

УДК 004.896

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

*Д.А. Нечаев, С.П. Орлов*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассматривается задача проектирования технологического оборудования для систем промышленного водоснабжения. Объектами исследования являются водозаборы и системы водоподготовки, обеспечивающие водой технологические процессы множества предприятий и производств, которые расположены в локальном районе региона. Описано использование интеллектуальной системы поддержки принятия решений по технологиям водоподготовки. В результате работы такой системы формируется набор альтернативных технологических схем, которые содержат множество аппаратов различного типа. Сформулирована задача оптимального выбора состава технологического оборудования для полученных технологических схем. Это задача дискретного программирования с булевыми переменными. Ограничения задачи учитывают допуски на значения качества воды, энергопотребление и другие технологические параметры. Приведены примеры использования предлагаемой методики для нескольких промышленных систем водоснабжения.*

**Ключевые слова:** *системы поддержки принятия решений, оптимизация, дискретное программирование, водоснабжение промышленных предприятий, технологии водоподготовки.*

### **Введение**

Развитие промышленного производства связано с увеличением объема потребляемой технологической воды и повышением требований к ее качеству. В таком промышленном регионе, как Самарская область, существует задача рационального использования подземных и поверхностных источников одновременно для промышленного водоснабжения и обеспечения населения водой. Для управления региональной программой водоснабжения была разработана интеллектуальная система поддержки принятия решений по технологиям водоподготовки (ИСППР ТВ) [1, 2, 3]. Эта система на основе данных о параметрах воды в водозаборе и требуемых показателей качества воды для промышленного производства генерирует несколько альтернативных вариантов технологических схем водоподготовки и водоочистки. Полученные решения анализируются с учетом ограничений на ресурсы и существующую номенклатуру оборудования. В работе [4] сформулирована задача выбора технологической схемы для хозяйственно-бытового водоснабжения. В настоящей статье предлагается постановка и решение задачи оптимального выбора оборудования для систем промышленного водоснабжения.

---

*Дмитрий Александрович Нечаев, аспирант.*

*Сергей Павлович Орлов (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Вычислительная техника».*

### Постановка задачи

Интеллектуальная система поддержки принятия решений ИСППР ТВ содержит базы знаний «Поверхностные воды» и «Подземные воды», а также базы данных по оборудованию и готовым технологическим схемам водоподготовки [5, 6]. Для каждой базы знаний создан сценарий логического вывода или база фактов на основе классификатора технологий НИИ ВОДГЕО, г. Москва [7]. Проведено заполнение базы правил в соответствии с синтаксисом правил продукционной модели и сформирован граф логического вывода.

Подсистемы «Поверхностные воды» и «Подземные воды» содержат правила, описывающие:

- классы поверхностных и подземных источников водоснабжения;
- подклассы поверхностных источников по антропогенному загрязнению;
- классификацию основных технологий водоподготовки для промышленных производственных процессов предприятий Самарской области с учетом антропогенных и природных загрязнений;
- технологические схемы и оборудование очистки подземных и поверхностных вод от загрязнений по классам для промышленного водоснабжения;
- классификации примесей в воде Самарского региона.

В статье выполнена постановка задачи оптимального выбора технологического оборудования системы водоснабжения, которая основывается на множестве альтернативных технологических схем, вырабатываемых ИСППР ТВ.

Для системы промышленного водоснабжения с помощью ИСППР ТВ генерируется  $J$  вариантов технологических решений. Технологическая схема  $S_j = (Q_j, V_j)$  представляет собой совокупность  $Q_j$  аппаратов выбранных типов и вектор  $V_j$  показателей качества воды для технологических процессов промышленного производства, который обеспечивается данным вариантом  $S_j$ .

При этом набор используемых типов аппаратов есть  $Q_j = \{q_m\}$ ,  $m \in I_j^{\text{ТА}} \subseteq I_{\text{ТА}}$ , где  $I_{\text{ТА}}$  – индексное множество номеров всех типов аппаратов, рассматриваемых при проектировании данной системы промышленного водоснабжения,  $I_j^{\text{ТА}}$  – индексное подмножество, содержащее номера выбранных типов аппаратов для технологической схемы  $S_j$ .

Тип аппарата  $q_r$  включает набор из  $M_r$  конкретных моделей с векторами параметров  $(d_{r,M_r,1}, \dots, d_{r,M_r,K_{r,M_r}})$ , где  $K_{r,M_r}$  – число параметров модели аппарата. Связь переменных и индексов для технологических схем, аппаратов и их параметров определяется композицией двудольных графов (см. рисунок).

Целевая функция – стоимость проектирования, строительства и эксплуатации системы промышленного водоснабжения:

$$C_P = \min \left\{ \sum_{m \in I_j^{\text{ТА}}} \sum_n (C_{jmn}^D + C_{jmn}^W + C_{jmn}^Э) x_{jmn} + C_j^{\text{П}} + C_j^{\text{H}} \right\}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (1)$$

где булева переменная оптимизации:

$$x_{jmn} = \begin{cases} 1 & \text{— если в } j\text{-й технологической схеме для} \\ & \text{ } m\text{-го аппарата выбрана } n\text{-я модель аппарата;} \\ 0 & \text{— в противном случае,} \end{cases} \quad (2)$$

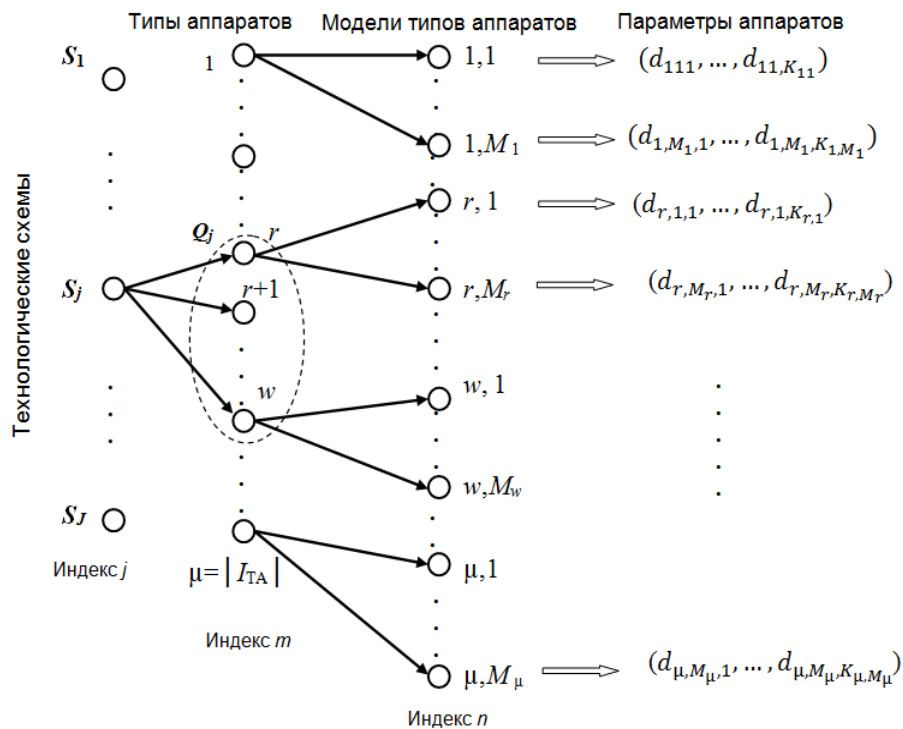
$C_{jmn}^D$  – стоимость  $n$ -й модели оборудования  $m$ -го типа в  $j$ -м варианте;

$C_{jmn}^W$  – удельная стоимость потребляемой оборудованием электроэнергией;

$C_{jmn}^Э$  – удельные эксплуатационные расходы на тип оборудования;

$C_j^П$  – стоимость технологического подключения электрической мощности для технологической схемы  $S_j$ ;

$C_j^Н$  – стоимость отведения земельных участков или производственной площади под систему водоснабжения в  $j$ -м варианте.



Графовая модель структуры данных задачи оптимизации

Ограничения для задачи имеют вид:

$$1. \sum_{n=1}^{M_r} x_{jmn} = 1, \quad m \in I_j^{TA}, \quad j = \overline{1, J} \quad (3)$$

– условие единственности выбора моделей аппаратов для каждого типа оборудования.

$$2. V_j \leq V_j^{\text{доп}}, j = \overline{1, J} \quad (4)$$

– параметры воды на выходе системы  $S_j$  должны отвечать нормам СанПиН либо требованиям технологического процесса выпуска продукции.

$$3. d_{mnk} x_{jmn} \leq d_{mnk}^{\text{доп}}, k = \overline{1, K_{mn}}, \quad \forall m, n \quad (5)$$

– соответствие параметров оборудования заданным границам,  $K_{mn}$  – число параметров  $n$ -й модели оборудования  $m$ -го типа аппарата  $j$ -го варианта системы водоснабжения.

Задача (1) – (2) с ограничениями (3) – (5) относится к классу задач дискретного программирования, и для небольшой размерности решение может быть найдено полным перебором. Для реальной целевой региональной программы характерны значения  $J = 3 - 10$ ,  $|I_{\text{ТА}}| = 10 - 50$ ,  $K_{mn} = 5 - 10$ . В этом случае используется метод ветвей и границ [8].

### Использование методики при проектировании систем водоснабжения

В результате работы ИСППР ТВ формируется технологическая схема, которая показывает, какие используются типы аппаратов водоочистки и в какой последовательности они соединяются. Табл. 1 содержит обозначения типов аппаратов. В табл. 2 приведены примеры оптимизации ряда систем водоснабжения, выполненной совместно с НПО «Фильтр», г. Тольятти.

Таблица 1

Условные обозначения типов аппаратов для очистки воды

Н	Насос-автомат, насосная станция	Аз	Фильтрующая колонна с активированным углем
Мк	Фильтр очистки от механических примесей с картриджем	С	УФ-стерилизатор
Мз	Фильтр очистки от механических примесей с фильтрующей загрузкой	Д	Обратный осмос, деминерализатор с нерегенерируемой смолой
О	Обезжелезиватель безреагентный	Е	Накопительная емкость
У	Умягчитель натриево-катионитовый с регенерацией	Р	Комплекс пропорционального дозирования реагентов
Ак	Фильтр картриджного типа с активированным углем	–	

В табл. 1 обозначены параметры воды в водозаборе: 1 – жесткость, 2 – железо, 3 – марганец, 4 – минерализация.

Для каждого промышленного предприятия была сгенерирована технологическая схема, для которой решалась задача оптимизации выбора конкретных моделей аппаратов из базы данных оборудования. База данных составлена по каталогам фирм – производителей оборудования водоподготовки и водоочистки.

Таблица 2

## Примеры технологических схем промышленного водоснабжения

Объект	Технологическая схема, полученная из ИСППР ТВ	Тип параметра воды				Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Стоимость оборудования		Удельная площадь на 1 м <sup>3</sup> /(чхм <sup>2</sup> )
		1	2	3	4		Тыс. руб.	На 1 м <sup>3</sup> /ч	
Сызранский автоагрегатный завод	Н-МкУС	+	+	+	+	0,8	92,19	115,24	3,8
РСУ-1	Н-МкМзУАкС	+	+	-	-	1,0	198,2	198,2	7,0
ГМ-АвтоВАЗ, цех сварки	Н-МкУР	+	+	-	-	3,0	344,1	114,7	2,0
ЗАО «Роскат»	Н-МкУ	+	+	-	-	5,5	506,1	92,0	1,1
ЖБК «Тольятинский»	Н-МкУ	+	+	-	-	1,5	153,3	102,22	2,0
ООО «Автопластинженнинг»	Н-МкСУАкС	+	+	-	+				4,0
АК «Озна»	Н-МзУР	+	+	-	-	1,9	287,5	151,33	3,2

**Заключение**

Разработанная методика применяется на этапе предварительной оценки стоимости проекта водоснабжения и использует укрупненную технологическую схему. В процессе проектирования уточняются параметры системы водоподготовки и условия достижения заданных показателей качества воды. Это может привести к итерационному процессу уточнения с помощью ИСППР ТВ технологической схемы и новому решению оптимизационной задачи.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Орлов С.П., Мережко А.Г. Информационная система для анализа и моделирования технологической водоподготовки // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – № 1(23). – С. 233-236.
2. Орлов С.П., Нечаев Д.А., Чуваков А.В. Разработка экспертной системы в составе интеллектуальной системы поддержки принятия решений в области водоподготовки и водоочистки природных вод // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 5. – С. 44-52.
3. Нечаев Д.А. Модели принятия решений в управлении региональной программой водоснабжения // Вестник Волжского университета им. Татищева. – 2013. – № 2(21). – С. 4-8.
4. Орлов С.П., Чуваков А.В., Нечаев Д.А. Предпроектный анализ технологических схем при управлении инвестициями в региональной программе водоснабжения // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 3(31). – С. 244-247.
5. Николадзе Г.И., Сомов М.А. Водоснабжение: учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1995. – 688 с.

6. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: Учеб. пособие. Т. 2. – М.: АСВ, 2004. – 496 с.
7. Журба М.Г., Нечаев А.П. Классификаторы технологий очистки природных вод. – М.: ГП НИИ ВОДГЕО, 2000.
8. Сигал И.Х., Иванова А.П. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 240 с.

*Статья поступила в редакцию 28 марта 2014 г.*

## **OPTIMIZATION OF THE TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF INDUSTRIAL WATER SUPPLY SYSTEMS**

***D.A. Nechaev, S.P. Orlov***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The problem of equipment designing for industrial water supply systems is analyzed. Objects of investigation are intakes and water treatment systems, providing water processes for set industries that are located in the area of the region. The use of intelligent decision support system for water treatment technologies is described. As a result of such a system by a set of alternative-processing circuits that contain many different types of devices is formed. The problem of optimal selection of process equipment for the resulting technological schemes is considered. This is the problem of discrete programming with Boolean variables. Constraints of the problem take into account tolerances on values of water quality, energy consumption and other process variables. Examples of the use of the proposed method for several industrial water systems are given.*

***Keywords:*** *decision support systems, optimization, discrete programming, water industry, water treatment technologies.*

---

*Dmitry A. Nechaev, Postgraduate Student.  
Sergey P. Orlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*