

невыполнения ограничения (15) вступает в силу критерий (7). При этом наполнение водохранилища выступает как самостоятельный потребитель воды с определенным приоритетом и соревнуется со всеми другими водопотребителями.

В условиях дефицита водных ресурсов, когда не имеется возможности удовлетворить всех водопользователей в требуемом объеме, управляющее воздействие осуществляется путем снижения требований русловых и внерусловых водопользователей в приоритетной последовательности с учетом выполнения критерия (5)...(9) и условий (10)...(20):

$$\left\{ \begin{array}{l} U_i(t) \geq \{U_i^{\text{сан}}(t), U_{i,\text{min}}^{\text{компл}}(t), U_{i,\text{min}}^{\text{ГЭС}}(t), U_{i,\text{min}}^{\text{рыб}}, U_{i,\text{min}}^{\text{транс}}\}; \\ \rho_i(t) \leq \underline{\rho}_i(t) \leq \bar{\rho}_i(t), i \in R, t = t_0, t_1, \dots, T; \\ V_i(t) \geq \gamma_i \cdot \bar{V}_i, i \in L; \\ U_N(t) \geq \rho_{\text{устье}}^{(t)}, t = t_0, t_1, \dots, T. \end{array} \right. \quad (21)$$

Разработанная имитационная модель функционирования водно-ресурсной системы речного бассейна реализована применительно к среднему течению реки Волги (Куйбышевское, Саратовское и Волгоградское водохранилища).

#### Выводы

Задача функционирования систем (каскада) водохранилищ является многокритериальной задачей принятия решения. Учитывая тот факт, что ведущими

водопользователями являются питьевое, бытовое, промышленное водоснабжение и обводнительные попуски в нижние бьефы гидроузлов, в алгоритме определения режима работ систем водохранилищ прежде всего должны быть учтены с наибольшей детализацией их интересы, включая интересы охраны природных комплексов. По существу, задача определения режимов работы системы водохранилищ сводится к задаче рационального распределения водных ресурсов между отдельными участниками водно-ресурсных систем во времени и в пространстве с учетом ограничений требований приоритетных участников.

1. Воропаев Г. В., Исмаилов Г. Х., Федоров В. М. Проблемы управления водными ресурсами Арало-Каспийского региона. – М.: Наука, 2003. – 427 с.

2. Теория прогнозирования и принятия решений / С. А. Саркисян [и др.]. – М.: Высшая школа, 1977. – 351 с.

Материал поступил в редакцию 07.08.14.

*Исмаилов Габил Худуш оглы, доктор технических наук, профессор*

*E-mail: Ism37@mail.ru,*

*Перминов Алексей Васильевич, кандидат технических наук, доцент*

*Тел. 8 (499) 976-23-68*

УДК 502/504:628.147:628.882:557.4

### С. Н. КАРАМБИРОВ, Л. Б. БЕКИШЕВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»  
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

*Рассмотрены вопросы адаптации генетического алгоритма к задачам комплексной оптимизации систем подачи и распределения воды. Генетический алгоритм сравнивается с методом случайного поиска и линейного программирования.*

*Оптимизация, система подачи и распределения воды, генетический алгоритм, целевая функция, система ограничений, функция принадлежности.*

*There are considered questions of the genetic algorithm adaptation to the problems of complex optimization of water supply and distribution systems. The genetic algorithm is compared with the method of random search and linear programming.*

*Optimization, water supply and distribution system, genetic algorithm, objective function, set of constraints, membership function.*

На практике нередко встречаются задачи выбора параметров сложной системы, доставляющих оптимальное значение целевой функции (показателя эффективности функционирования системы). В качестве целевой функции обычно принимают приведенные или интегральные дисконтированные затраты на строительство и эксплуатацию системы. Такие задачи обычно сводятся к схеме математического программирования (линейного или нелинейного) [1].

Оптимизация системы подачи и распределения воды (СПРВ) осложняется тем, что на участках могут быть уложены лишь трубы стандартного диаметра, а многие требования к системе плохо формализованы. В последнее время появился ряд принципиально новых алгоритмов оптимизации, подсмотренных у самой природы. К ним, в частности, относятся генетические алгоритмы, изложение которых приводится в работах [2–7]. Алгоритмы требуют содержательного наполнения для решения конкретной задачи. При этом сохраняется биологическая терминология в упрощенном виде.

Как правило, структура данных генетического алгоритма состоит из строки оптимизируемых переменных. Термин «строка» в контексте с методом заменяют термином «особь» или «хромосома», а ее элементы называют «генами». В системах подачи и распределения воды такая строка может состоять из диаметров труб, прокладываемых на каждом участке, и параметров водопитателей (характеристик насосов и высот башен). При реконструкции отдельные гены в хромосоме фиксируются. Генетические алгоритмы работают с совокупностью «особей» – популяций, каждая из которых является потенциальным решением задачи. Особи оцениваются мерой их «приспособленности», в задачах оптимизации СПРВ таковой является значение целевой функции.

На первом этапе случайным образом генерируется начальная популяция из особей (диаметров участков). Если после подбора водопитателей и проведения гидравлического расчета напоры отдельных водопитателей окажутся больше предельно допустимых значений по соображениям прочности и практической реализуемости, вариант (особь) выбраковывается как нежизнеспособный. Затем особи подвергаются скрещиванию. Для оптимизации СПРВ хорошо зарекомендовали себя следующие

варианты отбора родительских пар:

особи скрещиваются случайным образом;

выбираются наиболее приспособленные особи (с лучшими значениями целевой функции);

производится скрещивание лучших и худших особей с целью обновления крови.

Для оптимизации СПРВ наилучшим оказался вариант скрещивания, когда случайным образом выбирается число точек разрыва диаметров участков, генерируются соответствующие сегменты, а затем они обмениваются генами (диаметрами).

При оптимизации СПРВ механизм скрещивания имеет отмеченные выше особенности. Не всякая особь-потомок является жизнеспособной (например, напоры водопитателей превышают допустимые значения или подачи выходят за пределы рабочих областей), а следовательно, не всякая пара родителей способна создать полноценное потомство. В этом случае происходит смена родителей. Процесс повторяется до формирования заданного количества потомков. До или после скрещивания отдельные особи с заданной вероятностью (0,03...0,07) могут подвергаться мутации. Применительно к СПРВ эта операция сводится к случайному изменению одного стандартного диаметра на другой. После размножения популяция содержит число особей больше первоначального. Для приведения ее к исходному размеру служит операция отбора. При оптимизации СПРВ хорошо зарекомендовал себя следующий вариант алгоритма. Особи сортируются в порядке возрастания их приспособленности (целевой функции). Первые особи считаются «элитой» и переходят в новую популяцию, а остальные отбрасываются. После отбора к новой популяции опять применяются операции скрещивания и мутации, затем снова происходит отбор и т. д. Принятая в расчете разновидность генетического алгоритма приведена на рис. 1 [2].



Рис. 1. Принятая схема генетического алгоритма

Практические задачи оптимизации СПРВ, как правило, мультимодальны и многомерны. Для них не существует универсальных методов эффективного поиска оптимальных решений. Комбинируя переборный и градиентный методы, можно получить решение, достаточно быстро приближающееся к оптимальному. Генетический алгоритм представляет собой именно такой комбинированный метод. Процедуры скрещивания и мутации в некотором смысле реализуют метод перебора, а отбор лучших решений – градиентный спуск. На рис. 2 (получен сравнением алгоритмов [2]) видно, что такое сочетание обеспечивает хорошую эффективность генетического алгоритма, т. е. нахождение для любых типов оптимизационных задач, в частности СПРВ, за разумное время значения, достаточно близкого к максимально возможному (глобальный оптимум). Выбирая приемлемое время расчета, мы получим одно из наилучших решений, которое вообще возможно получить за это время.

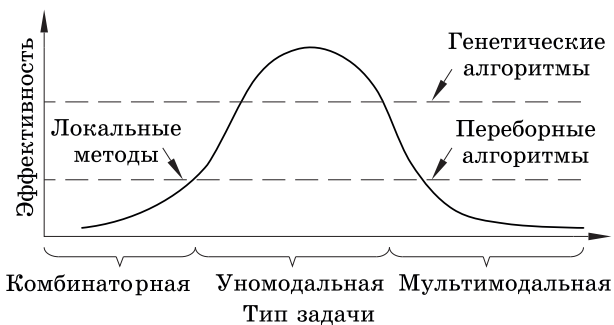


Рис. 2. Эффективность генетических алгоритмов

Для возможности сравнения целевая функция и ограничения приводятся к безразмерному виду. Авторами использован метод, когда сначала намечаются наиболее «предпочтительные» для данной задачи значения и степени ухудшения решения при отклонениях от этих величин.

Для экономического показателя – интегральных дисконтированных затрат на строительство и эксплуатацию системы –

$$z = \sum_{t=0}^{T_p} \left( \frac{K_t}{(1+E)^t} + \frac{C_t}{(1+E)^t} \right),$$

где  $K_t$  – капиталовложения на  $t$ -м интервале времени;  $C_t$  – текущие затраты на  $t$ -м интервале, за исключением капиталовложений;  $E$  – норма дисконта

(требуемая инвестором норма доходности на единицу авансированного капитала);  $T_p$  – продолжительность расчетного периода (величина интервала расчетного периода принята равной одному году).

Подобная функция может иметь следующий вид:

$$\mu(z) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda(z/z_d-1)}, & z < z_d; \\ 0, & z \geq z_d, \end{cases} \quad (1)$$

где  $z_d$  – достигнутое в начальном приближении значение экономического фактора; параметр  $\lambda = 10 \dots 12$  контролирует крутизну функции (график этой функции приведен на рис. 3).

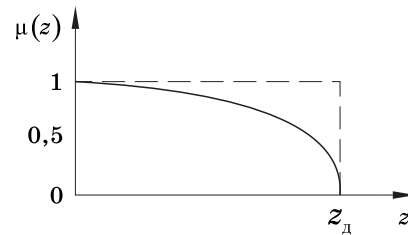


Рис. 3. Функция принадлежности экономического функционала

Таким образом, задача на минимум превращается в задачу на максимум. Затем решается задача приближения расчетных переменных к требуемым (оптимальным). Оптимизация основывается на первом приближении – традиционном гидравлическом расчете, при котором выбранные характеристики системы попадают в допустимую область.

Далее стандартные диаметры участков и параметры водопитателей меняются генетическим алгоритмом так, чтобы соответствовать необходимым требованиям и условиям: минимизации интегральных дисконтированных затрат; обеспечению напоров в узлах не ниже требуемых, а у водопитателей не выше допустимых; попаданию подач насосных агрегатов в рабочую область. Возможно введение дополнительных условий [5]. При этом на каждом этапе решается задача синтеза трубопроводной системы, возможно с регулированием характеристик насосов.

После проведения гидравлического расчета некоторые решения отбрасываются как недопустимые. Кроме того, на конечной стадии расчета целесообразно рассматривать не единственное оптимальное решение, а множество близких по значениям целевой функции «неразличимых решений», из которых затем выбирается наиболее предпочтительное [6]. В результате получается решение, достаточно близкое к требуемому.

Рассмотрим работу генетического

алгоритма на примере сети, представленной на рис. 4. В узле 1 находится насосная станция, а в узле 17 – башня.

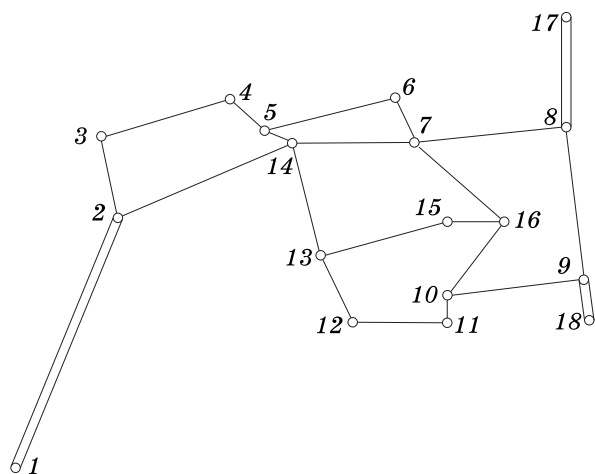


Рис. 4. План сети

На рисунке 5 изображен ход процесса оптимизации этой сети генетическим алгоритмом. Целевая функция для интегральных дисконтированных затрат для часа максимального водопотребления после 1000 реализаций составила 0,517 ( $z/z_d = 0,927$ , экономия – 7,3 %) и не менялась при увеличении итераций. Для сравнения: на рис. 6 представлен ход оптимизации той же сети методом случайного поиска. После 3000 итераций целевая функция составила лишь 0,309 ( $z/z_d = 0,964$ , экономия – 3,6 %).

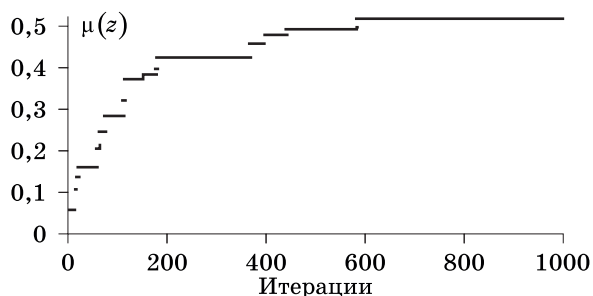


Рис. 5. Изменение целевой функции  $\mu(z)$  в ходе работы генетического алгоритма

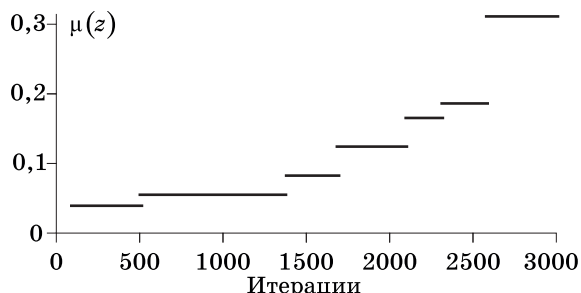


Рис. 6. Изменение целевой функции  $\mu(z)$  в ходе случайного поиска

Сравним приведенные расчеты с оптимизацией системы подачи и распределения воды известным методом линейного программирования, где каждый участок рассматривается как телескопический, состоящий из нескольких линий с заданными стандартными диаметрами. Целью расчета является определение оптимальных длин линий и напоров водопитателей. По этим данным выбираются окончательные диаметры участков и подбираются фактические водопитатели. Для кольцевых сетей расчет производится итерационно до установления решения.

Расчет нашей сети методом линейного программирования (минимизации  $z/z_d$ ) приведен на рисунке 7. Здесь оптимизация осуществлена при заданном потоко-распределении, что для кольцевых сетей означает проведение расчетов до совпадения диаметров на двух последних итерациях (на рисунке их две).

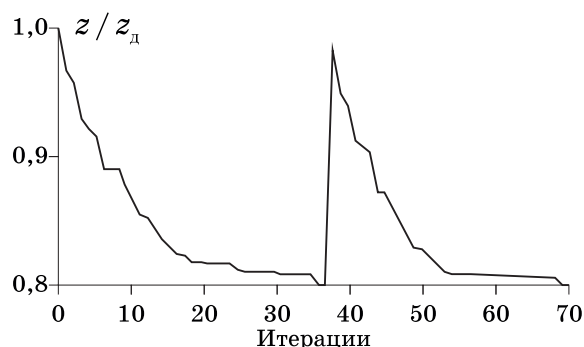


Рис. 7. Оптимизация системы подачи и распределения воды ( $z/z_d$ ) методом линейного программирования

Может показаться, что полученное значение  $z/z_d = 0,8$  существенно лучше достигнутого другими методами. Однако на одном участке в оптимальном решении может остаться несколько подучастков, что конструктивно неудобно. По этой причине диаметр подучастка максимальной длины распространяется на весь участок [9]. После приведения участков к одному диаметру и подбора водопитателей фактическое отношение составило  $z/z_d = 0,98$  (экономия 2 %).

В генетическом алгоритме и случайном поиске параметры системы подбираются на каждом шаге оптимизации, работа осуществляется непосредственно с фактическими значениями затрат. Сравнение параметров системы, полученных разными методами, приведено в таблице.



Сравнение методов оптимизации

Участок	L, м	Начальное приближение	Условный проход, мм		
			Метод		
			Генетический алгоритм	Линейное программирование	Случайный поиск
1-2	1000	200	150	200	150
1-2	1000	200	150	200	150
2-14	598	200	200	200	200
2-3	250	100	100	100	125
3-4	497	100	100	100	125
4-5	280	100	100	100	100
14-5	250	100	100	100	100
5-6	483	100	100	100	125
6-7	302	100	100	100	100
14-7	501	100	100	100	125
14-13	300	125	150	150	125
13-15	307	100	125	100	100
15-16	502	100	100	100	100
7-16	403	100	100	150	125
13-12	304	100	100	100	150
12-11	351	100	100	100	150
10-11	211	100	100	100	100
16-10	275	100	100	125	100
10-9	503	100	100	100	100
8-9	550	100	125	125	125
8-7	453	100	100	100	100
17-8	400	150	125	100	125
17-8	400	150	125	100	125
9-18	150	100	100	100	100
9-18	150	100	100	100	100
$(z/z_d)_{расчетное}$			0,927	0,98	0,964

При выборе окончательного варианта следует учитывать другие требования, предъявляемые к системе. В частности, речь может идти о надежности подачи воды потребителям, об оптимизации системы на несколько режимов работы с учетом регулирования, об учете других требований, формулируемых в виде пожеланий. Следует отметить, что методы, использующие вероятностные подходы, в частности генетические алгоритмы, при решении подобных задач имеют преимущество.

**Выводы**

При синтезе систем подачи и распределения воды хорошие результаты показали методы, сочетающие детерминированные и стохастические подходы, в частности генетический алгоритм.

Особенностью метода генетического алгоритма является полный синтез системы на каждом шаге оптимизации, не требующий дальнейшей корректировки решения, как в большинстве существующих методов.

Процесс оптимизации позволяет учитывать многорежимность функциони-

рования системы подачи и распределения воды и процесс управления насосными агрегатами для обеспечения требуемых напоров у потребителей и обеспечения заданной надежности работы системы.

1. Карамбиров С. Н. Математическое моделирование систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неопределенности: монография. – М.: МГУП, 2004. – 197 с.

2. Дьяконов В. П., Круглов В. В. MATLAB+Simulink. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. – М.: СОЛОН\_ПРЕСС, 2006. – 456 с.

3. Карамбиров С. Н., Манукьян Д. А. Генетический алгоритм в сложных задачах оптимизации водохозяйственных систем: доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2006. – № 6. – С. 62–65.

4. Карамбиров С. Н. Использование генетического алгоритма в нетрадиционных задачах теории подачи и распределения воды // Водное хозяйство России. – 2006. – № 3. – С. 65–73.

5. Карамбиров С. Н., Курганов А. М.,

Трикозюк С. А. Решение задач подачи и распределения воды в водопроводных сетях при нечетких исходных данных // Вестник гражданских инженеров: научно-технический журнал. – 2007. – № 1(10). – С. 68–71.

6. Карамбиров С. Н., Трикозюк С. А. Реализация генетического алгоритма для оптимизации водохозяйственных систем // Природообустройство: научно-практический журнал. – 2009. – № 5. – С. 69–74.

7. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В. В. Корнеев [и др.] – М.: Изд-во Нолидж, 2001. – 496 с.

8. Сумароков С. В. Математическое моделирование систем водоснабжения. – Новосибирск: Наука, 1983. – 167 с.

9. Кикачейшвили Г. Е. Расчет оптимальных параметров систем подачи и распределения воды. – Тбилиси: Сабчота Сапартвело, 1980. – 199 с.

Материал поступил в редакцию 11.04.14.

*Карамбиров Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Вычислительная техника и прикладная математика»*

*Тел. 8 (499) 153-97-66, 8 (499) 152-49-60*

*Бекишева Лаура Борисовна, аспирантка*

*Тел. 8-909-948-51-73*

УДК 502.656

**В. Н. МАРКИН**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»  
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

## РАНЖИРОВАНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ БАССЕЙНА РЕКИ ИРТЫШ

*Рассмотрены вопросы использования метода ранжирования данных о загрязненности водных объектов для определения набора водоохраных мероприятий, позволяющих достичь требуемого класса качества воды.*

*Ранжирование, качество воды, водоохраные мероприятия.*

*There are considered the the questions of a data ranging method on water bodies pollution aiming at choosing a package of water protection measures allowing achieving the required class of water quality.*

*Ranging, water quality, water protection measures.*

Ранжирование – сортировка характеристик объекта по схожести на основе задаваемого признака. Ранжирование загрязненности водных объектов позволяет районировать их при проведении водоохраных мероприятий.

Загрязненность водных объектов удобно отражать с помощью комплексных показателей качества воды (задаваемый признак), например коэффициента предельной загрязненности  $K_{пз}$  [1]. Физический смысл  $K_{пз}$  – усредненная кратность превышения нормативов качества воды:

$$K_{пз} = \frac{1}{N} \cdot \sum_i^T \frac{C_i - ПДК_i}{ПДК_i - C_{pi}}, \quad (1)$$

где  $i$  – номер загрязняющего воду вещества;  $C_i$ ,  $ПДК_i$ ,  $C_{pi}$  – соответственно фактическая, предельно допустимая и фоновая концентрация  $i$ -го вещества.

Если загруженность речного фона не превышает 10 ( $C_{pi}/ПДК_i \leq 10$ ), что хорошо соответствует естественным условиям, то вместо формулы (1) можно использовать выражение (2):

$$K_{пз} = \frac{1}{N} \cdot \sum_i^N \frac{C_i}{ПДК_i} - 11. \quad (2)$$

В данном виде теоретически полученное выражение коэффициента предельной загрязненности воды соответствует широко применяемому на практике индексу загрязнения воды (ИЗВ). Это дает возможность оценить качество речной воды на основе действующей классификации, разработанной для ИЗВ. Кроме того, не требуется получение исходной информации о естественном гидрохимическом фоне, а ошибка расчетов