда легко находится (при известной пористости n) величина ε .

На самом деле, площадная инфильтрация на поверхность грунтового горизонта обуславливает формирование в нем поля скоростей фильтрации, характеризующегося двумя главными компонентами — горизонтальной (v_x) и вертикальной (v_z) — см. разд. 10.2.3. Поэтому строгое характеристическое уравнение, описывающее проникновение инфильтрационных вод вглубь водоносного пласта, имеет вид:

$$\bar{z} = 1 - e^{-\varepsilon^* t} (\bar{z} = z/m, \varepsilon^* = \varepsilon/mn). \quad (21.1)$$

Далее будем считать, что концентрация трития в атмосферных водах является ступенчатой функцией $c_\varepsilon(t^i) = c_\varepsilon^i$, где i — номер временного интервала ($i=0$ отвечает начальному моменту времени $t=0$). За промежуток времени $\Delta t = t^N - t^i$ (t^N — расчетный момент времени) происходит распад трития, так что его концентрация на глубине $\bar{z} = \bar{z}_i = 1 + e^{\varepsilon^* t^i}$ будет

$$c = c_o + (c^i - c^o) e^{-\lambda(t^N - t^i)} \quad (21.2)$$

Последняя формула позволяет рассчитать распределение трития по мощности пласта $c = c(z)$ при фиксированных t^N и ε^* . Соответствующие графики для базовой входной концентрационной функции

(рис. 21.1) при различных значениях комплексного параметра ε^* приведены на рис. 21.5. В целом, их анализ показывает, что распределения $c(z)$ весьма чувствительны к величине инфильтрационного питания. Легко видеть, что низкие значения ε^* ($\varepsilon^* < 0,01 \text{ год}^{-1}$) обусловливают локализацию тритиевой волны вблизи уровня подземных вод, а более высокие значения этого параметра ($\varepsilon^* > 0,05$) способствуют концентрированию основной массы тритиевой воды вблизи подошвы пласта.

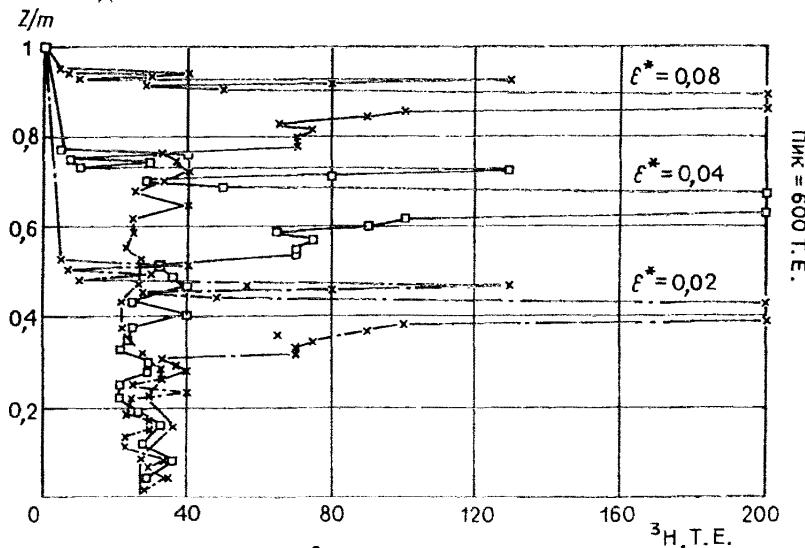


Рис. 21.5. График функции ${}^3\text{H}(z)$ для входного концентрационного сигнала на рис. 21.1. (поршневое вытеснение)

В то же время, данная модель дает нереально высокие пиковые значения концентраций трития в подземных водах (до 400 Т.Е.), которые практически нигде в природных условиях не отмечались. Для объяснения этого противоречия разумно обратиться к моделям, учитывающим дополнительные механизмы дисперсионного перемещивания вещества.

Простейшей здесь является модель одномерного конвективно-дисперсионного переноса с распадом (6.50), которая может быть адаптирована для рассматриваемых условий вертикальной миграции индикаторной волны вглубь пласта с затухающей скоростью v_z :

$$c \approx c^0 + \frac{1}{2}(c_\varepsilon - c^0) [\exp(\eta^-) erfc(\xi^-) + \exp(\eta^+) erfc(\xi^+)], \quad (21.3)$$

где $\eta^\pm = \frac{t_o(1 \pm \sqrt{1 + a\lambda})}{a/2}$, $\xi^\pm = \frac{t_o/\sqrt{1 + a\lambda} \pm t}{\sqrt{a\lambda/(1 + a\lambda)}}$, $a = \frac{4t_o}{z Pe_z}$ (21.3a)

$t_o = \frac{1}{\varepsilon} \ln(1 - \bar{Z})^{-1}$ — временная координата фронта поршневого вытеснения, $Pe_z = m/\delta_{T_z}$, $\bar{Z} = z/m$.

Используя принцип линейной суперпозиции, можно получить решение, учитывающее колебания граничной концентрации, аппроксимированной ступенчатой функцией:

$$c \approx c^0 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^i (c_j^i - c^{i-1}) [\exp(\eta^-) erfc(\xi_j^-) + \exp(\eta^+) erfc(\xi_j^+)], \quad (21.4)$$

$$\xi_j^\pm = \frac{t_o/\sqrt{1 + a\lambda} \pm (t^i - t^j)}{\sqrt{a(t^i - t^j)/(1 + a\lambda)}}, \quad (21.4a)$$

t^i — расчетный момент времени.

Таким образом, распределение концентрации по глубине контролируется двумя параметрами — ε^* и Pe_z (или δ_{T_z}), что иллюстрируется графиками на рис. 21.6. Как видно, поперечная дисперсия оказывает сильное сглаживающее влияние: она способствует более равномерному распределению трития в пределах обводненной мощности пласта.

В реальных условиях распределение концентраций по глубине определяется флюктуациями локальных скоростей фильтрации, за счет которых происходит обмен веществом между различными элементами фильтрацион-

ной неоднородности. Поэтому, пытаясь интерпретировать данные наблюдений в рамках описанной одномерной

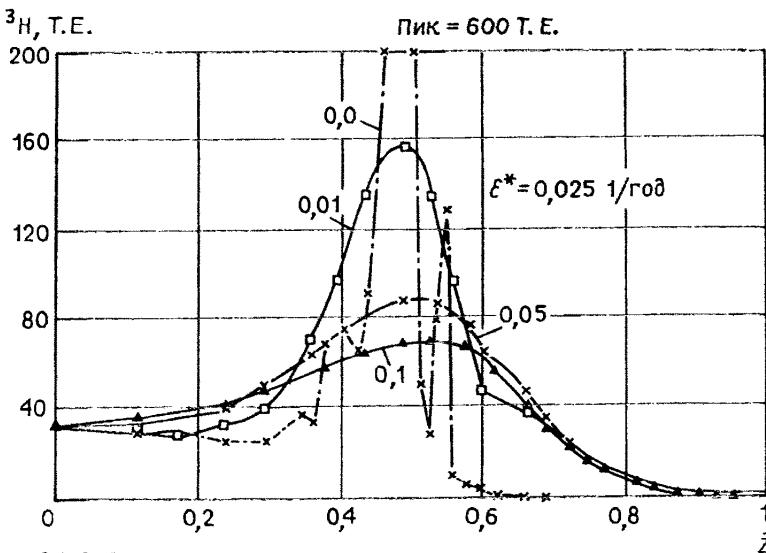


Рис. 21.6. Влияние гидродисперсии на «размытие» концентрационного пика. Шифр кривых — безразмерный параметр δ_{T_z}/t

модели, мы вынуждены, строго говоря, ассоциировать с расчетной величиной δ_{T_z} процессы макродисперсии регионального уровня. Напомним, что инфильтрация осуществляется на значительных площадях, и поэтому фиксируемый даже на небольшой глубине (z) объем раствора, на самом деле, проходит достаточно большой (горизонтальный) путь ($x/t \sim e^{\varepsilon^* t}$), участвуя в процессе смешения весьма продолжительное время.

Наконец, расчетные модели должны специально адаптироваться к ситуациям, когда возможно проявление двойной пористости в комплексах трепиноватых пород: это требование с очевидностью вытекает из основных

физических представлений (разд. 3.2). Многочисленными примерами полевых исследований доказано, что даже во многих кристаллических породах присущая им ограниченная пористость матрицы может усваивать большую долю прослеживаемого индикатора; недоучет этого фактора — главная причина неудачных датировок возраста подземных вод.

С другой стороны, возможны ситуации, когда основная масса индикатора усваивается пористой матрицей, и тогда по значениям действительной скорости его миграции достаточно надежно оценивается коэффициент фильтрации трещиновато-пористых пород.

21.1.3. Пример интерпретации данных тритиевого опробования подземных вод

Основной объем информации о распределении трития в подземных водах горизонта Саинт-Плейт (США, штат Миннесота) получен в результате опробования скважин, отстоящих друг от друга на значительных расстояниях (исключение составляет участок «Elk River-Sherbourgne Co», о котором речь пойдет ниже [6]). Эти скважины вскрывают водоносный горизонт на различных глубинах, однако значительный площадной разброс точек опробования не позволяет провести однозначную вертикальную дифференциацию (расчленение) разреза по содержанию трития.

Предварительная типизация условий фильтрации и инфильтрационного питания подземных вод позволила выделить несколько характерных участков. С некоторой долей условности можно считать, что данные опробования позволяют получить представления о средних содержаниях трития на выделенных площадях (табл. 21.1). Тогда с помощью графика на рис. 21.4 возможна приближенная оценка величины инфильтрации в рамках плановой модели — см. табл. 21.1.

Таблица 21.1

| Участок | N разреза (профиля) | Средняя обводненная мощность, м | Средняя концентрация трития, Т.Е. | ε^* , 1/год | ε м/год |
|--------------------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------|
| Ramsey | A-A' | 50 | 20 | 0,009 | 0,14 |
| Chisago | B-B' | 60 | 10 | 0,005 | 0,09 |
| Isanti, Sherburne, Anoka | C-C' | 40 | 45 | 0,025 | 0,30 |

Примечание: расчетная пористость $n = 0,2$.

Более интересной представляется интерпретация тритиевых данных, полученных на относительно локальном участке «Elk-River», Sherbourne Country. Здесь отбор проб на разных глубинах позволил провести вертикальную стратификацию тритий-содержащих вод — см. рис. 21.7.

Как видно, пиковые значения концентраций (до 70-90 Т.Е.) фиксируются на глубинах 25-30 м. Ниже и выше этого интервала происходит довольно резкое падение концентраций, так что вблизи зеркала вод соответствующие значения оцениваются величиной около 30 Т.Е., а вблизи подошвы пласта — менее 5 Т.Е.

В рамках описанной дисперсионной модели (21.4) удалось подобрать теоретическую кривую, которая достаточно надежно описывает зафиксированное распределение трития. Параметры кривой: $\varepsilon^* = 0,025$ 1/год, $\delta_{T_z} = 2,5$ м. При $m = 58$ м, $n = 0,2$ получаем величину

инфилтрации $\varepsilon = \varepsilon^* \cdot mn = 0,29$ м/год. Значение δ_{T_z} имеет порядок, характерный для поперечной дисперсии в неоднородных средах, что свидетельствует о региональном масштабе профильной макродисперсии.

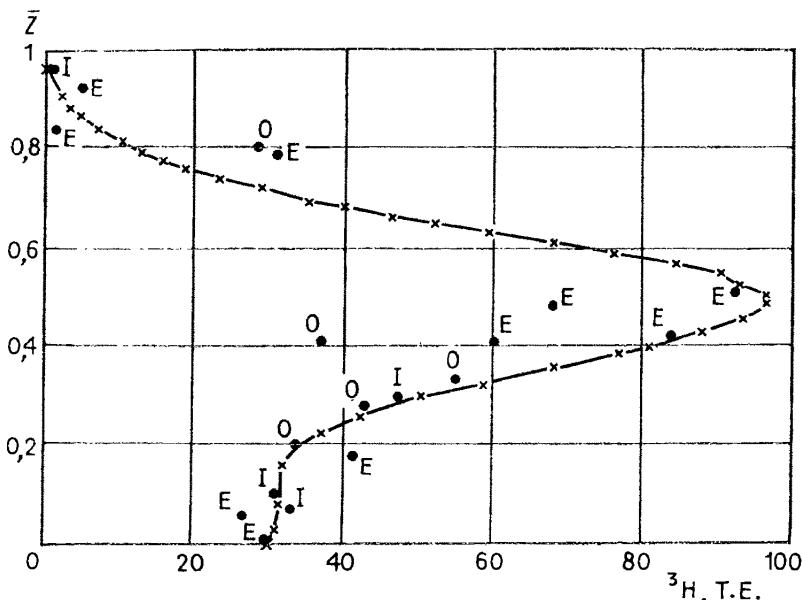


Рис. 21.7. Аппроксимация данных натурных замеров теоретической кривой $\epsilon^* = 0,025 \text{ год}^{-1}$, $Pe_2 = 25$; индексы у точек отвечают пунктам отбора проб: E — «Elk River», I — «Isanti Co», O — другие.

21.1.4. Теоретические основы тритий-гелий (-3) метода датирования возраста подземных вод

Как уже отмечалось, датирование возраста подземных вод и связанные с ним гидрогеологические оценки в значительной степени затруднены для территорий со слабо изученной историей изотопного состава атмосферных осадков. Данный недостаток может быть существенно сглажен на основе использования так называемого тритий-гелий(3) метода, предполагающего интерпретацию одновременных замеров в пробе ${}^3\text{H}$ и его дочернего продукта ${}^3\text{He}$. Если предположить, что распад трития начался с момента поступления инфильтрационной влаги в водо-

носный горизонт, то расчетное значение возраста не зависит от формы входного концентрационного сигнала.

В предположении о несущественной роли дисперсии, расчетная формула имеет вид [5, 11, 12, 8]:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{{}^3\text{He}_{\text{tri}}}{{}^3\text{H}} \right), \quad (21.5)$$

где $\tau = {}^3\text{H}/{}^3\text{He}$ возраст; ${}^3\text{He}_{\text{tri}}$ — тритигенная концентрация изотопа ${}^3\text{He}$ в воде (Т.Е.), ${}^3\text{H}$ — концентрация трития (Т.Е.), $\lambda (= 0,056 \text{ год}^{-1})$ — константа распада ${}^3\text{H}$.

Основная сложность заключается в выделении именно тритиенной компоненты ${}^3\text{He}_{\text{tri}}$ из общего водорстворенного ${}^3\text{He}$, так как последний может накапливаться в воде за счет ее контакта с атмосферным и почвенным воздухом, а также в результате распада некоторых радиоактивных элементов, присутствующих в породе. Однако для большинства неглубоко залегающих горизонтов вклад последнего источника ${}^3\text{He}$ несущественен.

В этом случае для расчета тритиенного ${}^3\text{He}_{\text{tri}}$ может быть рекомендована формула [5]:

$${}^3\text{He}_{\text{tri}} = 4,021 \cdot 10^{14} [{}^4\text{He}_{\text{tot}} (R_{\text{tot}} - R_{\text{atm}}) + + {}^4\text{He}_{\text{aq}} R_{\text{atm}} (1 - \alpha)], \quad (21.5a)$$

где ${}^4\text{He}_{\text{tot}}$ — концентрация гелия-4 в пробе воды ($\text{cm}^3 \text{STR/gH}_2\text{O}$), R_{tot} — замеренное отношение ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ в пробе воды, R_{atm} — атмосферное отношение ${}^3\text{He}/{}^4\text{He} (= 1,384 \cdot 10^{-6})$, ${}^4\text{He}_{\text{aq}}$ — концентрация ${}^4\text{He}$ в воде, равновесная атмосферному его содержанию ($\text{cm}^3 \text{STP/g H}_2\text{O}$), α — коэффициент, характеризующий различия в растворимости двух изотопов гелия ($\approx 0,983$).

Одним из факторов, искажающих действительный возраст воды, является потеря тритиенного ${}^3\text{He}$ за счет его диффузии через поверхность грунтовых вод в атмосферу на участках с низким инфильтрационным питанием. По оценкам, приведенным в работе [5], такие потери могут достигать в отдельных случаях 10–20%, хотя обычно составляют первые проценты.

21.2. Применение индикаторных гидрографических методов для изучения фильтрационных потоков вблизи поверхностных водоемов и водотоков

Выше неоднократно отмечалось, что определение скорости фильтрации, которая может рассматриваться как самостоятельный параметр, является необходимым условием для обоснования расчетных моделей миграции. Поэтому необходимо по возможности стремиться к идентификации поля скоростей фильтрации *in situ*; весьма оперативно такие определения можно выполнить, используя скважинную резистивиметрию и термометрию, которые позволяют одновременно провести более детальное расчленение водоносных комплексов по фильтрационным свойствам. Для изучения распределения скоростей фильтрации через экранирующие отложения бассейнов промышленных стоков может использоваться метод термозондирования донных отложений. Заметим попутно, что гидрографический каротаж позволяет проводить контроль качества и состояния наблюдательных скважин режимной сети и эксплуатационных скважин, т.е. непосредственно оценить представительность информации, получаемой в результате режимных наблюдений.

21.2.1. Определение скорости фильтрации резистивиметрией наблюдательных скважин

Определение скоростей фильтрации по данным резистивиметрии освещено в разд. 15.4.1, поэтому обратим внимание лишь на некоторые аспекты метода при исследованиях регионального характера.

Каждая опробуемая резистивиметрией скважина требует определения коэффициента искажения потока, учитывавшего состояние ее прифильтровой зоны. Для этого могут использоваться результаты экспресс-наливов [2]. В целом, при постановке резистивиметрических наблюде-

ний, особенно в водоносных горизонтах с плохо изученными фильтрационными свойствами, необходимо сводить к минимуму влияние колматации опытных скважин и ставить опыты преимущественно на недавно пробуренных и тщательно разглинизованных скважинах. В противном случае результаты резистивиметрии могут оказаться практически неинтерпретируемыми.

Заметное влияние на результаты резистивиметрии оказывает плотностная дифференциация индикатора в стволе наблюдательной скважины, вызванная гравитационными силами. Происходит это обычно при расположении фильтра ниже уровня воды, в то время как засоление производится по всему стволу скважины. Частично исключить влияние плотностной конвекции можно, засаливая только прифильтровую и расположенную ниже нее части скважины. Однако наиболее эффективным путем устранения вертикальных перемещений индикаторов в скважине является надежная изоляция ее отдельных, небольших по размерам интервалов, которые оборудуются автономными резистивиметрами.

Очень сильное искажающее влияние на результаты резистивиметрии оказывают перетоки воды внутри ствола скважины, вызванные неравномерным распределением напора в водоносном горизонте по вертикали. Чаще всего такие перетоки отмечаются вблизи участков интенсивного питания или разгрузки подземных вод, делая результаты резистивиметрии некондиционными. Избавиться от их влияния удается лишь путем наблюдения за рассолением в небольших изолированных интервалах. Полезно также сочетание резистивиметрии с расходометрией.

С учетом сделанных оговорок, использование резистивиметрии для определения скоростей фильтрации в водоносных комплексах имеет свои, довольно жесткие рамки.

21.2.2. Гидрогеотермические наблюдения

Наблюдения в водоносных пластах вблизи контуров питания. Основной причиной тепловых возмущений в водоносном горизонте вблизи контура его питания является фильтрация со стороны водоема, где происходят сезонные температурные колебания. Основываясь на данных о температурном режиме горизонта, можно рассчитать средние скорости фильтрации v между водоемом и наблюдательными скважинами, по которым проводятся термометрические наблюдения.

Так, если не учитывать потери тепла через кровлю и подошву пласта, то [1]:

$$v \approx \Delta x C_p n / (\Delta t_x C_f) \approx 0,7 \Delta x / \Delta t_x \quad (21.6)$$

— для точек наблюдения, находящихся на достаточно большом удалении Δx от водоема (Δt_x — время перемещения «пиковых» значений температуры на расстояние Δx). Результаты будут вполне надежными, если мощность m исследуемой профильной зоны превышает величину m_{min} в критерии (5.16); реально величина m_{min} находится в пределах 10–20 м.

Более надежная методика интерпретации термометрии скважин базируется на решении профильной задачи переноса теплового возмущения от несовершенного водоема [1]: учитывается прогрев пород под дном бассейна за счет инфильтрации и кондуктивным путем, а также конвективный горизонтальный перенос, осложненный теплообменом с окружающими водоносный пласт породами. При этом предполагается, что температура придонного слоя воды в бассейне (T_p) в течение годового цикла (с периодом T) изменяется по гармоническому закону:

$$T_p = A_o \sin(2\pi t/\tau), \quad (21.7)$$

где A_o — амплитуда сезонных колебаний температуры воды в придонном слое водоема; t — текущее время.

Решение задачи для случая гомогенных пород и квазистационарного режима межслоевого теплообмена получено Г.Н.Гензелем [1] в виде уравнения бегущей волны с затухающей амплитудой. При отсутствии теплообмена с окружающими породами и совершенстве

границы по степени вскрытия, это решение совпадает с известным решением Столмена [13].

Наиболее просто интерпретируются данные по сдвигу фаз температурных колебаний (t_φ), который не зависит от параметров конвективно-кондуктивного теплообмена с окружающими породами и от гидродинамического несовершенства бассейна; непременным условием является надежное определение числа волн (N) в пределах области ($X_2 - X_1$) прослеживания температурных возмущений.

Скорость фильтрации определяется по зависимости

$$v = \frac{C_n^o (X_2 - X_1)}{C_f^o (t_\varphi + N\tau)}, \quad (21.8)$$

где значение C_n^o/C_f^o изменяется в узких пределах и может быть принято равным 0,7.

Качественно по результатам термометрических наблюдений выделяются и наиболее фильтрующие участки в отложениях, экранирующих водоем. Кроме того, весьма полезно сравнение графиков колебаний уровней в водоеме и температуры подземных вод: периоды повышения уровней, вызывающие рост утечек из водоема, обычно сопровождаются заметными изменениями температуры в водоносных горизонтах на прилегающих участках. Поэтому превышение температуры подземных вод над фоновой в летне-осенний период и понижение — в зимне-весенний могут служить косвенным индикатором интенсивности утечек из водоема на отдельных его участках.

Сезонные температурные колебания в потоке подземных вод, доступные для регистрации современной аппаратурой (с параметрической чувствительностью 0,01–0,05 °C), распространяются на значительные расстояния от береговой линии: при скоростях фильтрации порядка десятых долей метров в сутки — на первые сотни метров, т.е. искомая скорость определяется с высокой степенью осреднения. Кроме того, благодаря преимущественно кондуктивному характеру теплопередачи от пласта к

скважине состояние ее фильтра (в ограниченных пределах — и его местоположение) практически не влияет на результаты измерения температуры пласта, что выгодно отличает данный метод, например, от резистивиметрии наблюдательных скважин. Еще одним важным достоинством описываемого метода является его практическая независимость (при относительно больших удалениях наблюдательных скважин) от наличия кольматационного слоя, экранирующего водоем: сравнительно большие скорости кондуктивного теплопереноса быстро снимают его исказжающее влияние.

При фильтрационном расчленении разрезов на основе термометрии скважин необходимо считаться с наличием вертикальной составляющей скорости фильтрации в пласте: по этой причине, представления о положении в нем наиболее фильтрующих профильных зон могут оказаться ненадежными.

На точность результатов гидрогеотермических наблюдений заметное влияние могут оказывать межслоевые перетоки по стволу, а также вертикальные движения воды в скважине, обусловленные тепловой конвекцией. Термо-конвективные токи несколько сглаживают реально существующие в пласте тепловые аномалии и могут послужить причиной занижения скорости фильтрации, а также причиной снижения чувствительности метода. С учетом сказанного, при определении малых скоростей фильтрации на достаточно больших удалениях от границы питания возникает необходимость использования при замерах высокочувствительных термометров, позволяющих выделять в разрезе температурные аномалии в первые сотые доли градуса. Надежность метода заметно повышается также за счет пакерирования отдельных интервалов скважин и/или снижения диаметров последних до 2,0–2,5"; при этом практически устраняется температурная конвекция в стволе.

*Термозондирование экранирующих отложений на глубину до нескольких метров осуществляется в течение относительно короткого периода времени** и позволяет оценить скорость вертикальной фильтрации через эти отложения. При этом измеряется изменение температуры по глубине (z) в некоторых фиксированных точках — при помощи специального зонда; последний представляет собой стержень с наконечником, оборудованным термодатчиком.

Опыт показывает, что наиболее благоприятным для проведения термозондирования донных отложений является летний период, в течение которого происходит постепенный разогрев придонного слоя воды (от T_o до T_{max}) примерно по экспоненциальной зависимости вида:

$$T|_{z=0} = T_{max} - (T_{max} - T_o) \exp(-\alpha t). \quad (21.9)$$

Решение уравнения теплопереноса для полуограниченной области с граничным условием (21.7) получено Г.Н.Гензелем [1] в форме:

$$\bar{T} = \frac{T - T_o}{T_{max} - T_o} = R_o(\varepsilon, \tau, \sigma). \quad (21.10)$$

где $\varepsilon = C_f^0 V z / \lambda$; $\tau = C_f^{02} v^2 t / (C \lambda)$; $\sigma = \gamma C_n^0 \lambda / (C_f^{02} v^2)$.

Функция $R_o(\varepsilon, \tau, \sigma)$ представлена на рис. 21.8. Графики используются для интерпретации термозондирования методом эталонных кривых; при этом оценивается скорость v исходящей фильтрации в различных точках.

* Возможна и организация стационарных постов, по которым проводятся регулярные замеры.

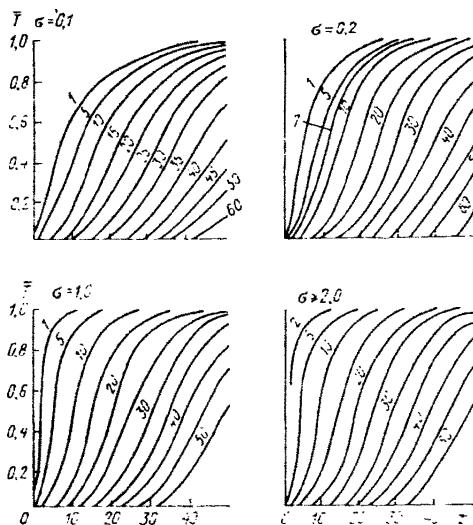


Рис. 21.8. Графики функции $\bar{T} = R_0(\epsilon, \tau, \sigma)$. Шифр кривых — значение безразмерного комплекса ϵ .

Возможно также использование годовых колебаний температуры в водоеме, интерпретация которых ведется по уже упоминавшемуся решению Столмена [13].

Изменения удельной теплоемкости пород оказывают слабое влияние на результаты определения скоростей фильтрации, что позволяет в расчетах использовать ее табличные значения или, еще проще, положить $C_n^o/C_s^o \approx 0,7$. В то же время, искомая величина скорости более чувствительна к изменению коэффициента теплопроводности (λ), что делает предпочтительным прямое его определение эталонным термозондированием на участках, где инфильтрация отсутствует.

Термозондирование особенно эффективно при сравнительно низких интенсивностях искомой инфильтрации

(менее 10^{-2} м/сут), в том числе и лежащих за пределами чувствительности инфильтрометрии.

Таким образом, два рассмотренных гидрографических метода являются взаимодополняющими: термометрия скважин позволяет оценить скорости фильтрации подземных вод за пределами контура водоема, а термозондирование донных отложений — распределение фильтрационных потерь по его чаше.

*Термометрические наблюдения в разделяющих пластах** проводятся с целью оценки значений и направления естественной скорости перетекания. Для этого исследуются закономерности распределения температуры по глубине разделяющего пласта, в котором на кондуктивный тепловой поток, возникающий за счет регионального геотермического градиента, накладывается вертикальная конвекция. Для интерпретации наблюдений используется фундаментальное решение стационарной задачи [3]. Зная скорость фильтрации и перепад напоров между кровлей и подошвой разделяющего пласта, нетрудно получить его коэффициент фильтрации. Чувствительность метода относительно определяемой скорости фильтрации имеет порядок $10^{-4} + 10^{-5}$ м/сут. Недостатком его является сильная зависимость результатов от качества изоляции интервалов, от неоднородности (слоистости) пласта и наличия горизонтальной компоненты скорости фильтрации.

* Такие наблюдения могут проводится, конечно, не только вблизи водоемов; они включены в данный раздел из «технических» соображений.

21.3. Оценка условий и параметров фильтрации по данным гидрохимических наблюдений за подтягиванием минерализованных вод из подземных бассейнов

При выборе расчетных моделей необходимо учитывать следующие обстоятельства: 1) основной объем информации о характере загрязнения приходится на пробы из водозаборных скважин, где соответствующие изменения выражены наиболее рельефно; 2) в то же время, надежность описания процесса определяется глубиной изученности исходной гидрохимической зональности за пределами зоны расположения водозаборных устройств, что предполагает достаточно высокие требования к качеству разведочных работ в целом; 3) в эксплуатационных условиях характер наблюдаемых концентрационных распределений в значительной степени контролируется особенностями фильтрационного строения водоносной толщи: процесс мало чувствителен к дисперсионным, а на достаточно поздних своих стадиях, — и к емкостным (пористость/трещиноватость) свойствам пород. Последнее оправдывает использование ОМН для калибрации фильтрационных моделей, а также для прямой оценки некоторых фильтрационных или комбинированных параметров.

Задача о субвертикальной миграции подземных вод при их сосредоточенном отборе рассмотрена при обосновании прогнозных моделей (разд. 10.3.1), а также схем индикаторного опробования пластов (разд. 20.2). В частности, на основе приведенных соотношений может быть рассчитан показатель действительной скорости вертикального переноса $\chi_z = k_z/n$. Если наблюдения проводятся достаточно длительное время, то исключение из рассмотрения резко нестационарной фазы процесса позволяет интерпретировать кривые изменения минерализации с целью детализации распределения проницаемости пород

по разрезу. При этом, правда, зачастую приходится обращаться к методам математического моделирования.

В водоносных толщах с четко выраженной слоистостью (чередование хорошо- и слабопроницаемых слоев) геохимическая стратификация обычно четко контролируется изменчивостью в разрезе фильтрационных свойств пород. В этом случае ОМН за качеством воды, отбираемой на водозаборах, позволяют оценить комплексные параметры перетекания, для чего с успехом могут использоваться аналитические решения соответствующих задач, приведенные в разд. (10.3).

Обобщение упомянутых здесь теоретических разработок позволяет сделать некоторые практические выводы, представляющие интерес в свете рассматриваемой проблемы интерпретации ОМН.

1. Режим водозаборов при наличии исходной гидрохимической неоднородности характеризуется в целом весьма плавным изменением концентрационных функций (за исключением начальных этапов подтягивания некондиционных вод из эксплуатируемой толщи). Время достижения предельных концентраций ($t_{C_{max}}$) нередко сопоставимо с периодом эксплуатации водозабора или даже пре- восходит его.

2. Растворимость процесса во времени обуславливает опасность неверной трактовки режимных гидрохимических (или геотермических) наблюдений, ибо, с одной стороны, для начальных этапов водопонижения малона- дежными оказываются упрощенные балансовые оценки, базирующиеся на стационарных уравнения смешения, а с другой — достоверность интерпретации длительных этапов водопонижения ограничена очень слабой изменчивостью выходных концентрационных функций.

3. Изменение гидрохимического режима при водоотборе из слоистых гетерогенных систем контролируется показателями гидравлической взаимосвязи пластов и па- раметрами последних. Если некондиционные воды при-

урочены к породам, проницаемость которых в десятки раз уступает проницаемости эксплуатируемых пористых коллекторов, то обычно не следует ожидать существенных изменений в гидрохимическом режиме водозаборов (даже в том случае, когда дебит откачки полностью компенсируется площадным перетеканием). Вероятность такого загрязнения заметно возрастает при водоотборе из комплексов скальных трещиноватых пород.

4. Широко рекомендуемые в литературе расчетные схемы для условий профильного подтягивания минерализованных вод на деле имеют весьма ограниченную область практического применения, поскольку соответствующие решения получены для полуограниченных (в разрезе) пластов, а также не учитывают влияние эффектов плотностной конвекции, обусловленной увеличением минерализации подземных вод с глубиной, фильтрационной анизотропии и неоднородности пород в разрезе. Пренебрежение этими факторами резко смещает расчетные оценки.

5. Для описания нестационарной стадии процесса, наряду с характеристиками плановой фильтрации к водозабору, очень важна оценка параметров действительной скорости вертикального переноса, выраженных, например, через обобщенный коэффициент κ_z/n , который достаточно надежно определяется по данным наблюдений. В последующих фазах качество откачиваемых вод определяется в большей степени условиями формирования плановых фильтрационных потоков — наряду с исходной гидрохимической зональностью. Кроме того, учитывая, что наиболее минерализованные воды приурочены обычно к глубоко залегающим зонам с пониженнной проницаемостью, точность гидрохимической интерпретации зачастую всецело определяется надежностью геофильтрационного опробования этих зон. Поэтому данные, полученные в ходе гидрохимических наблюдений, должны рас-

сматриваться как важнейшая информация для изучения особенностей геофильтрационной картины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 21

1. Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румынин В.Г. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах. Л.: Недра, 1988, 279 с.
2. Опытно-фильтрационные работы. Под ред. В.М.Шестакова и Д.М.Баштакова. М., Недра, 1974. 203 с.
3. Шестаков В.М. Динамика подземных вод. М., Изд. МГУ, 1979. 368 с.
4. Cook R.G., Jolly I.D., Leaney F.W., Walker G.R., Allan G.L., Fifield L.K., Allison G.B. Unsaturated zone tritium and chlorine 36 profiles from southern Australia: Their use as tracers of soil water movement. - Water Resources Res., 1994, v.30, N 6, p.p. 1709 - 1719.
5. Ekwurzel B., Schosser P., Smethie W.M., Plummer L.N., Busenberg E., Mishel R.L., Weppering R.W., Stute M. Dating of shallow groundwater: Comparison of the transient tracers $^{3}\text{H}/^{3}\text{He}$, chlorofluorocarbons, and ^{85}Kr . - Water Resources Res., 1994, v. 30, N 6, p.p. 1693 - 1708.
6. Kanivetsky R., Rumynin V. G. Determination of recharge rates to a glacial aquifer system in Minnesota using environmental tritium. — Hydrological Science and Technology. American Institute of Hydrology, 1993, v. 8, N 1-4, p.p. 63-72.
7. Reilly T.E., Plummer L.N., Phillips P.J., Busenberg E. The Use of simulation and multiple environmental tracer to quantify groundwater flow in shallow aquifer. — Water Resources Res., 1994, v. 30, N 2, p.p. 421-433.

8. Schlosser P., Stute I., Dozz H., Sonntag C., Munnich K.O. Tritium/3He dating of shallow groundwater: Earth and Planetary Science Letters, 89, 1988, p.p. 352-363.
9. Simpkins W.W., Bradbury K.R. Groundwater flow, velocity, and age in a thick, fine — grained till unit in southeastern Wisconsin. — Journal of Hydrology, 1992, v.132, p.p. 283-319.
10. Smethie W.M., Solomon D.K., Schiff S.L., Mathien G.G. Tracing groundwater flow in the Borden aquifer using krypton-85. — Journal of Hydrology, 1992, v.130, p.p. 279 -297.
11. Solomon D.K., Poreda R.J. Schiffs S.L. and Cherry J.A. Tritium and Helium 3 as groundwater age tracer in Borden Aquifer. - Water Resources Research, 28, N3, 1992, p.p. 741-755.
12. Solomon D.K. and Sudicky E.A., Tritium and Helium 3 isotope ratios for direct estimation of special variations in groundwater recharge. - Water Resources Research, 27, N 9, 1991, p.p. 2309-2319.
13. Stallman R.W. Steady one — dimensional flow in a semiinfinite porous medium with sinusoidal surface temperature. J. Geophys. Res., 1960, N 65 (9), p.p. 2883-2885.

ОПЫТНОЕ ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЕНИЙ ЧЕРЕЗ ЗОНУ АЭРАЦИИ

Полный анализ этой проблемы потребовал бы специального монографического исследования. Мы ограничимся, пеимущественно, теми ее аспектами, которые имеют прямое отношение к оценке защитных свойств зоны аэрации как основного буфера между подземными водами и поверхностными источниками их загрязнения. Впрочем, если ориентироваться лишь на достаточно практические подходы (разд. 4.2), то излагаемые ниже методы опробований и наблюдений дают необходимую основу и для ориентировочной оценки переноса загрязнений в самой зоне аэрации. Здесь следует напомнить, что многие теоретические разработки в этой области остаются пока вне практических приложений именно из-за трудностей их информационного обеспечения. Поэтому материал настоящего раздела увязывается с теми упрощенными, сильно схематизированными, представлениями о влаго- и массопереносе в зоне аэрации, которые были приняты нами в главе 4. Они предопределяют, в частности, повышенное внимание к оценке свойств наименее проводящих элементов разреза зоны аэрации, представленных обычно мягкими глинистыми (гомогенными пористыми) образованиями или пористыми блоками твердых (гетерогенных, трещиновато-пористых) пород. А так как и те, и другие достаточно эффективно изучаются лабораторными экспериментами на «ненарушенных» образцах, то такие эксперименты должны учитываться в последующем изложении как вполне дееспособная — в таких случаях — альтернатива полевым методом.

ГЛАВА 22

Опытное опробование пород зоны аэрации

Как неоднократно уже подчеркнуто теоретическим анализом и данными полевых наблюдений, решающую роль при оценке транспорта загрязнений через зону аэрации играют процессы субвертикального влагопереноса в ней. Поэтому и в этой, и в следующей главе повышенное внимание уделяется изучению условий и параметров такого переноса, причем особый упор делается на его простейшую и, вместе с тем, во многих случаях — важнейшую модификацию — субвертикальную фильтрацию*. Последнее определяется, прежде всего, уже отмеченной ролью слабопроводящих элементов разреза в защитном эффекте зоны аэрации, которые в условиях даже весьма умеренного инфильтрационного расхода оказываются близкими к водонасыщенному состоянию. В такое состояние может переходить и вся толща пород зоны аэрации — на участках вновь создаваемых бассейнов промостков, где обычно ведутся достаточно интенсивные полевые опробования в рамках гидрогеологических изысканий. Важно подчеркнуть, что определение проницаемости (коэффициента фильтрации) пород зоны аэрации дает верхнюю оценку их коэффициента влагопереноса, которая создает в инженерных расчетах некоторый (правда, иногда излишне высокий) запас надежности.

С другой стороны, сравнительно надежная опытная полевая оценка функциональной зависимости коэффициента влагопереноса от всасывающего давления (и опосредованно — от влажности пород) сейчас реальна лишь для приповерхностных покровных образований, где могут

* Т.е. влагоперенос в условиях полного водонасыщения пород.

быть использованы тензиометрические установки. Эксперименты такого рода, при их повышенной технической сложности, не вносят принципиальных улучшений в информационное обеспечение изучаемых здесь проблем. Поэтому в данной работе, где влажностный режим почвенного слоя и непосредственно подстилающих его грунтов не представляет первоочередного интереса, методы оценки коэффициента влагопереноса (в широком смысле) подробно не рассматриваются. Следует вообще напомнить, что осреднение данных мелкомасштабных экспериментов подобной направленности не дает правильно-го представления и миграции влаги в зоне аэрации. Как показано в разд. 4.1.3, в таких опытах возникает сильно нелинейная система, для которой не существует однозначного тензора проницаемости: его эффективные параметры и даже главные направления зависят от статистических показателей, их флуктуаций и, что особенно важно, средних характеристик; в частности, речь идет о гистерезисе, определяемом изменчивостью свойств среды по ходу эксперимента (в зависимости от насыщенности), а не локальными гистерезисными явлениями на уровне почвового пространства.

22.1. Опытная оценка вертикальной проницаемости покровных отложений и искусственных глинистых экранов*

Основным видом полевых опробований в данном случае являются опытные наливы в шурфы, которые сочетаются с лабораторными оценками проницаемости. Последние выполняются по достаточно отработанным методи-

* Раздел написан совместно с В.К. Усачевым.

кам, которые здесь не рассматриваются, — за исключением некоторых специфических экспериментов. Подчеркнем обязательность сохранности исходной структуры грунтов в отбираемых образцах, которая удовлетворяется обычно тем лучше, чем ниже проницаемость (чем выше содержание глинистой фракции) изучаемых грунтов. Как будет ясно из дальнейшего, в этом же направлении возрастает и относительная эффективность лабораторных экспериментов в сравнении с полевыми. С другой стороны, размер образца весьма существенно влияет на определение проницаемости: вариация скорости влагопереноса внутри образца убывает с ростом его длины; аналогично ведут себя вариации между отдельными образцами, которые находят отражение в осредненной величине расчетного коэффициента дисперсии, убывающей по мере роста глубины проникновения раствора [12].

22.1.1. Об эффективности опытных наливов в шурфы

Опытные наливы в шурфы являются наиболее массовым видом определения вертикальной проницаемости покровных отложений, в частности природных и искусственных глинистых экранов на участках проектируемых гидротехнических сооружений. Ранее уже неоднократно отмечалось (см. например, [5]), что традиционные модификации наливов в шурфы могут дать сравнительно объективную информацию лишь применительно к песчаным и однородным супесчаным отложениям. Распространение же стандартных методик наливов на слабопроницаемые суглинистые и глинистые отложения (с коэффициентом фильтрации менее 0,1 м/сут) недопустимо и может повлечь ошибки в определении параметров проницаемости, достигающие одного — двух порядков и более. Возникающие при этом погрешности экспериментов вызваны [5] трудностью учета бокового растекания, капиллярных и

диффузионных эффектов, а также гетерогенностью (двойной пористостью), слоистой или неупорядоченно неоднородной фильтрационной структурой опробуемого массива, в котором, к тому же, возникает сильная анизотропия влагопроводимости (разд. 4.1.3); в ряде случаев существенную роль могут играть и другие факторы — несоответствие напряженного состояния пород в опытных и прогнозных условиях, трудности отфильтрования воздуха из опробуемой породы, химический состав наливающейся воды и др.

Снизить роль отмеченных погрешностей можно, пойдя по пути разумного увеличения масштаба и продолжительности, усложнения методики проведения полевого эксперимента. Так, увеличение площади опробования до нескольких десятков квадратных метров заметно снижает суммарное влияние эффектов бокового растекания и одновременно способствует площадному осреднению фильтрационных свойств опробуемых неоднородных отложений. Длительность крупномасштабных экспериментов, которая должна составлять по крайней мере несколько суток, позволяет, наряду с увеличением представительности (глубины) опробования, избежать заметного проявления гетерогенности — влияния макропор или трещин, например, путем длительного предварительного замачивания опробуемых грунтов.

Второй путь — использование прямых способов прослеживания перемещения в массиве меченой жидкости при условиях фильтрации в зоне индикации, близких к стационарным (точнее, квазистационарным). В тех случаях, когда индикатором служит краситель (например, эозин), глубину проникновения индикатора приходится определять с нарушением сплошности опробуемого массива, т.е. единовременно, после прекращения эксперимента. При использовании разбавленных растворов электролитов можно ориентироваться на изменения электрических сопротивлений между электродами, помещенными-

ми в зону проникновения наливаемой жидкости. Более широкими возможностями обладает испытанный нами [5] метод «борной метки», позволяющий с помощью нейтронного индикатора влажности (НИВ) непрерывно следить за вертикальными перемещениями индикатора в массиве, не нарушая его.

Суть метода, вкратце, состоит в следующем. Первоначально проводится налив в шурф обычной воды. После достижения стабилизации влажности в опробуемом массиве (что регистрируется тем же НИВом) воду в шурфе заменяют на 3-5%-ый раствор борной кислоты и начинают вести наблюдение за перемещением фронта меченной жидкости. Само положение фронта «борной метки» достаточно четко фиксируется по характерному уменьшению частоты электрических импульсов, поступающих с датчика прибора.

Предпринимавшаяся нами попытка использования теплового индикатора при опробованиях экранирующих отложений успеха не имела, прежде всего ввиду того, что кондуктивная составляющая теплопереноса в слабопроницаемых породах всегда существенно преобладала над конвективной составляющей. Выделение последней было также затруднено тепловыми помехами, возникающими за счет нерегулярных колебаний температуры поверхности земли.

В дополнение к опытным наливам в шурфы полезно проводить комплекс лабораторных определений проницаемости; в частности, они позволяют лучше оценить изменчивость проницаемости в зависимости от состава раствора, а также от напряженного состояния пород.

22.1.2. Лабораторная оценка изменений проницаемости грунтов, экранирующих бассейны пристоков

Разнообразие состава жидкостей в накопителях и сложный характер взаимодействия растворов с экранирующими грунтами, меняющими при этом свои физико-механические свойства, вынуждают прибегать к специальным (преимущественно лабораторным) экспе-

риментам с глинистыми экранами и с намывными техногенными отложениями — для оценки возможных изменений их фильтрационных свойств во времени. Эти изменения обусловливаются сменой естественного напряженного состояния экранирующих грунтов при заполнении бассейнов промостками и физико-химическими процессами взаимодействия сточных (прежде всего высокоминерализованных) вод с породами.

При заполнении гидротехнических сооружений экранирующие породы испытывают воздействие дополнительной уплотняющей нагрузки. При этом, в частности, ликвидируется макропористость, и проницаемость грунтов падает. Изучение этого эффекта в лабораторных условиях играет важную роль при оценках экранирующей способности грунтов. Опыты проводятся в компрессионных приборах при различных ступенях уплотняющей нагрузки, увязанных с графиком заполнения технического бассейна промостками.

Так, на рис. 22.1 приведены результаты подобных испытаний лессовидных суглинков одного из районов КМА, которые указывают на резкое (три с лишним порядка) уменьшение проницаемости образцов с увеличением нагрузки от 0,5 до 2,0 кгс/см².

Постановка лабораторных исследований с сильноминерализованными растворами направлена как на прямую оценку влияния их состава на проницаемость глинистых пород, так и на изучение разнообразных последствий процессов засоления, которые, в частности, способствуют развитию осмотической консолидации грунтов. Рассмотрим последовательность и методику изучения взаимодействия глинистых грунтов с рассолами, представленными, главным образом, электролитами нейтральных солей*.

До постановки собственно фильтрационных экспериментов проводится достаточно стандартный комплекс определений водно-физических, физико-химических и механических свойств исследуемых пород: а) показателей начальной влажности и плотности, б) гранулометрического и минералогического состава, в) влажности и давления набухания, г) обменной емкости и состава обменных катионов, д) прочностных и деформационных характеристик. Эти определения осуществляются на специально приготовляемых образцах с различ-

* Методика опытов разработана при участии Р.Э.Дашко.

ной степенью исходного насыщения их солями, причем для образцов ненарушенного сложения такое насыщение достигается под бытовыми нагрузками в режиме молекулярно-диффузационной пропитки. Очень часто уже материалы перечисленного комплекса исследований позволяют, не приступая к фильтрационным испытаниям, оценить возможность изменения проницаемости грунтов при их взаимодействии с промостками. Например, уменьшение процентного содержания глинистой и пылеватой фракций, а также уменьшение числа пластичности (I_p) свидетельствуют о том, что при взаимодействии грунтов с солями происходит агрегирование мелкодисперсных частиц и, следовательно, увеличивается поровая пустотность пород; последнее обычно приводит к росту проницаемости. С другой сторо-

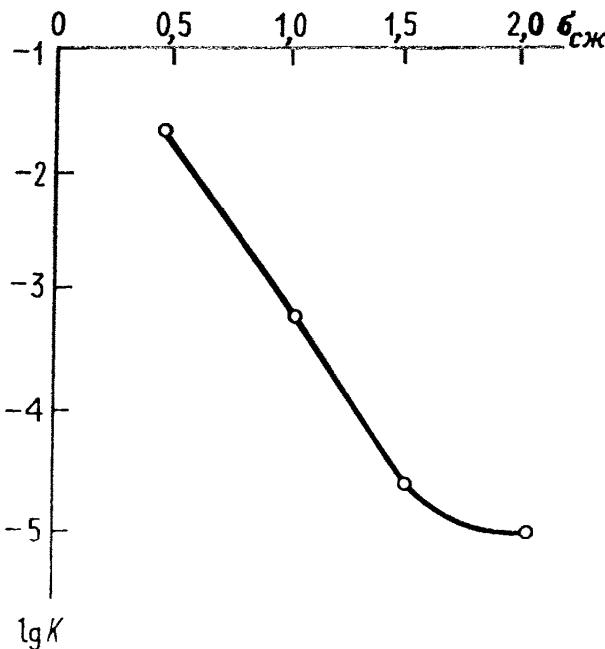


Рис. 22.1. График изменения коэффициента фильтрации макропористых суглинков k , м/сут, с ростом внешней нагрузки σ_{cjk} , кгс/см².

ны уменьшение сцепления (C) и увеличение угла (φ) внутреннего трения свидетельствует о дополнительной кристаллизации солей во внутриворовом пространстве; этот процесс приводит к формированию микротрециноватости и также способствует росту проницаемости. Особенно ощутимы упомянутые изменения для суглинистых и супесчаных разностей. Так, опыты с суглинками Соликамско-Березниковского промрайона показали [4], что их засоление до 10-12% (это отвечает минерализации поровых вод 250-300 г/кг) влечет за собой уменьшение значения I_n от 18 до 13; при этом значение φ возросло от 14° до 33° , а значение C снизилось от 0,17 до 0,05 кгс/см².

Следующим этапом статических лабораторных исследований является оценка гидрогеомеханической роли осмотических эффектов. Здесь изучается влияние напряженного состояния, начальной влажности и степени засоления грунтов на интенсивность осмотической отдачи ими воды, оценивается роль осмотической консолидации пород. Эксперименты проводятся в компрессионно-фильтрационных приборах, позволяющих наблюдать в ходе опыта как за оттоком воды из образца (по изменению уровня рассола в пьезометрической трубке), так и за его линейной деформацией; при заполнении рассолом обеих камер прибора, имитируются условия взаимодействия глинистого блока с рассолами, мигрирующими в трещинах экрана. В результате подобных экспериментов может быть, в частности, получено значение относительной сжимаемости в зависимости от задаваемых условий (минерализации раствора, влажности и степени предварительного уплотнения). В случае водонасыщенного образца осмотический процесс контролируется увеличением объема рассола в камерах (фиксируемым по приращению уровня в пьезометрической трубке прибора). Правда, такой контроль не всегда надежен ввиду параллельно протекающей структурной перестройки породы под действием диффундирующих солей.

Заключительная стадия лабораторных исследований сводится к непосредственному изучению изменения фильтрационных характеристик пород при движении через них растворов различной минерализации. Так как на графиках $V = f(I)$ (где V — результирующая скорость фильтрации через образец при градиенте I и при заданных постоянных значениях напряжений и концентраций) находят отражение осмотические процессы, то их учет имеет принципиальное значение для корректной интерпретации опыта. Для этого Л.И.Кульчицкий предлагает использовать подход, формально ана-

логичный обработке экспериментов при проявлении у породы начального градиента фильтрации. Например, упомянутые уже опыты с суглинками Соликамского района потребовали задания градиентов напора, которые заметно превышали критическое значение $I_o = 5$, отвечающее градиенту осмотического напора.

В целом же, отмеченные ранее изменения внутренней структуры глинистых пород под влиянием солей приводят к закономерному росту проницаемости (κ) по мере увеличения минерализации (M) растворов. По нашим и литературным данным, проницаемость пород может возрастать в 5-10 раз и даже более — для условий фильтрации нейтральных электролитов, например растворов NaCl ; взаимодействие глинистых экранов с концентрированными растворами кислот и щелочей обычно увеличивает это значение на порядок и более. Однако в отдельных случаях отмечаются аномальные виды зависимостей $\kappa = f(M)$ — либо во всем диапазоне изменения минерализации, либо в пределах начального участка. При этом засоление пород, приводящее к росту жесткости их скелета, сглаживает влияние на проницаемость уплотняющей нагрузки. Полезно еще отметить, что выявление описанных изменений проницаемости может потребовать весьма длительных опытов продолжительностью до нескольких десятков, а то и сотен суток.

22.2. Изучение водопроводящих свойств пород зоны аэрации опытными опробованиями в скважинах

Для опытного опробования сравнительно глубокозалегающих элементов разреза зоны аэрации обычно используются наливы воды в скважины. Так как при бурении без промывки стенки скважин в породах существенно глинистого состава, а также в слабых трещиновато-пористых породах (типа мелов, мергелей и т.п.) часто «затираются» с образованием корки слабопроницаемого грун-

та, то должны быть предусмотрены меры по ее механическому устраниению в намечаемых интервалах опробования.

22.2.1. Опробования вблизи поверхности грунтовых вод

При залегании опробуемого интервала непосредственно вблизи уровня грунтовых вод, в опытных условиях образуется единый субгоризонтальный фильтрационный поток, осложненный динамикой водоотдачи (недостатка насыщения) и капиллярными эффектами над его депрессионной поверхностью. Интерпретация таких экспериментов, в принципе, подобна опытным откачкам из безнапорных водоносных пластов [9], и здесь поэтому не рассматривается. Отметим только, что подобными опытами определяется, преимущественно, горизонтальная проницаемость (проводимость) в зоне наведенного фильтрационного потока, хотя качественно проведенные кустовые эксперименты способны оценить и недостаток насыщения, и вертикальную проницаемость пород вблизи депрессионной поверхности.

При неглубоком (1-2 м) залегании уровня грунтовых вод более надежные результаты можно получить опытными откачками, особенно с прямым прослеживанием динамики гравитационной водоотдачи и капиллярных эффектов вблизи понижающейся депрессионной поверхности. Для этого здесь могут использоваться прямые отборы проб на влажность и индикация нисходящего потока влаги трассером, запускаемым через неглубокие шурфы, proximity от центральной скважины. Тогда по выходной кривой концентрации индикатора в откачиваемой воде можно достаточно надежно определить среднюю действительную скорость переноса через приповерхностный слой, после чего нетрудно перейти к расчетным параметрам

рам его проницаемости (точнее, коэффициенту влагопреноса при заданной влажности).

В целом, вышеописанные опыты имеют смысл, прежде всего, для оценки фильтрационных параметров пород в зоне колебания уровней грунтовых вод или их предполагаемого повышения, связанного с поверхностными техногенными источниками (бассейнами промстоков, в частности).

22.2.2. Опробования зон разреза, удаленных от поверхности грунтовых вод

При этом наиболее вероятны три типовые схемы: 1) в опробуемом интервале и непосредственно под ним отсутствуют относительно водоупорные образования (опробование без подпора); 2) опробуемая однородная или слоистая толща подстилается «непроницаемым» водоупором; 3) то же при наличии нисходящего перетекания через подстилающий водоупор («налив на слой»).

Первая опытная схема, характерная для сравнительно однородных и мощных опробуемых толщ ненасыщенных пород, отвечает условиям существенно вертикального потока влаги в зоне опробования; вторая схема характеризуется доминированием горизонтального наведенного потока, который может вовлекать и верховодку над опробуемым водоупором; в последней же схеме имеет место сочетание субгоризонтального потока в зоне влияния налива с вертикальным перетеканием через относительный водоупор, подстилаемый недонасыщенными проницаемыми образованиями. Далее дается анализ каждой из этих схем.

Схема 1. В условиях гомогенных пород и глубокого залегания уровня подземных вод зона распространения наливающей в скважину жидкости приобретает со временем характерную «колоколообразную» форму, определяемую совместным действием гравитационных сил и ка-

пиллярных эффектов вблизи ее границ. При этом в непосредственной близости от фильтра скважины движение носит радиальный характер, а несколько ниже ее дна формируется вертикальный поток с градиентом $I_z = 1$. Перемещение нижней его границы, сопровождаемое соответствующим ростом боковой поверхности ореола наливающейся жидкости (через которую осуществляется отвод последней капиллярными силами), препятствует достижению стационарного опытного режима. Моделирование показало [13], что полное водонасыщение пород отмечается лишь вблизи скважины, а боковой капиллярный отток намного увеличивает эффективную зону влияния эксперимента. При условии постоянного уровня воды в скважине, напоры вблизи нее (в насыщенной зоне) быстро стабилизируются, чего никак нельзя сказать о напорах в недонасыщенной области; поэтому скорость потока продолжает изменяться во времени. Расход подаваемой жидкости сначала максимален, а затем — довольно быстро (реально в течение нескольких часов) падает до примерно постоянных значений (Q_∞). График зависимости $1/Q_c$ от $\lg t$ при $Q < 0,8Q_\infty$ примерно прямолинеен, что позволяет разработать схему интерпретации для нестационарного режима [13]. Однако, результаты могут существенно исказаться за счет профильной анизотропии, которая вызывает более раннее отклонение упомянутого графика от прямолинейного.

С другой стороны, интерпретация может вестись по периоду стабилизации расхода, но для достижения им значения Q_∞ может потребоваться очень большое время — порядка 5–10 суток — при малой исходной влажности пород и/или низкой проницаемости. При этом объем воды, необходимый для опыта, растет нелинейно: напри-

мер, для достижения точки в 90% от Q_∞ потребуется воды в два раза больше, чем для точки $0,8Q_\infty$. Расчетная зависимость для периода стабилизации, полученная как уравнение регрессии по данным численных экспериментов, имеет вид*:

$$\lg \frac{Q_\infty}{K r_c H} = 0,658 \lg H/r_c - 0,238 \sqrt{\alpha} - 0,398 \lg H + 1,343, \quad (22.1)$$

где H — превышение уровня над дном скважины радиусом r_c (м), не превосходящее длины ее фильтра, α — средний уклон графика $\ln K = f(\psi)$ в интервале $0,5 \leq K \leq 1,0$; $\alpha = \ln [0,5/\psi (K = 0,5)]$, в м⁻¹; K — относительный коэффициент влагопереноса (волях от коэффициента фильтрации), ψ — высота всасывания. Из-за недооценки профильной анизотропии формула (22.1) дает некоторое промежуточное значение между K_r и K_z , тем более близкое к K_z , чем ближе реальный процесс к стабилизированному режиму.

В целом же, недоучет капиллярных эффектов и использование зависимостей, полученных из предпосылки стационарности процесса, может приводить с сильному завышению расчетного коэффициента фильтрации. Правда, отмечается, то при $H/r_c > 10$, когда влияние оттока через дно скважины ограничено, достаточно реальные результаты дает стационарная зависимость:

$$K = \frac{Q_\infty}{C r_c H}, \text{ где } C = \frac{2\pi (H/r_c)}{sh^{-1}(H/r_c) - 1}. \quad (22.2)$$

Как и предыдущая зависимость, формула (22.2) предполагает глубокое залегание уровня от дна скважины, превосходящее хотя бы в 1,5 - 2 раза значение H . Очевидно, ее можно рекомендовать и для случая гомогенных трещиноватых пород.

Гораздо сложнее обстоит делос опробованием гетерогенных трещиновато-пористых пород зоны аэрации: донасыщение водой слабопроницаемых пористых блоков

* Считается, что влияние подпора от грунтовых вод еще не проявляется.

делает интерпретацию опыта крайне неопределенной. Процесс влагопереноса протекает в три стадии: 1) заполнение водой наиболее проводящих трещин; 2) подключение пористой матрицы; 3) полное насыщение пористой матрицы. Показателем, определяющим значимость потока в трещинах, служит величина [11]:

$$\eta^* = \frac{b K_f \cos \beta}{D_m (W_n - W_o)}, \quad (22.3)$$

где β — угол отклонения трещины с раскрытием « b » от вертикали, K_f — коэффициент фильтрации для трещинного пространства, W_n и W_o — максимальная и начальная насыщенности блоков. При $\eta^* \gg 1$ значение потока в трещинах велико, а при $\eta^* \ll 1$ доминирует поток через матрицу.

Так, расчет поступления бурового раствора из скважин в туфы на полигоне Юкка Моунтэн дал продолжительность первой стадии 40 сек. (при продвижении раствора по трещинам на 20 м), а второй — около 13 сут. При этом отмечено, что расход жидкости из трещин в матрицу почти не зависит от ее капиллярных свойств и имеет порядок $\pi k_f \cos \beta b/2$ — для второй стадии и $\pi k_f \cos \beta b$ — для третьей. Объясняется это тем, что при сильном капиллярном всасывании фронт по трещинам продвигается на небольшие расстояния и площадь взаимодействия с матрицей мала и наоборот, т.е. процесс склонен к саморегулированию. Продвижение потока по трещинам практически вообще прекращается при отключении источника поступления влаги; следовательно, в слоистой среде наличие одного слоя с высокими показателями капиллярного всасывания может вообще «перерезать» подток влаги по вертикальным трещинам (при ограниченном объеме поступившей в пласт воды).

Таким образом, возможность определения проницаемости трещинного пространства на фоне интенсивного усвоения влаги недонасыщенными пористыми блоками представляется весьма проблематичной*. Выход из этого положения можно искать по двум направлениям: 1) опробование воздухом и 2) предварительное длительное замачивание пород опробуемой зоны с последующим повторным наливом в течение сравнительно короткого времени. В частности, в последнем случае порода будет вести себя подобно гомогенным трещиноватым образованиям. При опробовании же нагнетанием в скважину воздуха рекомендуется расчетная зависимость, модифицирующая известное решение [10] для несовершенной скважины:

$$K = \frac{Q \mu p_e \ln(l/r_c)}{\pi l (p^2 - p_e^2)}, \quad (22.4)$$

где l — длина опытного интервала, μ — вязкость воздуха, p — давление нагнетания, p_e — исходное давление воздуха в грунте, примерно равное атмосферному.

Схема 2. Для наших представлений эта опытная схема имеет ограниченный интерес, так как она позволяет определять лишь проницаемость пород зоны аэрации вдоль напластования. Использовать ее поэтому разумно, преимущественно, на предполагаемых участках подтопления от вновь проектируемых бассейнов промстоков.

Задача о распространении наливаемой воды от скважины вдоль водоупорного основания рассматривалась в ряде публикаций в том числе в работах Н.Н.Веригина, Г.И.Баренблatta и В.М.Шестакова, Н.П.Куранова и др.

Базируясь на этих работах и развивая их, рассмотрим задачу фронтальной динамики водонасыщения сухих пород при закачке в

* Поэтому некоторые авторы предлагают вычислять ее по разнице между определенной в полевых условиях проницаемостью породы в целом и проницаемостью матрицы, найденной лабораторными экспериментами.

них растворов через скважину; проанализируем последовательно несколько расчетных ситуаций, отвечающих различным стадиям процесса (рис. 22.2). При этом будем исходить из предпосылки о поршневом характере движения жидкости в пористой (трещиноватой) среде, что справедливо, в частности, если пренебречь капиллярными эффектами на фронте увлажнения.

На начальных этапах налива раствора в совершившую по степени и характеру вскрытия скважину, в ней формируется конус растекания (рис. 22.2а), вершина которого (характеризующаяся ординатой h_c), имеет тенденции к подъему; величина его ограничена мощностью толщи m .

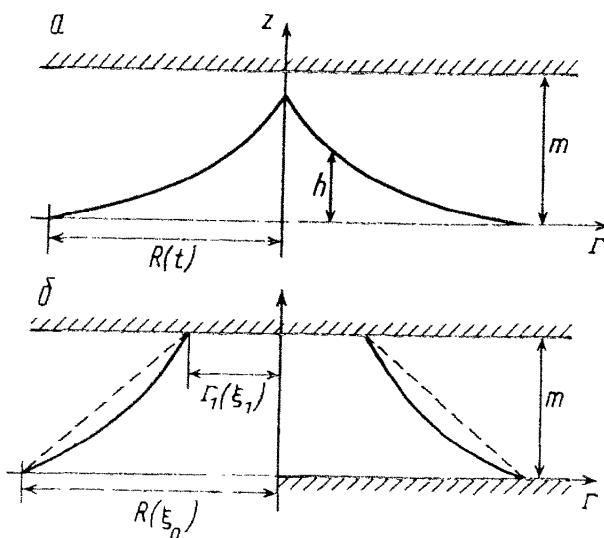


Рис. 22.2. Схема к оценке растекания воды при ее наливе через скважину в сухие грунты (а и б отвечают различным стадиям процесса)

Достаточно строгое решение задачи (для случая $h < m$), описывающее форму границы раздела «вода- воздух», имеет вид [7]:

$$h^2 = \frac{Q}{\pi K} W(r, t), \quad (22.5)$$

где функция $w(r, t)$ определяется выражением

$$W(r, t) = \ln \frac{R}{r} - \frac{R^2 - 1}{2R^2}, \quad (22.5a)$$

справедливым при быстро достигаемом на практике условии $\mu R / r_c > 1$; здесь μ — коэффициент недостатка насыщения пород, r_c — радиус скважины, $R = R(t)/r$; радиус влияния $R \equiv R(t)$ (рис. 22.2, а) находится из уравнения

$$R^2 = \sqrt{\frac{k Q}{\pi}} \frac{2t}{\mu}. \quad (22.6)$$

Рассмотрим также приближенное решение той же части задачи, которое отталкивается от уравнения фильтрационного баланса

$$Q = -2\pi k r h \frac{dh}{dr}, \quad (22.7)$$

справедливого в предположении Дюпюи (вертикальная компонента скорости фильтрации пренебрежимо мала в сравнении с горизонтальной). Для квазистационарного режима фильтрации величина $Q = \text{const}$ и может быть приравнена дебиту налива. Тогда интегрирование уравнения (22.7) в пределах $[h, 0]$ и $[r, R]$ дает:

$$h^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln(R/r) \quad (22.8)$$

Для нахождения функции $R = R(t)$, контролирующей скорость перемещения «языка» наливаляемых вод по подошве толщи, составим другое уравнение баланса влаги:

$$Q t = \int_0^R 2\pi \mu r h dr. \quad (22.9)$$

Подстановка в формулу (22.8) уравнения (22.9) для напоров h и последующее интегрирование дает выражение:

подобное (22.6).

Расхождения в расчетах по формулам (22.6,а) и (22.10) величины R не превышают 5%.

Далее оценим погрешности, возникающие за счет допущения Дюпюи о вертикальности линий равных напоров, приняв при этом возможность проявления азотропных свойств пласта (характеризующихся коэффициентом профильной анизотропии $\kappa = K_z/K_x$). Необходимость учета вертикальной составляющей скорости фильтрации (22.7), балансовому уравнению

$$Q = -2\pi r K_x \frac{\partial \varphi^*}{\partial r} \quad (22.11)$$

записанному по аналогии с уравнением фильтрации в безнапорном потоке [2]. В нем для характеристики потенциальной функции — φ^* получено выражение:

$$\varphi^* = \frac{1}{2} h^2 \left[1 - \frac{2h}{k_z h^2} \int_0^h z V_z dz \right], \quad (22.12)$$

причем $V_z = V_z$ — при $z = h$ и $V_z = 0$ — при $z = 0$, V_z — вертикальная компонента скорости фильтрации.

При $\kappa \gg 1$ выполняется предпосылка Дюпюи, $\varphi^* = h^2$, т.е. интегрирование (22.11) дает ранее полученное решение (22.8).

Для другого предельного случая $\kappa \ll 1$, в предположении о линейном затухании скорости V с глубиной h потока ($V_z = -K_z z/h$), имеем

$$\varphi^2 = \frac{1}{6} h^2 \quad (22.12, а)$$

то есть снижение проницаемости в вертикальном направлении приводит к уменьшению крутизны поверхности раздела. Таким образом, проявление азотропных свойств пласта увеличивает степень заполнения пор влагой при наливе в него жидкости, ибо $h_{\kappa \ll 1} = \sqrt{3} h_{\kappa \gg 1}$.

В целом, сопоставляя два полученных решения (22.5) и (22.8), нетрудно заметить, что приближенная балансовая оценка дает несколько более сжатые и выпуклые фронта, характеризующие смешение

ние границы раздела «вода-воздух» в координатах $h + r$, — по сравнению с оценкой на базе формулы (22.5).

Для описания более поздних стадий напорно-безнапорного движения жидкости (когда $h_c > m$, рис. 22.2б), обратимся к так называемым автомодельным решениям. Их построение основывается на фундаментальных уравнениях неразрывности при двухфазной фильтрации [1]. Если вытесняемая фаза (в данном случае, воздух) имеет плотность и вязкость много ниже соответствующих физических параметров нагнетаемой через скважину жидкости (раствора), то исходное уравнение движения границы раздела фаз $z = z(r, t)$ может быть представлено в виде:

$$K \frac{\partial}{\partial r} \left(r Z \frac{\partial Z}{\partial r} \right) = \mu r \frac{\partial Z}{\partial t}, \quad (22.13)$$

Введением безразмерных переменных

$$U = \frac{Z}{m} \text{ и } \xi = \frac{r}{\sqrt{Kmt/\mu}} \quad (22.14)$$

уравнение (22.13) приводится к виду:

$$\frac{d}{d\xi} \left(u\xi \frac{du}{d\xi} \right) = - \frac{\xi^2}{2} \cdot \frac{du}{d\xi} \quad (22.15)$$

Дополнительно рассмотрим уравнение баланса жидкости

$$Qt = \pi r_1^2 m \mu + 2\pi \mu \int_{r_1}^R Zr dr, \text{ или}$$

$$\bar{Q} = \frac{\xi_1^2}{2} + \int_{\xi_1}^{\xi_0} u\xi d\xi, \quad \xi_0 = \frac{R}{\sqrt{Kmt/\mu}}, \quad \xi_1 = \frac{r_1}{\sqrt{Kmt/\mu}}, \quad (22.16)$$

где ξ_0 и ξ_1 — безразмерные координаты точек примыкания границы раздела к подошве и кровле пласта (см. рис. 22.2б); $\bar{Q} = Q/2\pi Km^2$.

Далее будем аппроксимировать фазовую границу прямой линией

$$u(\xi) = \alpha_1 (\xi - \xi_0), \quad \alpha_1 = 1/(\xi_1 - \xi_0). \quad (22.17)$$

Для нахождения соотношения между характеристиками ζ_0 и ζ_1 продифференцируем уравнение (22.15), имея в виду, что $u = 0$ при $\xi = \zeta_0$. В результате получаем $u' = \zeta_0/2$, а с учетом (22.17)

$$\frac{1}{\zeta_1 - \zeta_0} = -\frac{\zeta_0}{2} \text{ или } \zeta_1 = \frac{\zeta_0^2 - 2}{\zeta_0} (\zeta_0 > 2). \quad (22.18)$$

Подстановка выражения для искомой функции $u(\zeta)$, а также последнего соотношения в балансовое уравнение (22.16) приводит к квадратичному уравнению относительно ζ_0^2 :

$$V^2 - 2V(\bar{Q} + 1) + \frac{4}{3} = 0, V = \zeta_0^2. \quad (22.19)$$

Отсюда:

$$\zeta_0^2 = (\bar{Q} + 1) + \sqrt{(\bar{Q} + 1)^2 - 4/3}. \quad (22.20)$$

Область применения формулы (22.20) ограничена условием:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{2\pi Km^2} \geq 0,15 \quad (22.21)$$

ибо меньший дебит нагнетания (при фиксированных k, m) не обеспечивает поддержание напора $h_c > m$ на контуре скважины.

График функций ζ_0 и ζ_1 представлен на рис. 22.3. Начальная ветвь кривой $\zeta_0(\bar{Q})$ при $0,3 < \bar{Q} > 2$ хорошо с точностью до 5% аппроксимируется формулой

$$\zeta_0 = 2 + \log \bar{Q}. \quad (22.22)$$

При больших \bar{Q} ($\bar{Q} > 10$)

$$\zeta_1 \approx \zeta_0 = \sqrt{2\bar{Q}} \quad (22.23)$$

или

$$r_1 \approx r_o = \sqrt{\frac{Qt}{\pi \mu t}}. \quad (22.24)$$

Это значит, что высокие дебиты нагнетания (Q) в пласт с относительно невысокой проводимостью ($T = k\mu$) приводят к формированию в нем вертикального межфазового контакта, а его временная характеристика определяется в простейшей балансовой формуле (22.24).

В общем же случае, для расчета координат характерных точек используются соотношения $r_o = \xi_0 \sqrt{Tt/\mu}$ и $r_1 = \xi_1 \sqrt{Tt/\mu}$ (ξ_0 и $\xi_1 = f(Q)$ — см. график на рис. 22.3). Длина проекции границы раздела фаз на горизонтальную плоскость определяется по формуле:

$$r = r_o - r_1 = (\xi_0 - \xi_1) \sqrt{Tt/\mu}. \quad (22.25)$$

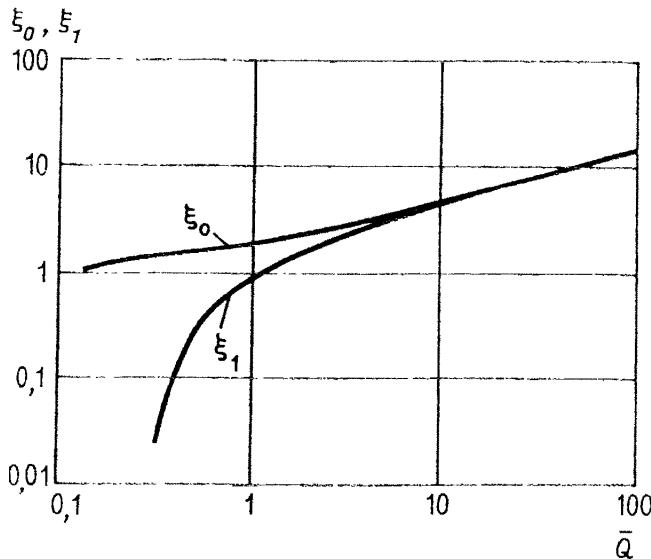


Рис. 22.3. График функций ξ_0 (ξ_1) от безразмерного аргумента \bar{Q}

Схема 3. Наливы на слабопроницаемый слой через скважины для определения его вертикальной проница-

ности являются, пожалуй, наиболее важным видом опросований, предназначенных для исследования защитной роли зоны аэрации: таким образом оценивается фильтрационное сопротивление наиболее слабопроводящих ее элементов. В идеале, опыт должен проводиться до достижения стационарного режима, при котором расходы налива и перетоков по площади области распространения раствора радиусом R сравниваются. Тогда справедливо балансовое соотношение:

$$Q = \pi K_{oz} R^2 (h_o/m_o + I_\phi), \quad (22.26)$$

где h_o — высота всасывания на контакте с нижележащим, относительно более проницаемым, слоем (при его естественной обводненности на всю мощность $h_o = 0$); I_ϕ — средний градиент наведенного фильтрационного потока, равный примерно $I_\phi = 1 + h_c/(3m_o)$, h_c — высота столба воды в скважине относительно кровли слабопроницаемого слоя.

При больших отношениях h_c/m_o , когда значение второго слагаемого в выражении для I_ϕ соизмеримо с единицей, можно использовать более точное решение [6]:

$$h^2 \approx h_{cp} m_o \delta [K_1(\delta) I_o(\lambda r) + I_1(\delta) K_o(\lambda r)], \quad (22.27)$$

где h — глубина потока в водопринимающем слое (на расстоянии r от скважины), имеющем коэффициент фильтрации K ; $\lambda^2 \approx 2K_o/Km_o h_{cp}$; h_{cp} — осредненная глубина потока, которую рекомендуется принимать равной $h_{cp} \approx 0,4h_c$; $\delta = \lambda R$; I_o , I_1 , K_o , K_1 — моделированные функции Бесселя.

Используя это решение при $r = r_c$ (r_c — расчетный радиус скважины) и полагая $\lambda r_c \ll 1$, получаем уравнение для определения значения δ :

$$\delta I_1(\delta) \approx 0,8 \frac{Q}{Km_0 h_c}, \quad (22.28)$$

которое позволяет найти искомый параметр K_{oz} подбором из общего уравнения (22.27) при известном значении $h(r)$ в наблюдательной скважине.

Сильное влияние на результаты опыта величины r , предполагает ее независимое определение экспресс-наливом (разд. 20.1).

Если в таких экспериментах использовать воду с повышенной минерализацией, то при глубинах опробования до 7-10 м радиус области ее растекания по кровле опробуемого пласта (R) может быть определен без бурения дополнительных скважин — с использованием метода заряженного тела (МЗТ). Объем, занятый электролитом при наливе, в первом приближении можно рассматривать как электропроводящий диск. Как следует из результатов лабораторных экспериментов и теоретических расчетов, положение точек максимального градиента электрического потенциала практически совпадает с проекцией кромки диска на поверхность земли — при условии $R > (0,8+1,0) z$ (где z — глубина залегания тела электролита), т.е. на практике радиус тела электролита можно найти по результатам измерений электрического потенциала. При достижении границей растекания стационарного положения, когда вся наливаемая жидкость расходуется на нисходящее перетекание через экранирующих слой, расчетный расход перетекания определяется зависимостью (22.26), в которую можно, для точности, добавить плотностной градиент Δp :

$$Q_n = \pi R^2 K_{oz} (\Delta p + h_o/m_o + I_\phi). \quad (22.29)$$

Отсюда, зная расход налива, получаем значение K_{oz} . В дальнейшем оно может быть, при необходимости, скорректировано по данным лабораторных испытаний с учетом возможных изменений проницаемости под влиянием индикаторной жидкости; для экранов хранилищ промстоков лучше поэтому выбирать индикаторную жидкость, отвечающую по составу промстокам.

Приведенные зависимости ориентируются на достижение стационара, что для слабопроницаемых пород типа мягких глин и тяжелых суглинков мало реально. Так, если исходить из зависимости необходимого для этого времени (t_{cm}) от свойств пород, производимой Б.М. Шестаковым [9]

$$t_{cm} = 1,6 \frac{\mu h_0}{K_{oz} (3 + h_0/m_0)} (h_0 = 0,74 \sqrt{Q/K}) \quad (22.30)$$

то требуемая длительность опыта достигает десятков и сотен суток. С другой стороны, нестационарная фаза налива испытывает сильное влияние ряда трудно учитываемых факторов, связанных, прежде всего, с динамикой емкостных и капиллярных свойств, а при подпоре слабопроницаемого слоя снизу — также образование в нем воздушной «подушки». Поэтому В.М. Шестаков [9] предлагает использовать фазу налива лишь для идентификации свойств водоносного слоя, перекрывающего относительный водоупор, а оценку вертикальной проницаемости последнего — проводить по наблюдениям за падением уровня после прекращения налива. Соответствующую методику постановки и интерпретации опыта можно найти в работе [9]; рекомендуются, в частности, повторные наливы с целью ограничения роли упомянутых динамических факторов.

В целом же, рассмотренные здесь экспериментальные схемы еще нуждаются в более глубокой проработке — в части как постановки опытов, так и их интерпретации; при этом надо обратить особое внимание на должный учет взаимодействия «насыщенной» (в результате налива) и ненасыщенной зон, для чего понадобится, в частности, широкое привлечение численного моделирования при планировании и интерпретации экспериментов.

22.3. О целесообразных границах применения опытных опробований для оценки параметров массопереноса пород зоны аэрации

Уже приведенный выше анализ, свидетельствующий о крайне ограниченных возможностях опытных опробований для изучения показателей переноса влаги, и даже одной лишь проницаемости при водонасыщенном состоянии пород, заставляет усомниться в целесообразности специальных индикаторных опробований, ориентированных на определение параметров массопереноса для пород зоны аэрации: в широком круге условий такие попытки не будут реально подкреплены хотя бы более-менее надежными данными о структуре и параметрах потока влаги, переносящего индикатор. Поэтому представляется по-

лезнным ограничить подобные попытки разумным минимумом. При обосновании последнего будем учитывать следующие обстоятельства.

1. Сравнительно хорошо контролируемые опытные опробования могут ставиться лишь в приповерхностных образованиях — в основном, в виде опытных наливов в шурфы или дождевания с постоянной интенсивностью. Такие опробования довольно широко проводятся в работах сельскохозяйственной и мелиоративной направленности, когда главный интерес представляют свойства именно приповерхностной зоны, т.е. наливы в шурфы или им подобные эксперименты в данном случае имитируют прогнозную ситуацию при минимальном проявлении масштабных эффектов. При этом для интерпретации используются одномерные решения для гомогенных сред типа фундаментального решения микродисперсии. Так, при задании постоянной влажности на поверхности,

$$C = 0,5 \operatorname{erfc} \frac{X - X^*}{\sqrt{2D^*t}}, \quad (22.31)$$

где $X^* = \varepsilon / W_n$, (ε — интенсивность инфильтрации, W_n — новое значение влажности), D^* — коэффициент гидродисперсии при $W = W_n$. При необходимости учета равновесной сорбции, значение W_n заменяется на $W_n R$ (R — коэффициент задержки).

Для гетерогенной (макропористой) среды используются решения с «активными» и застойными зонами (разд. 1.1.1). Кстати, экспериментально показано [10], что наливы в шурфы, при которых имеет место инфильтрация с подпором, дают результаты, заметно отличные от инфильтрации без подпора: в последнем случае влияние застойных зон на процессы переноса индикатора оказываются намного сильнее, и его фронт перемещается с гораздо меньшими отставаниями от фронта влагопереноса, чем в первом случае.

В целом, даже в этих, сравнительно простых, условиях выявились существенные трудности проведения и интерпретации экспериментов:

а) сильное искажающее влияние многочисленных факторов на структуру потока влаги при опытных наливах (разд. 22.1.1) находит свое специфическое отражение и в динамике переноса индикатора, — отмечается образование «языков» трассера (внедряющихся далеко вперед относительно основного фронта переноса) или, тем более, индикаторной жидкости с повышенной плотностью, имеет место «проскок» отдельных анионов (в частности, Cl^-), накладывается кинетика массообменных процессов с неконсервативным индикатором и пр. (разд. 4.1.3); все это делает результаты наблюдений за распространением индикатора крайне неопределенными с позиций последующей интерпретации;

б) при массовых опробованиях на ряде опытных площадок выяснилось, что расхождения результатов по разным опытам на порядок превышает степень неопределенности результатов отдельных экспериментов, т.е. изменчивость искомых параметров в приповерхностной зоне очень велика и требует весьма большого объема экспериментов;

в) с этой точки зрения, опытные полевые опробования в пористых породах не продемонстрировали существенных преимуществ перед опытами в грунтовых колонках, по крайней мере, при длине последних, позволяющих исключить или учесть влияние макропор (достаточной при этом обычно признается длина в первые десятки сантиметров [12]).

Ко всему этому остается добавить, что динамика масопереноса в приповерхностных образованиях достаточно убедительно оценивается специальными методами наблюдений (гл. 23). С учетом же сказанного о возможностях лабораторных экспериментов, можно заключить, что опытно-миграционные опробования здесь неэффектив-

ны, по крайней мере, с позиций проблематики настоящей работы.

2. Сравнительно мощные толщи достаточно хорошо влагопроводящих пористых и трещиновато-пористых пород в зоне аэрации также не требуют проведения такого рода опробований: загрязнители усваиваются пористой матрицей, необходимые свойства которой с большой достоверностью оцениваются лабораторными экспериментами. Напомним, что при ограниченной инфильтрации трещины и макропоры в породах нижней части зоны аэрации достаточно большой мощности (разд. 4.1.3) оказываются «выключенными» из процесса влагопереноса и, соответственно, массопереноса. Более того, даже если это не так по отношению к влагопереносу, то транспорт загрязнений все равно идет чаще всего со скоростями, отвечающими проницаемости пористой матрицы.

3. Следовательно, единственный тип пород зоны аэрации, который мог бы действительно нуждаться в полевом опытно-миграционном опробовании, — это гомогенные трещиноватые породы (а также гетерогенные трещиновато-пористые — применительно к загрязнителям, не усваиваемым пористыми блоками). Реально для этого могут использоваться опыты с наливом в центральную скважину или дуплетные эксперименты, при условии предварительного насыщения трещинного и порового пространства в зоне последующего запуска индикатора.

4. Особо следует выделить возможности крупномасштабных и длительных индикаторных запусков, которые проводятся на квазистационарном фоне откачки из грунтового водоносного горизонта, подстилающего достаточно мощную (5-10 и более метров) зону аэрации. В таком

варианте, определение времени субвертикального перемещения индикатора по фиксации последнего в откачиваемой воде позволяет наиболее надежно оценить действительные скорости переноса, (а приблизительно — и значения удельной естественной инфильтрации*) и их изменения в отдельные характерные периоды — интенсивных дождей, снеготаяния и др. Это особенно важно для выявления возможной роли и превалирующих путей миграции загрязнителей в гетерогенных (трещиновато-пористых, макропористых и т.п.) образованиях. Число откачивающихся скважин определяется, преимущественно, техническими и финансовыми условиями, и в реальности его разумно, очевидно, ограничивать в диапазоне от одной до четырех, имея ввиду, что представительность результатов, естественно, возрастает с увеличением охваченной опытом площади** и количества точек отбора индикатора.

Одна из вероятных схем такого рода экспериментов — т.н. «конверт», когда откачка ведется из четырех скважин, расположенных по квадрату, а запуск индикатора приурочен к центральной части последнего. При этом запуск может проводиться через шурфы или траншеи на поверхности, а также наливом на относительно водонепроницаемые пропластики (см. ранее) через скважины, в том числе расположенные на различных глубинах; в последнем случае целесообразно использовать параллельно несколько индикаторов. При интерпретации опыта на предмет оценки действительной скорости субвертикального переноса, временем миграции индикатора по подстилающему водоносному пласту можно пренебречь, что при глубине откачки, превышающей длину пути такой миграции или соизмеримой с нею, физически достаточно оправдано. Если при бурении опытных

* Иногда такие запуски могут оказаться полезными и для опытной имитации условий на участках аварийных разливов загрязнителей.

** Вместе с тем, откачка не должна вызывать резкого роста мощности зоны аэрации на опытном участке.

скважин отобраны образцы на объемную влажность пород зоны аэрации или она определена *in situ*, то по их интегральной емкости оценивается удельная инфильтрация, а по частным значениям влажности — отвечающие им величины коэффициента влагопереноса. Непосредственно сравнивая времена миграции трассеров и неконсервативных индикаторов, определяют коэффициенты задержки для последних. Дополнительным контрольным показателем служит суммарная масса откаченного индикатора.

Конечно, опыты эти требуют повышенных затрат средств и времени, но они способны приносить важную, порой уникальную информацию о миграции загрязнений через зону аэрации, в частности о защитной роли последней, о возможных характерных временах задержки в ней поступающих с поверхности загрязнителей. Подобные экспериментальные установки, которые могут быть названы глубинными лизиметрами, тем более оправдают себя, если на них будут проводиться многократные опытные работы, включенные в систему гидрогеоэкологического мониторинга на изучаемой территории (разд. 23.1).

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 22

1. Баренблatt Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М., Недра, 1984.
2. Бэр Я., Заславский Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. М., Мир, 1971, 452 с.
3. Веригин Н.Н., Васильев С.В., Саркисян В.С., Шержуров Б.С. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород. М., Недра, 1977, 271 с.
4. Дашко Р.Э., Крысов О.Ю., Мольский Е.В., Петров Н.С. Изучение противофильтрационных экранов шламохранилищ жидких отходов калийного производства. В кн. Охрана окружающей среды калийных производств. Л. ВНИИГ, 1985, с. 73-83.

5. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л., Недра, 1980, 320 с.
6. Куранов Н.П. О растекании воды по глинистым слоям в сухих грунтах. Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1988, N5, с. 121-125.
7. Куранов Н.П., Пильдогш С.А. Экспресс-метод определения фильтрационных параметров зоны аэрации. В кн. «Защита подземных вод от загрязнения и истощения». Тр. ВОДГЕО, М., 1989, с.38-42.
8. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. Изд. 2-е, М., Наука, 1977, 520 с.
9. Шестаков В.М., Пашковский И.С., Сойфер А.М. Гидрогеологические исследования на орошаемых территориях. М., Недра, 1982, 244 с.
10. International conference and workshop on the validation of flow and transport models for the unsaturated zone. New Mexico, May 22-25, 1988, 548 p.
11. Nitao J., Buscheck T. Infiltration of a liquid front in an unsaturated, fractured porous medium. Water Resources Research, 1991, v. 27, N 8, p.p. 2099-2112.
12. Parker J.C., Albrecht K.A. Sample volume effects on solute transport prediction. Water Resources Research, 1987, v. 23, N12, p.p. 2293-2307.
13. Stephens D.B., Neuman S.P. Vadoze zone permeability tests: summary. Journal of Hydraulic Div., 1982, vol. 108, N5, p.p. 623-677.

ГЛАВА 23

Опытные наблюдения для изучения условий переноса загрязнений через зону аэрации

23.1. Задачи, состав и проведение наблюдений

Как и в предыдущем разделе, мы не будем здесь особо останавливаться на изучении условий миграции загрязнений в приповерхностном «активном» слое, являющимся объектом интенсивных исследований в мелиорации и сельско-хозяйственной деятельности: нас будет по-прежнему интересовать, в первую очередь, оценка защитной роли зоны аэрации в процессах загрязнения подземных вод.

Задачами соответственно ориентированных опытных наблюдений являются:

1) оценка условий и параметров влагопереноса пород зоны аэрации в диапазоне естественных колебаний влажности слагающих ее пород*, а также на участках размещения действующих источников загрязнения, где условия инфильтрации и, соответственно, влажностный режим могут претерпевать существенные изменения;

2) оценка условий и параметров массо- (тепло)переноса при естественном инфильтрационном режиме, а также на участках действующих поверхностных источников загрязнения.

* На участках подтопления или затопления последних наблюдения ведутся и интерпретируются согласно изложенным ранее подходам (гл. 18 и 19).

Чаще всего задачи, связанные с влагопереносом и миграцией загрязнений на данном участке, целесообразно решать совместно — в рамках единой системы наблюдений. Для этого, наряду с наблюдениями за динамикой уровней и состава воды в грунтовом водоносном горизонте, т.е. на нижней границе зоны аэрации, могут использоваться:

- а) наблюдения за влажностным, солевым и биохимическим режимом пород зоны аэрации посредством регулярных отборов образцов пород из шурфов и скважин;
- б) то же на образцах, заключенных в капсулы и размещаемых на длительный период в скважинах на своих изначальных позициях (разд. 17.2);
- 3) наблюдения за режимом всасывающего давления — в ненасыщенных породах и уровняй в пределах верховодки, для чего используются, соответственно, тензиометрические посты и открытые пьезометры или их малоинерционные модификации, оборудованные датчиками порового давления (последнее — для замеров давлений в относительных водоупорах, подстилающих верховодку);
- 4) наблюдения *in situ* за влажностным режимом и перемещениями фронтов увлажнения по различным геофизическим полям (гамма-каротаж, нейтронные измерители влажности, замеры электропроводности между фиксированными точками, иногда термокаротаж, радиационный каротаж и др.) — аналогично изложенному в разд. 22.1;
- 5) наблюдения за потоками (расходами) и составом влаги, мигрирующей через породы зоны аэрации, по лизиметрическим постам, а иногда — и по горизонтальным выработкам или скважинам (предпочтительнее вакуумированным), пройденным в ненасыщенных толщах;
- 6) наблюдения за составом поровой влаги по стационарным постам в грунтовом массиве, оборудованным «всасывающими» тонкопористыми водоприемниками (т.наз. керамические чашки);

7) наблюдения за газовым режимом в зоне аэрации по стационарным пробоотборникам на земной поверхности, а изредка — и в скважинах.

Нужно сказать, что многие из вышеперечисленных способов проведения наблюдений являются пока недостаточно разработанными или слишком сложными для массового применения, поэтому они остаются, преимущественно, прерогативой специализированных опытных работ, к тому же реализуемых, главным образом, в приповерхностном слое зоны аэрации. Это относится, в частности, к тензиометрическим замерам всасывающего давления, ко многим специализированным процедурам, к наблюдениям в скважинах за газовой компонентой, к использованию вставных капсул с образцами грунта и «керамических чашек». Последние, кстати, часто дают неоднозначные результаты. Так, отмечается, что замеренные концентрации и даже состав пробы влаги в целом сильно зависят от нарушений грунта при установке, а также от соотношения значений всасывающего давления в материале пробоотборника и в грунте. Поэтому, например, во влажные периоды, когда усиливается подвод раствора по макропорам, зона влияния отбора увеличивается, и наоборот. Время установления равновесия в системе «грунт-пробоотборник» может измеряться многими месяцами. По всем этим причинам не отмечается заметного улучшения представительности опробования по сравнению с отбором образцов грунта. Напротив, использование вставных капсул с грунтом, позволяющих более-менее сохранить природную физико-химическую обстановку в точке наблюдения, кажется весьма перспективным; однако пока этот способ представляется слишком сложным и трудоемким.

Большие перспективы имеют наблюдения за газовой компонентой, которые пока применяются, преимущественно, на уровне поверхностной газовой съемки. Такая съемка весьма эффективна для выявления загрязнения на поверхности грунтовых вод или выше нее. В

в этом случае влияние поперечной (плановой) газовой диффузии в зоне аэрации приводит к тому, что размеры газового ореола намного больше, чем у исходного ореола загрязнения, особенно в направлении, перпендикулярном градиенту фильтрации подземных вод. Наоборот, если источник загрязнения находится ниже уровня подземных вод, то газовая съемка или вообще не выявляет загрязнения, или обнаруживает его лишь много ниже по потоку от основного скопления. Эти общие положения подтверждены, в частности, специальными опытными запусками углеводородных загрязнителей над уровнем грунтовых вод и под ним [6].

Возможна и организация стационарных постов наблюдений за газовой компонентой вблизи выявленных источников загрязнения. Так, на участках подземных хранилищ отходов (в частности, свалок) может идти заметное газовыделение, связанное с их возгоранием. При этом в трещиновато-пористых породах газ движется по трещинам со скоростями, превышающими на 5 порядков скорость перемещения влаги по блокам — при тех же градиентах (например, скорости по газу для условий полигона Юкка Моунтэн [7] — 1000 м/год). Таким образом, по газовыделению можно вести наблюдения за состоянием свалки.

К сожалению, количественная интерпретация результатов наблюдений за газовой компонентой весьма неопределенна. Одна из причин этого — сильная зависимость миграции газа не только от диффузионной, более-менее стабильной, составляющей, но и от конвекции, вызываемой даже крайне слабыми перепадами давления газа между отдельными зонами (например, связанными с колебаниями атмосферного давления и температуры на дневной поверхности).

В целом, из всего комплекса возможных средств и способов наблюдений для оценки защитной роли зоны аэрации, базовыми в настоящее время следует считать*: наблюдения за грунтовыми водами и верхноводкой, периодический отбор проб грунта для последующих лабора-

* При закладке измерительной аппаратуры на земной поверхности — в основании будущих бассейнов промстоков — могут быть эффективно использованы практически все из названных способов.

**ОПЫТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
УСЛОВИЙ ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЕНИЙ ЧЕРЕЗ ЗОНУ АЭРАЦИИ**

торных исследований, некоторые стандартные виды скважинного каротажа и, в какой-то мере, лизиметрические наблюдения. Значение последних, несмотря на их трудоемкость, сложности устранения искажений, вызванных установкой, и относительно высокую стоимость, трудно переоценить, ибо они способны давать прямую информацию о важнейшем параметре — инфильтрационном питании, попутно принося и весьма полезные сведения о динамике химического, радиационного и биогенного загрязнения. В частности, именно глубинные лизиметры могут дать первые сигналы об ускоренном продвижении загрязнителей по макропорам или трещинам в породах зоны аэрации в периоды интенсивного инфильтрационного питания, когда всасывающая способность пористой матрицы оказывается недостаточной для полного усвоения ею загрязнений; особенно же это важно для загрязнителей, вообще не проникающих в пористую матрицу (разд. 11.3).

Что же касается отбора проб пород зоны аэрации, как базового элемента проводимых наблюдений, то здесь полезно подчеркнуть следующие моменты:

1) образцы «ненарушенного сложения» должны отбираться из регулярно проходимых скважин в фиксированных пунктах наблюдений, причем после отбора и выполнения целесообразных каротажных работ или опытных опробований* скважины должны либо ликвидироваться, либо переводиться в разряд наблюдательных — за верховодкой или уровнями грунтовых вод;

2) плановое расположение пунктов наблюдений определяется характером и топологией источников загрязне-

* Использование воды при опробованиях искажает последующие циклы наблюдений в данном пункте, так что предпочтительно опробование нагнетанием нейтрального газа или воздуха.

ния (см., в частности, разд. 17.2), результатами геоэкологической съемки, а также необходимостью увязки с другими элементами системы наблюдений в зоне аэрации и в водоносных пластах; специально следует подчеркнуть, что при случайных локальных разливах загрязнителей на земной поверхности, наблюдения должны распространяться и за пределы площади зафиксированного источника загрязнения — в целях оценки латеральной миграции последних (разд. 11.1);

3) плотность и глубина отбора адаптируются от цикла к циклу применительно к геологическому разрезу и скорости проникновения загрязнений или наблюдаемых индикаторов, с учетом, конечно, роста трудоемкости и затрат по мере увеличения глубины наблюдений; во всех случаях особое внимание обращается на контакты влагопроводящих пород с подстилающими водоупорами и на капиллярную кайму над поверхностью грунтовых вод (с учетом динамики последней), где обычно наблюдаются аномальные концентрации загрязнителей и максимальная изменчивость окислительно-восстановительной обстановки;

4) нужно специально отметить необходимость отбора образцов трещиновато-пористых пород зоны аэрации, ибо продвижение фронта загрязнения в пористой матрице может оставаться до поры до времени вообще не отраженным в данных наблюдений за грунтовыми водами и даже за верховодкой (в том числе и в ситуации, когда фронт загрязнения окажется гипсометрически ниже верховодки);

5) частоту отбора образцов во времени трудно регламентировать, — она также адаптируется к скорости развития наблюдаемого процесса загрязнения; учитывая, однако, что наиболее интенсивная его динамика отмечается в первый период загрязнения приповерхностного слоя, где отбор образцов не связан с существенными техническими трудностями и затратами, нужно провести сначала

**ОПЫТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
УСЛОВИЙ ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЕНИЙ ЧЕРЕЗ ЗОНУ АЭРАЦИИ**

2-3 цикла достаточно интенсивных наблюдений*, а по нему — выработать исходные представления о последующей их частоте;

6) желателен отбор образцов не слишком малой длины, с тем чтобы, по возможности, осреднить изменчивость свойств в тех элементах разреза, которые рассматриваются при схематизации как однородные; кроме того, распределение компонентов в поровой влаге образцов отнюдь не так однородно, как в пробах воды, отбираемой непосредственно;

7) лабораторные исследования отобранных образцов должны предусматривать определение пористости и влажности (а также показателей радиоактивности — при необходимости), а затем — анализ химического и бактериологического состава поровой влаги, как и веществ, сорбированных на минеральной фазе;

8) помимо техногенных загрязнителей, анализу могут подлежать любые маркирующие компоненты, прежде всего — ландшафтные индикаторы (разд. 23.2.3); в качестве важного косвенного индикатора загрязнения грунтов зоны аэрации может использоваться биогеохимический сигнал, легко фиксируемый даже по образцам нарушенной структуры и по старому керну (том 3).

Остается заметить, что все гидрогеологические наблюдения в зоне аэрации должны особенно тесно увязываться не только с системой мониторинга водоносных пластов, но и с гидрологическим, почвенным и метеорологическим мониторингом, а также с опытными опробованиями пород этой зоны на отдельных ключевых участках (гл. 22); в частности, напомним о возможностях длительных и крупномасштабных индикаторных запусков на

* При их планировании используются, в частности, данные геоэкологической (почвенной) съемки и всех других видов наблюдений, уже введенных в действие.

фоне откачек из грунтовых водоносных горизонтов (разд. 22.3).

23.2. Интерпретация результатов наблюдений

23.2.1. Общие интерпретационные подходы

Качественная интерпретация полученных данных позволяет выявить типовые участки и характерные загрязнители или маркирующие компоненты для последующего количественного анализа, направленного на оценку схем и параметров влаго-массопереноса в зоне аэрации. Следует, однако, подчеркнуть, что решения соответствующих обратных задач грешат многочисленными дефектами, свойственными некорректно поставленным задачам в целом (гл. 18).

Основополагающие расчетные схемы исходят обычно из предпосылки об одномерной — вертикальной — миграции инфильтрующейся влаги*, которой мы здесь и воспользуемся, сделав необходимые ограничивающие оговорки несколько позднее. В такой постановке важнейшим искомым параметром оказывается величина естественного инфильтрационного питания (ε). Для ее определения по данным гидрогеологических (наряду с гидрометеорологическими) наблюдений могут использоваться:

1) известные методы решения обратных задач фильтрации — на базе данных о гидродинамическом режиме грунтовых вод, дополненные, по возможности, гидрохимической информацией о них, интерпретируемой в рамках уравнений смешения (гл. 18);

* Интерпретация наблюдений на участках поверхностных бассейнов промстоков рассмотрена ранее (гл. 18).

2) результаты лизиметрических наблюдений, дающих, по сути дела, прямой метод определения инфильтрационного питания — для условий пункта расположения лизиметра;

3) определения возраста инфильтрующейся влаги или, более широко, интерпретация наблюдений за ландшафтными индикаторами, которые будут рассмотрены подробнее далее (разд. 23.2.3);

4) данные наблюдений за режимами давлений (уровней верховодки, в частности) и влажностей в пределах зоны аэрации.

Последняя возможность, которая ориентируется на приравнивание инфильтрационного питания (осредненного по глубине) скорости квазистационарного влагопреноса, реализуется более-менее четко для слоистых систем, особенно при наличии верховодки: в таком случае можно предположить полное водонасыщение подстилающего относительного водоупора, коэффициент фильтрации которого примерно известен из лабораторных определений; впрочем, всегда есть опасение, что эта величина сильно занижена из-за недоучета макронеоднородности и гетерогенности (трещиноватости) водоупора.

В целом, все перечисленные методы оценки инфильтрационного питания имеют свои серьезные недостатки и должны поэтому рассматриваться как взаимодополняющие, взаимокорректирующие.

На локальных участках техногенно измененного инфильтрационного питания изложенные методы (за исключением, разве, лизиметрического) могут оказаться мало достоверными вследствие сильного влияния латерального оттока (разд. 11.1), а иногда и плотностной конвекции (разд. 18.2.3). Поэтому, если отсутствуют прямые сведения о расходе поверхностных вод, поступающих на инфильтрационное питание, лизиметрические наблюдения становятся практически главным источником информации о нем. В этой связи еще раз подчеркнем важность

заблаговременной закладки лизиметрических (а также других — см. разд. 23.1) постов на тех участках, которые априорно рассматриваются как потенциально опасные с позиций поверхностного загрязнения (скажем, на участках свалок или горных отвалов).

При известных из прямых наблюдений значениях площадного инфильтрационного питания, они могут быть использованы в расчетных оценках коэффициентов влагопереноса, отвечающих наблюдаемым значениям влажности, — по той же расчетной схеме одномерного влагопереноса. Для локальных условий техногенно изменной инфильтрации подобные оценки, опять-таки, могут оказаться дефектными. Конечно, при наличии богатой информации о развитии процесса влагопереноса (в частности, в летерльном направлении), можно рассчитывать на более представительные двумерные его модели, однако подобные возможности на практике реализуются крайне редко.

На базе полученных значений параметров, характеризующих интенсивность вертикального влагопереноса, оказывается возможной последующая интерпретация для оценки схем и параметров массопереноса. Для этого могут быть использованы:

1) результаты лизиметрических наблюдений, фиксирующих состав инфильтрующихся вод;

2) другие данные наблюдений за субвертикальным распространением в зоне аэрации ландшафтных индикаторов (см. далее) или конкретных загрязнителей;

3) данные о гидрохимическом режиме грунтовых вод — в рамках решения обратных задач массопереноса, в которых сопрягаются расчетные схемы вертикальной миграции загрязнений в зоне аэрации и плановой их миграции в грунтовых водах (см., для иллюстрации, разд. 10.2).

В последних двух вариантах более-менее исчерпывающие интерпретации реальны лишь при условии, что

имеются независимо полученные сведения о схемах и параметрах влагопереноса (инфилтрации). В противном случае возможны только некоторые избирательные оценки (в первую очередь, касающиеся равновесной сорбции) или же определения комплексных характеристик массопереноса, погрешности которых достаточно жестко коррелируют друг с другом, т.е. могут быть соотнесены с конкретными физическими параметрами лишь на основе т.наз. субъективной информации (экспертных решений, в частности).

В первую очередь, мы проиллюстрируем эти общие позиции, касающиеся количественной интерпретации результатов наблюдений, на примере лизиметрических замеров, допускающих наиболее простые и надежные* расчетные оценки, а затем перейдем к более общим задачам на примере комплексных наблюдений за ландшафтными индикаторами и конкретными загрязнителями.

23.2.2. Простейшие схемы интерпретации на примере лизиметрических наблюдений

Как уже отмечено, преимущества лизиметрических наблюдений связаны с возможностью прямой оценки инфильтрационного питания в сочетании с динамикой химического состава раствора на одном и том же фиксированном породном блоке. После определения по известному накопленному объему раствора осредненного значения скорости влагопереноса (v), равного в данном варианте средней величине удельной инфильтрации, можно легко найти осредненные значения «рабочей» пористости и ко-

* Естественно, в пределах площадей и глубин, охватываемых лизиметрическими наблюдениями, при устранении технических дефектов, обусловленных закладкой лизиметра.

эффективности гидродисперсии или их гетерогенные аналоги: для этого достаточно воспользоваться рекомендациями, отраженными в разд. 22.3. Сопоставление результатов для трассеров и конкретных загрязнителей позволяет найти показатели сорбции или деструкции последних.

По аналогичным принципиальным схемам могут обрабатываться индикаторные запуски, осуществляемые с поверхности на фоне откачек из грунтовых водоносных горизонтов (разд. 22.3).

23.2.3. Интерпретация результатов наблюдений за глобальными трассерами

Как и в случае изучения распределения содержаний глобальных трассеров в водоносных пластах (разд. 21.1), наблюдения за изотопным составом поровой влаги в зоне аэрации позволяют существенно повысить качество гидрогеологических прогнозов. Однако необходимо отметить, что такого рода исследования требуют применения более уточненных методик и в целом являются более дорогостоящими. Последнее связано, в первую очередь, с тем, что расчетные оценки ориентированы на одновременное изучение распределения в породе как содержаний того или иного трассера, так и поровой влаги. Реально это возможно только при прямом отборе проб грунтов в процессе «сухого» бурения специальных скважин.

В принципе, в качестве индикаторов могут служить вещества, описанные в разд. 21.1.1. Кроме того, на сельскохозяйственных территориях с хорошо изученным режимом землепользования, возможно рассмотрение в качестве маркирующих веществ составляющих минеральных удобрений, в первую очередь — иона NO_3^- (нитратиона), который является достаточно консервативным компонентом. В целом же, в гидрогеологической практике наибольшее распространение получили исследования, базирующиеся на изучении профилей распределения три-

**ОПЫТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
УСЛОВИЙ ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЕНИЙ ЧЕРЕЗ ЗОНУ АЭРАЦИИ**

тия. В последнее время появляются работы, пропагандирующие параллельную интерпретацию замеров в поровых водах изотопа ^{36}Cl [3].

Конечной целью такого рода исследований является оценка осредненных скоростей нисходящей миграции влаги, связанной с такой важной характеристикой, как величина инфильтрационного питания (ε). В отдельных случаях возможна детализация некоторых параметров испарения и соленакопления, имеющих место вблизи уровня подземных вод.

Предварительная оценка величины инфильтрационного питания может быть выполнена на основе прослеживания фронта индикатора (z_p), с которым отождествляются чаще всего пиковые значения концентрации (c_{max}) для входной концентрационной функции (рис. 21.1):

$$\varepsilon = \frac{1}{t_p} \int_0^{z_p} W(z) dz, \quad (23.1)$$

где $W(z)$ — вертикальное распределение влажности, t — время, отсчитываемое от начала поступления трассера с инфильтрационными водами.

Так как дисперсионные эффекты могут смещать положение фронта поршневого вытеснения относительно пиковых значений (c_{max}), то разумно вместо величины z_p использовать значение z_c , отвечающее статистическому центру масс концентрационного распределения [3]:

$$\int_0^{z_c} W(z) c(z) dz = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} W(z) c(z) dz. \quad (23.2)$$

Более надежные оценки для интерпретации тритиевых данных дает балансовая формула [3]:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} W(z) c(z) dz}{t \sum_{i=1}^{\infty} \omega_i c_i e^{-\lambda t}}, \quad (23.3)$$

где $c_i e^{-\lambda t}$ — концентрация трития в атмосферной влаге, которая наблюдалась i лет тому назад до проводимых замеров, скорректированная для учета радиоактивного распада; ω_i — весовой коэффициент, учитывающий годовые вариации инфильтрации ($\omega \approx P_i / \bar{P}$, P_i и \bar{P} — величина атмосферных осадков в i -ый год и ее среднее значение за многолетний период).

Рассмотренные элементы расчетных методик применимы и при интерпретации наблюдений в зоне аэрации, сложенной «мягкими» трещиновато-пористыми породами (такими как мел и мергель). Как правило пробы грунта*, выбуленные из таких пород, несут информацию о пористой матрице, которая и является основным транспортером вещества (индикатора) и влаги в зоне аэрации. С рядом методических аспектов такого рода исследований можно ознакомиться по публикациям английских гидро-геологов, проанализированным нами в работе [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 23

1. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л., Недра, 1980, 320 с.

* Соответствующие гидрохимические исследования базируются на анализе растворов, экстрагированных из пористой матрицы.

2. Шестаков В.М., Пашковский И.С., Сойфер А.М. Гидрогеологические исследования на орошаемых территориях. М., Недра, 1982, 244 с.
3. Cook P.G., Jolly I.D., Leaney F.W., Allan G.L., Fifield L.K., Allison G.B. Unsaturated zone tritium and chlorine 36 profiles from southern Australia: Their use as tracers of soil water movement. Water Resources Research, 1994, vol. 30 ,N6, p.p. 1709-1719.
4. Baehr A.L. Selective transport of hydrocarbons in the unsaturated zone due to aqueous and vapor phase partitioning. Water Resources Research, 1987, v.23. N10, p.p. 1926-1938.
5. Parker J.C., Albrecht K.A. Sample volume effects on solute transport prediction. Water Resourcec Research, 1987, v, 23, N 12, p.2293-2307
6. Rivett M.O., Cherry J.A. The effectiveness of soil gas surveys in deliniation of ground water contamination. Proceedings of the conference on petroleum hydrocarbons and organic chemicals on ground water. National water well assosiation, Houston, Texas, November, 1991, p. 20-22.
7. Eaton R.R., Dykhuizen R.C. Effect of material nonhomogeneities on equivalent conductivities in unsaturated porous media flow. International conference and workshop on the validation of flow and transport models for the unsaturated zone. New Mexico, 1988, May 22-25, p.p. 72-77.

ОХРАНА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Валерий Александрович Мироненко
Вячеслав Гениевич Румынин

ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГЕОЭКОЛОГИИ

Том 2

ОПЫТНО-МИГРАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Режим выпуска «стандартный»
Выпущено в авторской редакции*

Набор: Е. В. Воронцова

Компьютерная верстка и подготовка
оригинал-макета: Е. В. Воронцова

Дизайн серии: Е. Б. Капралова

Полиграфическое производство:
Т.Д. Герасимова, Н.Д. Уробушкина,
Г.Н. Потемкина

Подписано в печать 26.02.2002. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Times». Печать
траfareтная на цифровом дупликаторе. Уч.-изд. л.
28,51. Усл. печ. л. 24,6. Тираж 300 экз. Заказ 727

**ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

*Лицензия на издательскую деятельность
ЛР № 062809 от 30.06.98 г.
Код издательства 5Х7(03)*

Отпечатано в типографии
Издательства Московского государственного
горного университета

*Лицензия на полиграфическую деятельность
ПЛД № 53-305 от 05.12.97 г.*

**117935, Москва, ГСП-1, Ленинский
проспект, 6; Издательство МГГУ;
тел. (095) 236-97-80; факс (095) 956-90-40**

