

УДК 628.16

К ВОПРОСУ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ НЕЧЕТКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В работе рассматривается задача рационального выбора технологии очистки природной воды. Для решения предлагается использовать некоторые идеи теории нечеткого управления.

The task of a choice of the optimal circuit of cleaning of natural water is considered. For task solution the theory of fuzzy sets is used.

По данным 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. Имеет место ситуация, когда значительная часть затрат на строительство очистных сооружений может оказаться непроизводительной, поскольку прошедшая очистные сооружения вода не является пригодной для использования в питьевых целях. Основными причинами сложившейся ситуации специалисты называют повышенное загрязнение водоисточников 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, на наш взгляд, она не является тривиальной. Некоторые рекомендации по выбору технологии очистки с учетом ряда показателей качества исходной воды известны, однако формализованной методики решения этой задачи пока не существует. Более того, в действующих нормативных документах (СНиП 2.04.02-84*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения)

указывается, что выбор схемы очистки воды решается в каждом конкретном случае отдельно с учетом опыта эксплуатации сооружений в схожих (аналогичных) условиях. Последнее утверждение, по сути, вносит определенный произвол в процесс проектирования очистных сооружений. В этих условиях разработка рациональных методов обоснования технологии очистки природных вод представляется нам 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 мы 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 нашей точки зрения, 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»

...

ПРАВИЛО_n: ЕСЛИ «Условие_n» ТО «Заключение_n»

(1)

Располагая информацией о границах применимости 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 нами предложено использовать модернизированный алгоритм нечеткого управления Мамдани [2], который удобно представить в виде совокупности следующих процедур [3].

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; применимость технологической схемы описывается в базе правил также соответствующей лингвистической переменной.

Лингвистическая переменная определяется [2] как кортеж $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$, где β - 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 α , X - область определения (универсум) нечетких переменных, которые входят в определение лингвистической переменной β , 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. Нечеткая переменная определяется как кортеж $\langle \alpha, X, A \rangle$, где α - наименование или название нечеткой переменной, X - область ее определения (универсум), $A = \langle x, \mu_A(x) \rangle$ - нечеткое

множество на X , описывающее возможные значения, которые может принимать нечеткая переменная α . Нечеткое множество A определяется как множество упорядоченных пар вида $\langle x, \mu_A(x) \rangle$, 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: $\mu_A : X \rightarrow [0,1]$. Функции принадлежности, соответствующие нечетким множествам термов лингвистических переменных, используемых в данной работе, представлены на рисунке 1.

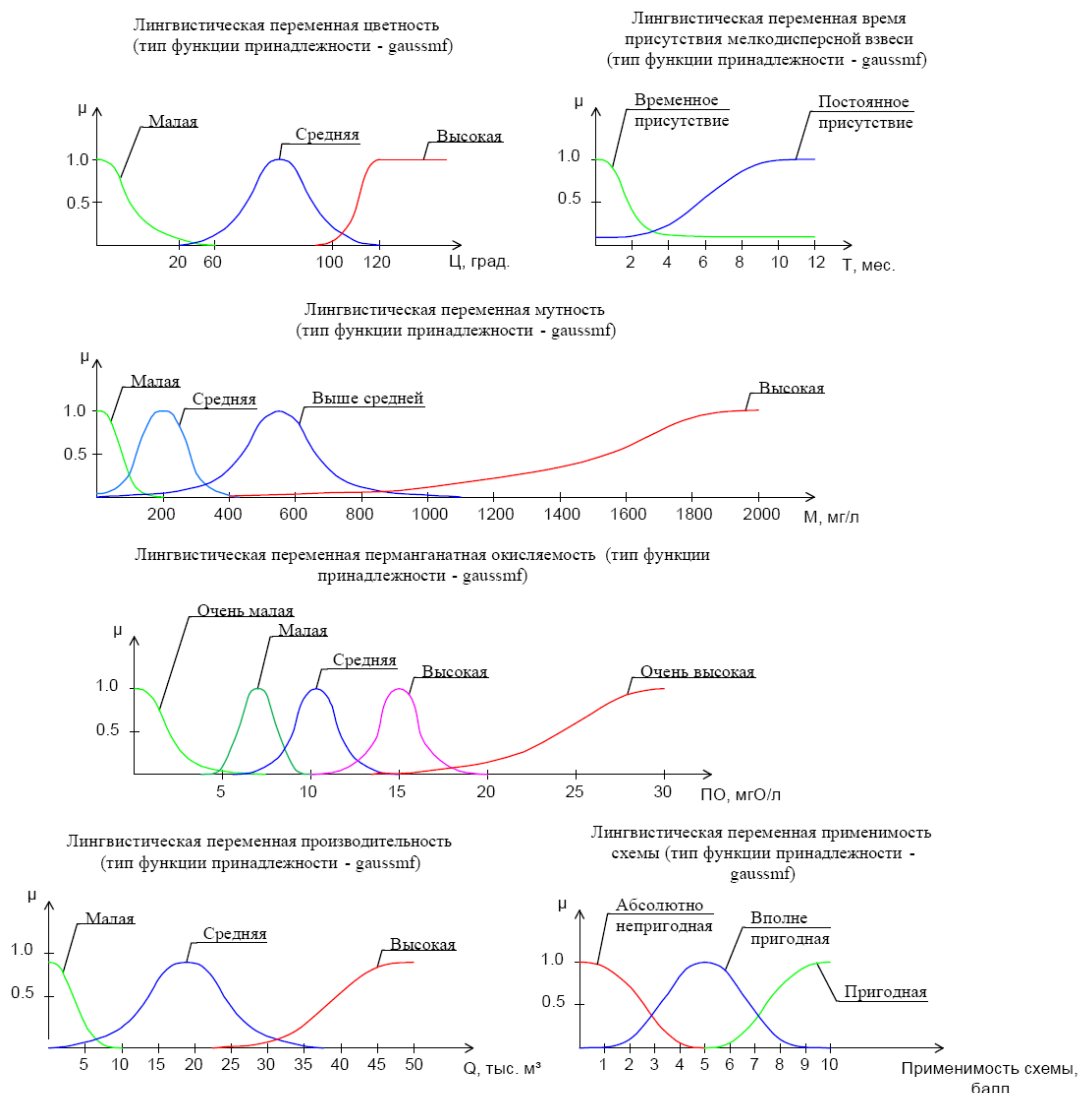


Рисунок 1. Функции принадлежности термов

Ориентируясь в данной работе в основном на методы очистки высокоцветных маломутных северных вод, приведем кратко описание наиболее

известных технологических схем [4] для их очистки с указанием некоторых рекомендуемых показателей качества исходной воды в форме лингвистических переменных (см. таблицу 1). Содержание таблицы 1 представляет собой сокращенную форму базу правил системы нечеткого вывода при выборе технологии очистки питьевой воды.

Таблица 1

Технологическая схема	Мутность, мг/л	Цветность, град	Другие факторы
$ \begin{array}{c} CI \\ \downarrow \\ HCI \rightarrow H\Phi \rightarrow PЧВ \end{array} $	Малая	Малая	Производительность малая
$ \begin{array}{c} HCI \rightarrow KХО \rightarrow C_m \rightarrow \\ \uparrow \quad CI \\ P \quad \downarrow \\ \rightarrow ГО \rightarrow C\Phi \rightarrow PЧВ \end{array} $	Высокая	Высокая	Производительность любая
$ \begin{array}{c} HCI \rightarrow KХО \rightarrow ОВО \rightarrow \\ \uparrow \quad CI \\ P \quad \downarrow \\ \rightarrow C\Phi \rightarrow PЧВ \end{array} $	Высокая	Высокая	Производительность любая
$ \begin{array}{c} P \quad CI \\ \downarrow \quad \downarrow \\ HCI \rightarrow KХО \rightarrow КО \rightarrow PЧВ \end{array} $	Средняя	Высокая	Производительность любая
$ \begin{array}{c} CI \quad P \quad CI \\ \downarrow \downarrow \quad \downarrow \\ HCI \rightarrow \Phi_l \rightarrow C\Phi \rightarrow PЧВ \end{array} $	Средняя	Высокая	Производительность малая
$ \begin{array}{c} HCI \rightarrow KХО \rightarrow РО \rightarrow ГО \rightarrow \\ \uparrow \quad CI \\ P \quad \downarrow \\ \rightarrow C\Phi \rightarrow C\Phi \rightarrow PЧВ \end{array} $	Высокая	Высокая	Производительность малая

$ \begin{array}{ccc} P & O_3, ПАУ & Cl \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ HCl \rightarrow BR \rightarrow C\Phi \rightarrow C\Phi \rightarrow PЧВ \end{array} $	Малая	Высокая	ПО очень высокая, мелкодисперсная взвесь присутствует временно
$ \begin{array}{ccc} P & O_3 & Cl \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ HCl \rightarrow BR \rightarrow C\Phi \rightarrow ГАУ \rightarrow PЧВ \end{array} $	Малая	Высокая	ПО очень высокая, мелкодисперсная взвесь присутствует постоянно
$ \begin{array}{ccc} HCl \rightarrow BR \rightarrow KХО \rightarrow C_m \rightarrow \\ \uparrow & Cl \\ O_3, P & \downarrow \\ \rightarrow PO \rightarrow C\Phi \rightarrow ГАУ \rightarrow PЧВ \end{array} $	Малая	Высокая	ПО очень высокая, мелкодисперсная взвесь присутствует постоянно
$ \begin{array}{ccc} HCl \rightarrow KХО \rightarrow C_m \rightarrow ГО \rightarrow \\ \uparrow & O_3, ПАУ & Cl \\ P & \downarrow & \downarrow \\ \rightarrow C\Phi \rightarrow C\Phi \rightarrow PЧВ \end{array} $	Малая	Высокая	ПО очень высокая, мелкодисперсная взвесь присутствует временно

Примечание: *HCl* - насосная станция 1-го подъема, *KХО* - камера хлопьеобразования, *C_m* - смеситель, *ГО, РО* - горизонтальный и радиальный отстойник соответственно, *CΦ* - скорый фильтр, *HΦ* - 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, *O₃* - озон, *Cl* - хлор.

Процедура 2. Фаззификация входных переменных

Цель этапа фаззификации 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 [3]. До начала этого этапа предполагаются известными конкретные значения для 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 β_i . Далее рассматривается каждое из подусловий вида « β_i есть α' » правил системы нечеткого вывода, где α' - 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 фаззификации подусловия « β_i есть α' ». Этап фаззификации 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

До начала этого этапа предполагаются известными значения истинности всех подусловий системы нечеткого вывода, т.е. множество значений $B = \{b_i'\}$. Далее рассматривается 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 высказывания на основе известных значений истинности подусловий. При этом для определения результата нечетких связей (И, ИЛИ) используются правила нечеткой логики [2]. Тем самым находятся количественные значения истинности всех условий правил системы нечеткого вывода. 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 обозначим через $B'' = \{b_1'', b_2'', \dots, b_n''\}$.

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 [3]. 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 продукции

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. До начала этого этапа предполагаются известными значения истинности всех подзаключений для каждого из правил R_k , входящих в рассматриваемую базу правил P системы нечеткого вывода, в форме совокупности нечетких множеств: C_1, C_2, \dots, C_q , где q - общее количество 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 - общее количество выходных лингвистических переменных в базе правил системы нечеткого вывода.

Процедура 6. Дефаззификация выходных переменных

Дефаззификация 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 дефаззификации

нами использовался метод центра тяжести. При дефаззификации методом центра тяжести значение выходной переменной равно абсциссе центра тяжести площади, ограниченной графиком кривой функции принадлежности, соответствующей выходной переменной.

По результатам исследований нами был 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 градусов, мутность – 30 мг/л, производительность – 5000 м³/сут, перманганатная окисляемость – 10 мг/л, время присутствия мелкодисперсной взвеси – не более 2 месяцев за год. Графическая интерпретация работы разработанного модуля нечеткого управления при анализе технологической схемы №1 представлена на рисунке 2.

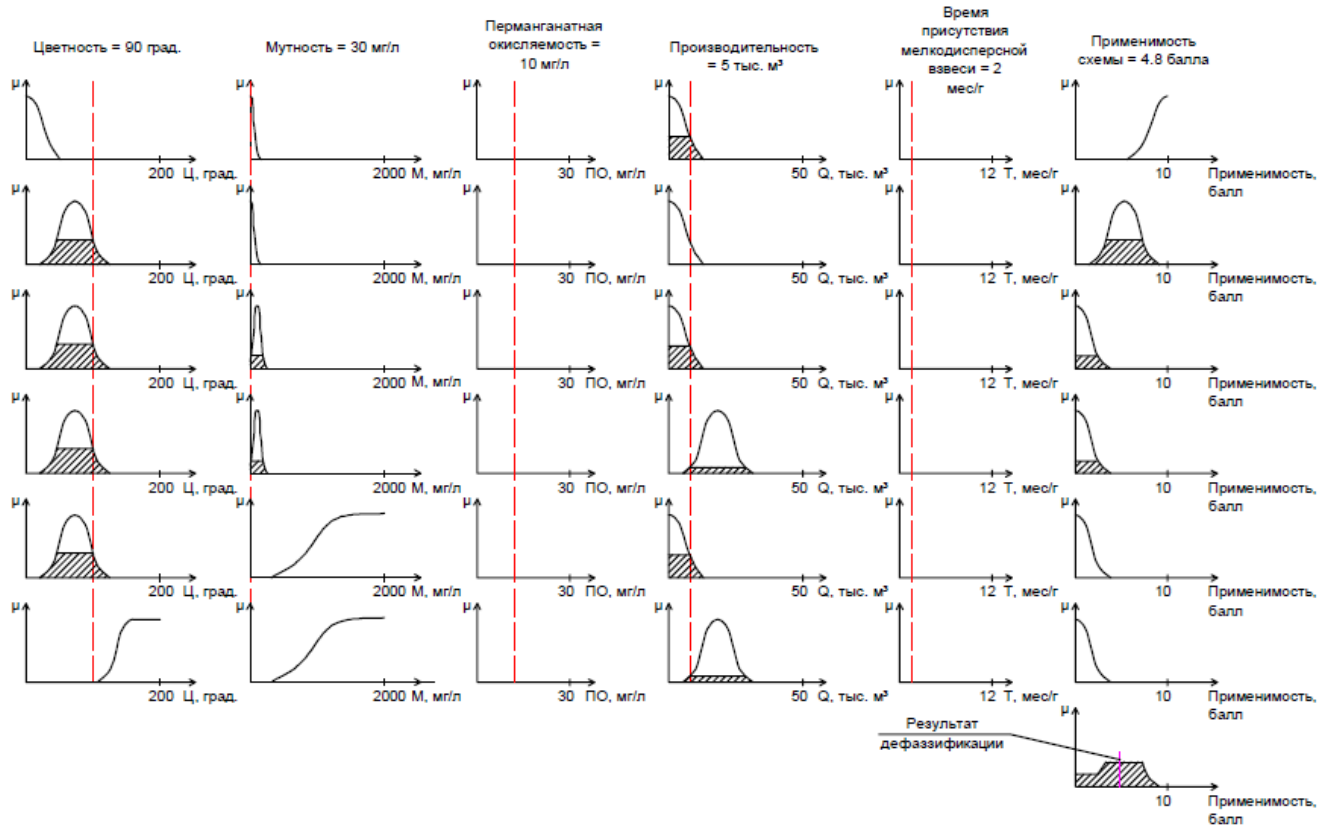


Рисунок 2. Графическая интерпретация оценки применимости технологической схемы №1 модулем нечеткого управления

По результатам работы модуля были получены следующие оценки (в баллах) для описанных в таблице 1 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 водоемисточнике. 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.

Литература

1. **Драгинский, В. Л.** Коагуляция в технологии очистки природных вод / В. Л. Киселев, Л. П. Алексеева, С. В. Гетманцев. – М.: Науч. изд., 2005. – 576 с.
2. **Деменченков, Н.П.** Нечеткое управление в технических системах / Н. П. Деменченков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 200 с.
3. **Леоненков, А. В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
4. **Журба, М. Г.** Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений. Т. 2 / М. Г. Журба, Л. И. Соколов, Ж. М. Говорова. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 496 с.