
УДК 556.314.001.57:631.67

Р. Н. Усманов, канд. техн. наук
Ташкентский университет информационных технологий
(Узбекистан, 700084, Ташкент, ул. Амир Тимура, 108,
тел. 1386452; E-mail: rishod.tuit@mail.ru)

Идентификация геофильтрационных процессов в условиях нечеткой исходной информации

(Статью представил д-р техн. наук А. Ф. Верлань)

Рассмотрены вопросы интеграции принципов теории нечетких множеств в процесс решения обратных задач на основе нечетко-детерминированных моделей.

Розглянуто питання інтеграції принципів теорії нечітких множин у процесі розв'язування зворотніх задач на основі нечітко-детермінованих моделей.

Ключевые слова: неопределенность, нечеткость, функция принадлежности, нечеткие множества, нечетко-детерминированные модели, агрегирования.

В практике моделирования геофильтрационных процессов идентификационные задачи решаются на основе данных режимных наблюдений. Как правило, значения геофильтрационных параметров известны лишь в отдельных точках области фильтрации, а для неоднородных сред эти величины характеризуются значительной изменчивостью в пространстве. С одной стороны, применение средних или средневзвешенных значений параметров в расчетах может привести к получению смешанных точечных оценок параметров. С другой стороны, традиционное решение неоднородных относительно областей фильтрации геофильтрационных задач осуществляется суперпозицией решений, полученных для зон с различными фильтрационными свойствами. В большинстве случаев границы этих зон изображаются четкими линиями, хотя в природе наблюдается постепенное изменение фильтрационных свойств, т.е. переход границ зон неоднородностей имеет плавный, а не скачкообразный характер. При этом известной (заданной) является предпосылка о соответствии природной обстановки выбранной гипотезе фильтрации. В процессе построения расчетных схем различают среды однородные, кусочно-однородные и с зонами, в которых постепенно изменяются фильтрационные показатели [1—3].

Выделение этих зон для конкретных частей исследуемой территории осуществляется априори, т.е. на основе опыта, знаний и интуиции специа-

листов-гидрогеологов, что в совокупности принято называть экспертной информацией по объекту исследования. Следует заметить, что специалист-гидрогеолог в ходе принятия решений относительно значений коэффициента фильтрации или водопроницаемости для конкретной точки (или зоны области фильтрации) рассуждает прежде всего «качественно». Для него поиск решения — это прежде всего поиск замысла решения, при этом количественные оценки играют вспомогательную роль [4].

Поэтому непосредственное использование в процессе моделирования качественной информации, определяемой опытом, интуицией и знаниями специалистов-экспертов о параметрах объекта исследований, представленных в нечеткой лингвистической форме, дает возможность более обоснованно подойти к проблеме принятия решений [4—6]. При этом интерпретация неопределенных фильтрационных параметров как нечетких более адекватна реальной гидрогеологической обстановке. По-видимому, такой подход, т.е. применение функций принадлежности (ФП) для формализации нечеткого распределения фильтрационных свойств водоносных пластов, позволит усилить аппроксимационные возможности существующих детерминированных моделей геофильтрации и решить задачу моделирования на нечетко-детерминированной основе.

Алгоритм нечеткой идентификации на нечетко-детерминированной основе. Рассмотрим решение задачи идентификации на основе нечетко-детерминированной модели геофильтрации для грунтового водоносного горизонта в следующем виде:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\tilde{K}h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\tilde{K}h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + f - w, \quad (1)$$

$$h(x, y, 0) = \tilde{h}_0(x, y), \quad (x, y) \in D, \quad (2)$$

$$h(x, y, t) = \tilde{\gamma}_1(x, y, t), \quad (x, y) \in D, \quad (3)$$

$$\alpha_1 \left(\tilde{K}h \frac{\partial h}{\partial h} \right) + \beta_1 h = \tilde{\gamma}_2(x, y, t), \quad (x, y) \in \Gamma, \quad t > 0, \quad \alpha_1^2 + \beta_1^2 > 0, \quad (4)$$

где $h(x, y, t)$ — уровни грунтовых вод; $\tilde{K}(x, y)$ — нечеткие коэффициенты фильтрации; $\tilde{h}_0(x, y)$, $\tilde{\gamma}_1(x, y, t)$, $\tilde{\gamma}_2(x, y, t)$ — нечетко заданные функции; x, y — горизонтальные переменные; D — область фильтрации (ОФ); Γ — ее граница.

Краевая задача (1) — (4) реализуется на основе применения конечно-разностных методов [1]. Алгоритм решения идентификационной задачи геофильтрации для однослойных водоносных горизонтов состоит из следующих взаимосвязанных этапов:

1. Замена ОФ сеточной областью (с равномерными или неравномерными шагами по пространственным переменным x и y) с выделением зон неоднородностей, а также переходных зон.

2. Задание наименьшего \underline{K}_λ и наибольшего \overline{K}_λ значений коэффициентов фильтрации по выделенным зонам, где λ — номер зоны;

3. Определение множества лингвистических термов для качественной оценки параметра $\overline{K} : L = \{l_1, l_1, \dots, l_m\}$.

4. Задание для каждой точки сеточной области, включая граничные, нечетких значений (в L -форме) коэффициента фильтрации $\tilde{K} : \tilde{K} = \langle \underline{K}_\lambda, \overline{K}_\lambda, l \rangle$ или $\tilde{K} = \langle \underline{K}_{0\lambda}, \overline{K}_{0\lambda}, \underline{K}_{1\lambda}, \overline{K}_{1\lambda} \rangle$.

5. Переход от L -формы нечеткого числа \tilde{K} к трапециевидной или треугольной формам.

6. Построение функции принадлежности \tilde{K} для всех зон λ , а также для всех точек сеточной области.

7. Определение распределений уровней грунтовых вод во всех точках сеточной области с использованием найденных нечетких значений коэффициентов фильтрации.

8. Вычисление для каждой точки сеточной области значений нечеткого критерия отклонения натуральных уровней грунтовых вод от модельных: $\Delta = \langle \Delta_n, \Delta_b, l \rangle$. Здесь Δ_n, Δ_b — нижний и верхний пороги отклонений в метрах; l — лингвистическая переменная, $l \in L = \{M, HC, C, BC, NB\}$, где M — малая точность моделирования, HC — ниже средней, C — средняя, BC — выше средней, NB — наибольшая точность моделирования. Во всех точках, где наблюдается малая точность моделирования, осуществляется последовательный переход от пессимистической оценки параметра K к оптимистической по формуле

$$\tilde{K} = \bigcup_{\alpha_i \in [0, 1]} (\underline{K}_{\alpha_i}, \overline{K}_{\alpha_i})_{i=1, \overline{K}}, \quad (5)$$

где $\alpha \in \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\}$, причем $0 = \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_k = 1$; \underline{K}_{α_i} и \overline{K}_{α_i} — нижняя и верхняя границы нечеткого числа \tilde{K} на α_i -уровнях.

9. Переход к п. 7.

10. Представление результатов вычислительных экспериментов в удобном для содержательной интерпретации виде (графики, карты, таблицы).

Проектирование нечеткой модели предметной области и ее реализация. Основная цель проектирования нечеткой информационной модели предметной области — установление взаимосвязи между гидрогеологическим объектом и ее численной моделью, а также организация вычислительных экспериментов реализации алгоритма нечеткой идентификации, обеспечение возможности учета различных граничных условий в процессе численного моделирования.

Процесс построения нечеткой информационной модели предметной области целесообразно представить в виде следующей схемы:

ПО → КМ → ИМОФ → НИМПФ → КПЧМ → ПММ,

где ПО — предметная область — гидрогеологический объект (ГГО); КМ — концептуальная модель — база знаний, отображающая знания специалиста о ГГО, ее взаимосвязях, основных процессах, факторах, представленных в виде графиков, таблиц, графов; ИМОФ — информационная модель область фильтрации, предназначенная для организации вычислительного процесса; далее ОФ заменяется сеточной областью, каждой точке которой ставится в соответствие информация в виде пятизначного числа целого типа $i_1 i_2 i_3 i_4 i_5$, разряды этого числа несут следующую информацию:

i_1 — информация о границах ($i_1=0$ — внутренняя граница, $i_1 = 1, 2, 3$ — границы первого, второго и третьего типов, формируются при $i_1 > 0$);

$i_2 i_3$ — информация о питании подземной гидросферы (инфильтрация из каналов, рек), формируется при $i_2 i_3 > 0$;

$i_4 i_5$ — информация о расходных статьях потока (эксплуатационные скважины, дренарующие системы, вклинивания и др.);

НИМПФ — нечеткая информационная модель процесса фильтрации, предназначенная для нечеткого представления параметров среды; каждая точка сеточной области представляется в виде семизначного числа целого типа $i_1 i_2 i_3 i_4 i_5 i_6 i_7$, разряды которого несут следующую информацию:

i_1 — номер зоны неоднородности;

$i_2 i_3$ — вид ФП (треугольный, трапециевидный);

$i_4 i_5$ — общее количество термов; $i_6 i_7$ — номер терма;

НИМПФ формируется на основе следующих принципов:

ОФ разделяется на зоны неоднородности с выделением переходных зон;

для каждой точки ОФ на основе экспертной информации проектируется ФП параметров среды;

для каждой точки ОФ определяют нечеткие значения коэффициентов фильтрации;

КПЧМ — комплекс программ численного моделирования гидрогеологических процессов;

ПММ — продукционная математическая модель объекта, предназначенная для решения задач ситуационного управления.

Предложенный алгоритм нечеткой идентификации гидрогеологических процессов в условиях нечеткой исходной информации, реализован в виде комплекса программ FVAR в среде Delphi 7 с использованием графических возможностей программного комплекса Surfer [7]. Структурная схема программного комплекса FVAR приведена на рис. 1.

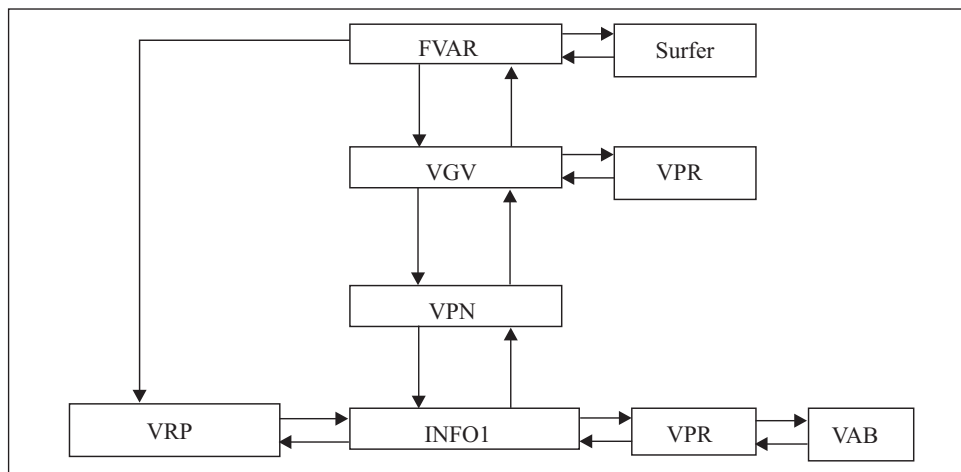


Рис. 1. Схема функционирования программного комплекса FVAR

В процессе функционирования комплекса FVAR в интерактивном режиме получено следующее:

- 1) информационно-технологическая модель ГГО;
- 2) нечеткая экспертная модель ГГО (для условий неполной и полной неопределенности);
- 3) нечеткие распределения параметров ГГО;
- 4) нечеткие распределения уровней и степени минерализации подземных вод ГГО.

Переход от нечеткой L -формы параметра к конкретному типу (треугольному, трапецеидальному) осуществляется в зависимости от масштаба изучаемого процесса, ширины зон неоднородностей.

В состав комплекса FVAR входят: FVAR — программа планирования вычислительных экспериментов и оформления результатов расчетов; INFO, INFO1 — программы формирующие технологические схемы, нечеткие базы знаний для определения нечетких коэффициентов; VPR, VRP, VGV, VAB, VPN — программы вычислительного характера; VPR, VRP — перевод двумерных массивов в одномерные и наоборот; VGV — организация и управление вычислительным процессом; VAB — вычисление коэффициентов разностных уравнений; VPN — анализ технологических схем и решение разностных уравнений.

Пример. Рассмотрим задачу определения параметров водоносного пласта размерами 1400 м и 900 м в плане. Область фильтрации заменяем сеточной областью с шагами $\Delta x = \Delta y = 100$ м. Информационная модель ОФ имеет вид

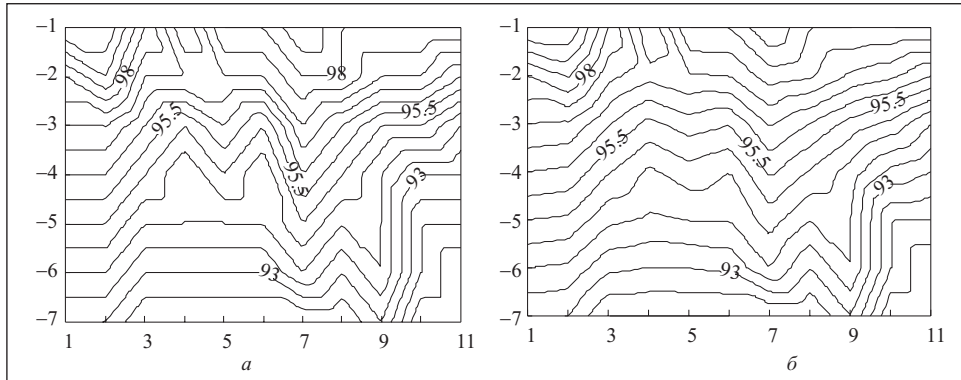


Рис. 2. Результаты нечеткого моделирования значений УГВ (а) и фактические значения (б) за время $t = 15$ сут

10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10000
10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10000
10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10000
10000	0	0	0	0	0	0	10000	10000	10000	10000
10000	0	0	0	0	0	10000	10000	10000	10000	10000
10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000

Фильтрационные свойства ОФ характеризуются тремя зонами неоднородности: от 5 до 9 м/сут, от 9 до 12 м/сут и от 12 до 14 м/сут. Для нечеткого представления параметров принимается терм-множество $L = \{l_1^\lambda, l_2^\lambda, l_3^\lambda, l_4^\lambda, l_5^\lambda\}$, где l_1^λ = малое значение, l_2^λ = ниже среднего, l_3^λ = среднее значение, l_4^λ = выше среднего, l_5^λ = наибольшее значение, $\lambda = 1, 2, 3$.

Коэффициенты фильтрации пласта в плане, т. е. нечеткая экспертно-информационная модель ОФ, имеет следующий вид:

СТРОКА 1
 1010501101050210105032010504101050520105012010502201050330105013010502301050
 3301050530105053010504
 СТРОКА 2
 1010501101050220105031010504201050120105022010503301050130105023010502301050
 3301050230105023010501
 СТРОКА 3
 1010501201050220105012010502201050320105043010501201050230105023010503301050
 4301050230105022010502
 СТРОКА 4
 1010501201050220105012010502301050130105022010503301050430105043010505301050
 5301050230105033010503
 СТРОКА 5
 1010501101050220105031010504101050520105012010502201050330105013010502301050
 3301050230105023010502

СТРОКА 6
1010501101050210105032010504201050120105022010503301050130105023010502301050
3301050130105013010501

СТРОКА 7
1010501101050220105012010502201050320105043010501301050230105023010503301050
4301050130105023010503

СТРОКА 8
1010501101050210105032010504201050120105022010503301050130105023010502301050
3301050130105013010501

СТРОКА 9
1010501101050220105012010502201050320105043010501301050230105023010503301050
4301050130105023010503

Нечеткое (лингвистическое) представление параметров пласта, полученное на основе нечеткой базы знаний, имеет вид

м(1)	нс(1)	с(1)	вс(2)	нб(1)	м(2)	нс(2)	с(2)	м(3)	нс(3)	с(3)
м(1)	нс(1)	с(2)	вс(1)	м(2)	нс(2)	с(2)	м(2)	нс(3)	нс(3)	с(3)
м(1)	нс(2)	м(2)	нс(2)	с(2)	вс(2)	м(3)	нс(2)	нс(3)	с(3)	вс(3)
м(1)	нс(2)	м(2)	нс(2)	м(3)	нс(2)	с(2)	вс(3)	вс(3)	нб(3)	нб(3)
м(1)	нс(1)	с(2)	вс(1)	нб(1)	м(2)	нс(2)	с(2)	м(3)	нс(3)	с(3)
м(1)	нс(1)	с(1)	вс(2)	м(2)	нс(2)	с(2)	м(3)	нс(3)	нс(3)	с(3)
м(1)	нс(1)	м(2)	нс(2)	с(2)	вс(2)	м(3)	нс(3)	нс(3)	с(3)	вс(3)

Здесь м — малое значение; нс — ниже среднего; с — среднее; вс — выше среднего; нб — наибольшее значение.

Начальное распределение уровней грунтовых вод (УГВ), полученное на основе нечетких коэффициентов фильтрации, имеет вид

100.0	100.0	98.00	96.00	98.00	98.00	99.00	98.00	98.00	98.00	98.00
98.00	99.00	97.00	97.00	97.00	97.00	98.00	98.00	97.00	97.00	96.00
97.00	97.00	96.00	95.00	96.00	95.00	97.00	96.00	95.00	95.00	94.00
96.00	96.00	95.00	94.00	95.00	94.00	96.00	95.00	94.00	93.00	93.00
95.00	95.00	94.00	94.00	94.00	94.00	95.00	94.00	94.00	92.00	92.00
94.00	94.00	93.00	93.00	93.00	93.00	94.00	93.00	94.00	92.00	91.00
93.00	93.00	92.00	92.00	92.00	92.00	92.00	92.00	93.00	91.00	91.00

Нечеткое распределение УГВ за время $t = 15$ сут.:

100.0	100.0	98.00	96.00	98.00	98.00	99.00	98.00	98.00	98.00	98.00
98.00	98.74	97.11	96.80	96.99	97.00	97.88	97.76	96.96	96.77	96.00
97.00	96.97	96.02	95.20	95.85	95.32	96.74	96.00	95.19	94.90	94.00
96.00	95.94	95.01	94.22	94.87	94.30	95.78	94.96	94.16	93.22	93.00
95.00	94.45	94.07	93.94	94.02	94.01	94.86	94.00	94.00	92.00	92.00
94.00	93.95	93.06	93.00	93.00	93.06	94.00	93.00	94.00	92.00	91.00
93.00	93.00	92.00	92.00	92.00	92.00	92.00	92.00	93.00	91.00	91.00

Разница между исходными и нечеткими распределениями УГВ по точкам за время $t = 15$ сут.:

0.00000	0.00000	-0.00000	-0.00000	-0.00000	-0.00000	-0.00000	-0.00000	-0.00000	-0.00000	-0.00000
-0.00000	-0.25538	0.10907	-0.20425	-0.01059	-0.00018	-0.11759	-0.24009	-0.04454	-0.22509	-0.00000
-0.00000	-0.02782	0.02048	0.19674	-0.14805	0.31852	-0.25643	-0.00193	0.19000	-0.10321	-0.00000
-0.00000	-0.05981	0.00809	0.22375	-0.13377	0.29574	-0.22377	-0.04412	0.15533	0.22038	0.00000
-0.00000	-0.05477	0.06742	-0.05704	0.01772	0.00696	-0.14401	-0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000
-0.00000	-0.05395	0.06016	-0.00465	0.00234	0.6146	-0.00000	0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Сопоставление исходного и рассчитанного по нечетко-логическому алгоритму распределений УГВ (рис. 2) свидетельствует о достаточно высокой степени точности результатов решения обратной задачи.

Таким образом, предложенный алгоритм нечеткого решения задач идентификации, основанный на непосредственном использовании информации нечеткого характера, является перспективным для решения класса задач, допускающих формализацию в виде дифференциальных уравнений в частных производных или их систем. Результаты проведенных вычислительных экспериментов, связанных с заменой нечетких значений коэффициентов фильтрации неоднородных сред на их ФП, свидетельствуют об их низкой чувствительности к изменениям параметров.

The problems of fuzzy sets theory integration into solution of inverse problems based on fuzzy determinate models are considered.

1. Абуталиев Ф. Б., Ходжибаев Н. Н., Умаров У. У., Измайлов И. И. Применение численных методов и ЭВМ в гидрогеологии. — Ташкент : Фан, 1976. — 67 с.
2. Гавич И. К. Гидродинамика. — М., 1988. — 349 с.
3. Гавич И. К. Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. — М.: Недра, 1980. — 358 с.
4. Алтунин А. Е., Семухин М. В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. — Тюмень : Изд-во Тюменского гос. университета, 2000. — 352 с.
5. Усманов Р.Н. К вопросу нечеткого представления параметров исследуемой среды в процессе решения идентификационных задач // Вест. ТашГТУ. — 2006. — № 3. — С. 7—9.
6. Усманов Р.Н. Интеллектуализация процесса принятия решений в условиях нечеткой исходной информации // Aloqa Dunyosi. — 2007. — № 1. — С. 52—56.
7. Усманов Р.Н. Программа моделирования условий формирования и эксплуатации водозаборов подземных вод с применением нечетко-логических методов // Государственное патентное ведомство Республики Узбекистан. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № DGU 01237, 20.02.2007.

Поступила 23.11.07

УСМАНОВ Ришат Ниязбекович, канд. техн. наук, доцент каф. высшей математики Ташкентского университета информационных технологий. В 1976 г. окончил Ташкентский гос-университет. Область научных исследований — математическое моделирование сложных систем в условиях нечеткой информации.