

3. **СНиП 2.04.02-84.** Строительные нормы и правила. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения [Текст]. – М. : Госстрой, 1985.

4. **Гаврилин, К. В.** Канско-Ачинский угольный бассейн [Текст] / К. В. Гаврилин, А. Ю. Озерский. – М. : Недра, 1996. – С. 121–139.

5. **Озерский, А. Ю.** Гидрогеохимические условия глубоких горизонтов юго-восточной окраины Западно-Сибирского

артезианского бассейна [Текст] / А. Ю. Озерский // Гидрогеохимия осадочных бассейнов : Труды Российской науч. конференции ; под ред. А. Э. Конторовича [и др.]. – Томск : Изд-во НТЛ, 2007. – С. 125–131.

Материал поступил в редакцию 20.03.09.

**Озерский Андрей Юрьевич**, кандидат геолого-минералогических наук, начальник геоэкологической партии

Тел. : +7904-895-30-20

E-mail: ozerski@krasgeo.ru

УДК 628.16

**А. С. СЕЛИВАНОВ, А. В. КОРЯЙКИНА**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петрозаводский государственный университет»

## РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ НЕЧЕТКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

*Рассмотрена задача рационального выбора технологии очистки природной воды. Для решения предлагается использовать некоторые идеи теории нечеткого управления.*

*Очистка природной воды, теория нечеткого управления, повышенное загрязнение водных источников, проектирование очистных сооружений, лингвистическая переменная.*

*The task of rational choice of technologies of natural water cleaning is considered. For its decision it is proposed to use some ideas of the theory of fuzzy control.*

*Natural water cleaning, theory of fuzzy control, increased pollution of water springs, designing of treatment facilities, linguistic variable.*

По сведениям Госсанэпиднадзора России [1] качество питьевой воды, производимой коммунальными и ведомственными водопроводами, продолжает оставаться неудовлетворительным: каждая пятая проба питьевой воды не отвечает гигиеническим требованиям по санитарно-химическим и микробиологическим показателям. Возникла ситуация, когда значительная часть затрат на строительство очистных сооружений может оказаться непроизводительной, поскольку прошедшая очистные сооружения вода не является пригодной для использова-

ния в питьевых целях. Основными причинами сложившейся ситуации специалисты называют повышенное загрязнение водных источников вследствие значительно возросшей в последнее время антропогенной нагрузки, а также несоответствие принятой технологической схемы очистки воды качеству воды водоисточника.

Что касается задачи рационального выбора технологической схемы очистки воды, то, по мнению авторов, она не является тривиальной. Некоторые рекомендации по выбору технологии очистки

с учетом ряда показателей качества исходной воды известны, однако формализованной методике решения этой задачи пока не существует. Более того, в действующих нормативных документах указывается, что выбор схемы очистки воды решается в каждом конкретном случае отдельно, с учетом опыта эксплуатации сооружений в схожих (аналогичных) условиях [2]. Последнее утверждение, по сути, вносит определенный диссонанс в процесс проектирования очистных сооружений. В этих условиях разработка рациональных методов обоснования технологии очистки природных вод представляется перспективной и своевременной задачей.

В работе рассматривается задача рационального выбора работоспособной технологической схемы очистки природной воды. Под технологической схемой очистки в данной работе понимается семантическое (словесное) описание цепочки аппаратов и сооружений, осуществляющих операции по обработке воды. Работоспособной технологической схемой очистных сооружений будем называть такую, которая способна обеспечить необходимый эффект очистки по санитарно-химическим и микробиологическим показателям до гигиенических требований при указанном качестве исходной воды. Возможна такая ситуация, когда для указанного качества исходной воды могут быть подобраны различные работоспособные технологические схемы; приоритет при выборе отдается тем из них, для которых показатели качества исходной природной воды находятся ближе к центру рекомендуемого при применении данной схемы интервала.

Выбор работоспособной технологической схемы, с точки зрения авторов, должен опираться на некоторую систему правил, которую удобно представить в форме структурированного текста:

ПРАВИЛО\_1: ЕСЛИ «Условие\_1», ТО «Заключение\_1»

ПРАВИЛО\_2: ЕСЛИ «Условие\_2», ТО «Заключение\_2»

...

(1)

ПРАВИЛО\_n: ЕСЛИ «Условие\_n», ТО «Заключение\_n»

Располагая информацией о границах применения отдельных технологических схем, можно сформировать базу правил, посредством которой выбирать наиболее работоспособные в конкретных условиях варианты. Обработка описаний при создании базы правил осуществляется на основании экспертных представлений, заданных в форме нечетких лингвистических высказываний. В качестве механизма анализа базы правил авторами предложено использовать модернизированный алгоритм нечеткого управления Мамдани [3], который удобно представить в виде совокупности следующих процедур [4].

*Процедура 1. Формирование базы правил систем нечеткого вывода.* База правил системы нечеткого вывода в форме (1) должна формализовать экспертные рекомендации об использовании той или иной технологической схемы очистки воды. Рекомендуемые показатели качества исходной воды в базе правил описываются посредством лингвистических переменных: цветность, мутность, перманганатная окисляемость воды, время присутствия мелкодисперсной взвеси в воде водоисточника, производительность очистных сооружений. Варианты применения технологической схемы описаны в базе правил соответствующей лингвистической переменной.

Лингвистическая переменная определяется как кортеж  $(\beta, T, X, G, M)$ , где  $\beta$  – наименование или название лингвистической переменной;  $T$  – базовое терм-множество лингвистической переменной или множество ее значений (термов), каждое из которых представляет собой наименование отдельной нечеткой переменной  $\alpha$ ;  $X$  – область определения (универсум) нечетких переменных, которые входят в определение лингвистической переменной  $\beta$ ;  $G$  – некоторая синтаксическая процедура, которая описывает процесс образования или генерирования из множества  $T$  новых, осмысленных в рассматриваемом контексте значений для данной лингвистической переменной;  $M$  – семантическая

процедура, которая позволяет поставить в соответствие каждому новому значению данной лингвистической переменной, получаемому с помощью процедуры  $G$ , некоторое осмысленное содержание посредством формирования соответствующего нечеткого множества [3]. Нечеткая переменная определяется как кортеж  $(\alpha, X, A)$ , где  $\alpha$  – наименование или название нечеткой переменной;  $X$  – область ее определения (универсум);  $A = (x, \mu_A(x))$  – нечеткое множество на  $X$ , описывающее возможные значения, которые может принимать нечеткая переменная  $\alpha$ . Нечеткое множество  $A$  определяется как множество упорядоченных пар вида  $[x, \mu_A(x)]$ , где  $x$  является элементом некоторого универсального множества или универсума  $X$ , а  $\mu_A(x)$  – функция принадлежности, которая ставит в соответствие каждому из элементов  $x \in X$  некоторое действительное число из интервала  $[0, 1]$ , т. е. данная функция определяется в форму отображения:  $\mu_A: \rightarrow [0, 1]$ . Например, функции принадлежности, соответствующие нечетким множествам термов лингвистической переменной «цветность (Ц)», используемой в данной работе, представлены на рис. 1.

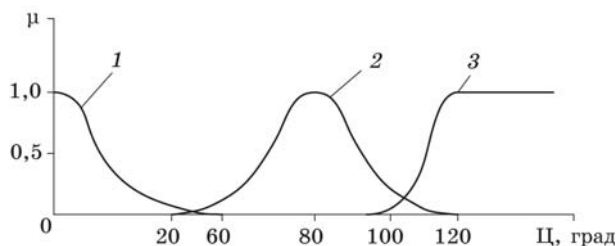


Рис. 1. **Функции принадлежности термов лингвистической переменной – цветности (Ц):** 1 – малая цветность, 2 – средняя цветность, 3 – высокая цветность

Ориентируясь в данной работе в основном на методы очистки высокоцветных маломутных северных вод, приведем кратко описание наиболее известных технологических схем для их очистки с указанием некоторых рекомендуемых показателей качества исходной воды в форме лингвистических переменных (таблица). Содержание таблицы представляет собой сокра-

щенную форму базы правил системы нечеткого вывода при выборе технологии очистки питьевой воды.

*Процедура 2. Преобразование входных переменных.* Цель этапа преобразования четких величин в нечеткие заключается в установлении соответствия между конкретным (четким численным) значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной [4]. Предполагается, что до начала этого этапа известны конкретные значения всех входных переменных системы нечеткого вывода, т. е. множество значений  $V = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ . В общем случае каждое  $a_i \in X_i$ , где  $X_i$  – универсум лингвистической переменной  $\beta_i$ . Далее рассматривается каждое из подусловий вида « $\beta_i$  есть  $\alpha'$ » правил системы нечеткого вывода, где  $\alpha'$  – некоторый терм с известной функцией принадлежности  $\mu(x)$ . При этом значение  $a_i$  используется в качестве аргумента  $\mu(x)$ , тем самым находится количественное значение  $b'_i = \mu(a_i)$ . Это значение и является результатом преобразования подусловия « $\beta_i$  есть  $\alpha'$ ». Этап преобразования четких величин в нечеткие считается законченным, когда будут найдены все значения  $b'_i = \mu(a_i)$  для каждого из подусловий всех правил, входящих в рассматриваемую базу правил системы нечеткого вывода. Это множество значений обозначим через  $B = \{b'_i\}$ .

*Процедура 3. Агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций.* Предполагается, что до начала этого этапа известны значения истинности всех подусловий системы нечеткого вывода, т.е. множество значений  $B = \{b'_i\}$ . Рассматриваем каждое из условий правил системы нечеткого вывода. Если условие правила представляет собой нечеткое высказывание, то степень его истинности равна соответствующему значению  $b'_i$ . Если же условие состоит из нескольких подусловий, причем лингвистические переменные в подусловиях попарно не равны друг другу, то определяется степень истинности сложного

Таблица 1

Технологическая схема	Мутность, мг/л	Цветность, град	Другие факторы
$\begin{array}{c} \text{Cl} \\ \downarrow \\ \text{НСИ} \rightarrow \text{НФ} \rightarrow \text{РЧВ} \end{array} \quad \text{№ 1}$	Малая	Малая	Производительность малая
$\begin{array}{c} \text{НСИ} \rightarrow \text{КХО} \rightarrow \text{См} \rightarrow \\ \uparrow \quad \text{Cl} \\ \text{Р} \quad \downarrow \\ \rightarrow \text{ГО} \rightarrow \text{СФ} \rightarrow \text{РЧВ} \end{array} \quad \text{№ 2}$	Высокая	Высокая	Производительность любая
$\begin{array}{c} \text{НСИ} \rightarrow \text{КХО} \rightarrow \text{ОВО} \rightarrow \\ \uparrow \quad \text{Cl} \\ \text{Р} \quad \downarrow \\ \rightarrow \text{СФ} \rightarrow \text{РЧВ} \end{array} \quad \text{№ 3}$	Высокая	Высокая	Производительность любая
$\begin{array}{c} \text{Р} \quad \text{Cl} \\ \downarrow \quad \downarrow \\ \text{НСИ} \rightarrow \text{КХО} \rightarrow \text{КО} \rightarrow \text{РЧВ} \end{array} \quad \text{№ 4}$	Средняя	Высокая	Производительность любая
$\begin{array}{c} \text{Cl} \quad \text{Р} \quad \text{Cl} \\ \downarrow \downarrow \quad \downarrow \\ \text{НСИ} \rightarrow \text{Фл} \rightarrow \text{СФ} \rightarrow \text{РЧВ} \end{array} \quad \text{№ 5}$	Средняя	Высокая	Производительность малая
$\begin{array}{c} \text{НСИ} \rightarrow \text{КХО} \rightarrow \text{РО} \rightarrow \text{ГО} \rightarrow \\ \uparrow \quad \text{Cl} \\ \text{Р} \quad \downarrow \\ \rightarrow \text{СФ} \rightarrow \text{СФ} \rightarrow \text{РЧВ} \end{array} \quad \text{№ 6}$	Высокая	Высокая	Производительность малая
$\begin{array}{c} \text{Р} \quad \text{O}_3, \text{ПАУ} \quad \text{Cl} \\ \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \\ \text{НСИ} \rightarrow \text{БР} \rightarrow \text{СФ} \rightarrow \text{СФ} \rightarrow \text{РЧВ} \end{array} \quad \text{№ 7}$	Малая	Высокая	Перманганатная окисляемость очень высокая, мелкодисперсная взвесь присутствует временно
$\begin{array}{c} \text{Р} \quad \text{O}_3 \quad \text{Cl} \\ \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \\ \text{НСИ} \rightarrow \text{БР} \rightarrow \text{СФ} \rightarrow \text{ГАУ} \rightarrow \text{РЧВ} \end{array} \quad \text{№ 8}$	Малая	Высокая	Перманганатная окисляемость очень высокая, мелкодисперсная взвесь присутствует постоянно
$\begin{array}{c} \text{НСИ} \rightarrow \text{БР} \rightarrow \text{КХО} \rightarrow \text{См} \rightarrow \\ \uparrow \quad \text{Cl} \\ \text{O}_3, \text{Р} \quad \downarrow \\ \rightarrow \text{РО} \rightarrow \text{СФ} \rightarrow \text{ГАУ} \rightarrow \text{РЧВ} \end{array} \quad \text{№ 9}$	Малая	Высокая	Перманганатная окисляемость очень высокая, мелкодисперсная взвесь присутствует постоянно
$\begin{array}{c} \text{НСИ} \rightarrow \text{КХО} \rightarrow \text{См} \rightarrow \text{ГО} \rightarrow \\ \uparrow \quad \text{O}_3, \text{ПАУ} \quad \text{Cl} \\ \text{Р} \quad \downarrow \quad \downarrow \\ \rightarrow \text{СФ} \rightarrow \text{СФ} \rightarrow \text{РЧВ} \end{array} \quad \text{№ 10}$	Малая	Высокая	Перманганатная окисляемость очень высокая, мелкодисперсная взвесь присутствует временно

Примечания: НСИ – насосная станция первого подъема; КХО – камера хлопьеобразования; См – смеситель; ГО, РО – горизонтальный и радиальный отстойники соответственно; СФ – скорый фильтр; НФ – напорный фильтр; КО – контактный осветлитель; ОВО – осветлитель со взвешенным осадком; БР – биореактор; ГАУ – адсорбер с гранулированным активированным углем; РЧВ – резервуар чистой воды; Р – реагенты; ПАУ – порошкообразный активированный уголь; O<sub>3</sub> – озон; Cl – хлор.

высказывания на основе известных значений истинности подусловий. При этом для определения результата нечетких связей (И, ИЛИ) применяем правила нечеткой логики, позволяющие находить количественные значения истинности всех условий правил системы нечеткого

вывода [3]. Этап агрегирования считается законченным, когда будут найдены все значения  $b''_i$  для каждого из правил  $R_k$ , входящих в рассматриваемую базу правил  $P$  системы нечеткого вывода. Это множество значений можно обозначить так:  $B'' = \{b''_1, b''_2, \dots, b''_n\}$ .

*Процедура 4. Активизация подзаключений в нечетких правилах продукций.* Активизация в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру или процесс нахождения степени истинности каждого из подзаключений правил нечетких продукций [4]. До начала этого этапа предполагаются известными значения истинности всех условий системы нечеткого вывода, т. е. множество значений  $B'' = \{b''_1, b''_2, \dots, b''_n\}$ . Степень истинности заключения равна соответствующему значению  $b''_i$ . Таким образом, находятся все значения  $c_k$  степеней истинности подзаключений для каждого из правил  $R_k$ , входящих в рассматриваемую базу правил  $P$  системы нечеткого вывода.

*Процедура 5. Аккумуляция заключений нечетких правил продукций.* Аккумуляция представляет собой процедуру или процесс нахождения функций принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных множества  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_s\}$ . Цель аккумуляции заключается в том, чтобы объединить все степени истинности заключений для получения функции принадлежности каждой из выходных переменных. Предполагаем, что до начала этого этапа известны значения истинности всех подзаключений для каждого из правил  $R_k$ , входящих в рассматриваемую базу правил  $P$  системы нечеткого вывода. По форме это совокупность нечетких множеств:  $C_1, C_2, \dots, C_q$ , где  $q$  – число подзаключений в базе правил. Далее последовательно рассматривается каждая из выходных лингвистических переменных  $w_j \in W$  и относящиеся к ней нечеткие множества:  $C_{j1}, C_{j2}, \dots, C_{jq}$ . Результат аккумуляции для выходной лингвистической переменной  $w_j$  определяется как объединение нечетких множеств  $C_{j1}, C_{j2}, \dots, C_{jq}$ . Этап аккумуляции считается законченным, когда для каждой из выходных лингвистических переменных будут определены итоговые функции принадлежности нечетких множеств их значений, т. е. совокупность

нечетких множеств  $C'_1, C'_2, \dots, C'_s$ , где  $s$  – число выходных лингвистических переменных в базе правил системы нечеткого вывода.

*Процедура 6. Преобразование выходных переменных.* Преобразование нечетких величин в четкие в системах нечеткого вывода представляет собой механизм нахождения обычного четкого значения для каждой из выходных лингвистических переменных множества  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_s\}$ . Для этого использовали метод центра тяжести. В процессе преобразования нечетких величин в четкие методом центра тяжести значение выходной переменной равно абсциссе центра тяжести площади, ограниченной графиком кривой функции принадлежности, соответствующей выходной переменной.

По результатам исследований разработан комплекс программ, эмулирующий работу построенного модуля нечеткого управления, предназначенного для рационального выбора работоспособной технологической схемы очистки природной воды. В качестве иллюстрации работы модуля нечеткого управления рассмотрим задачу выбора технологической схемы очистки воды из водоисточника со следующими показателями качества исходной воды: цветность – 90 град; мутность – 30 мг/л; производительность – 5000 м<sup>3</sup>/сут; перманганатная окисляемость – 10 мг/л; время присутствия мелкодисперсной взвеси – не более 2 мес. за год.

По результатам анализа входных данных модулем нечеткого управления были построены нечеткие множества, характеризующие возможность использования конкретной технологической схемы при заданных показателях качества воды. Например, в результате анализа возможностей технологической схемы №1 было получено следующее нечеткое множество (рис. 2).

После осуществления операции преобразования нечетких величин в четкие по методу центра тяжести, технологическая схема № 1 получила оценку 4,8 балла.

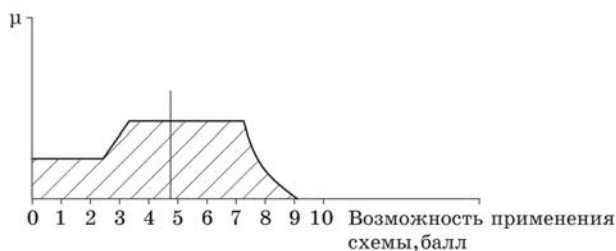


Рис. 2. Графическая интерпретация оценки возможности применения технологической схемы №1 модулем нечеткого управления

По результатам работы модуля были получены следующие оценки (в баллах) для описанных в таблице технологических схем: № 1 – 4,8; № 2 – 3,75; № 3 – 3,75; № 4 – 10; № 5 – 8,75; № 6 – 3,75; № 7 – 2,25; № 8 – 2,5; № 9 – 6,875; № 10 – 7,5.

#### Выводы

Задача рационального выбора технологической схемы очистки воды не является тривиальной; ее решение осложняется отсутствием в действующих нормативных документах четкого описания процедуры обоснования технологии очистки воды. В работе описан алгоритм решения задачи выбора технологической схемы воды в условиях неполноты данных о качестве исходной воды в водоисточнике. Для решения задачи использован подход, основанный на применении теории нечетких множеств Заде. По результатам исследования разработан комплекс программ, реализующий работу модуля

нечеткого управления Мамдани для выбора работоспособных технологических схем очистки воды. Результаты работы могут быть использованы при создании систем поддержки принятия решений в области проектирования инженерно-экологических систем.

#### Список литературы

1. Драгинский, В. Л. Коагуляция в технологии очистки природных вод [Текст] / В. Л. Киселев, Л. П. Алексева, С. В. Гетманцев. – М. : «Научное издательство», 2005. – 576 с.
2. СНиП 2.04.02-84\*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения [Текст] / Минстрой России. – М.: ГП ЦПП, 1996. – 128 с.
3. Деменченков, Н.П. Нечеткое управление в технических системах [Текст] / Н. П. Деменченков. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 200 с.
4. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH [Текст] / А. В. Леоненков. – СПб. : Изд-во «БХВ-Петербург», 2005. – 736 с.
5. Журба, М. Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений [Текст] : в 2 т. / М. Г. Журба, Л. И. Соколов, Ж. М. Говорова. – М. : Изд-во АСВ, 2004. – 2 т. – 496 с.

Материал поступил в редакцию 24.04.09.

**Селиванов Андрей Сергеевич**, кандидат технических наук, руководитель группы ВК

Тел.: (+7911) 403-70-25

E-mail: 411059sas@onego.ru

**Коряйкина Анна Владимировна**, аспирантка

Тел. (8142) 71-10-93

E-mail: anna0@onego.ru