

УДК 631.6.01.77

**В. Н. Щедрин, С. М. Васильев, А. А. Чураев**

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,  
Российская Федерация

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ПРИБОРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ АГРОМЕТЕОПАРАМЕТРОВ КАК ЭТАП РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕЦИЗИОННОГО ОРОШЕНИЯ**

Целью работы является разработка научно обоснованного подхода к созданию прикладных программ по выбору оптимального состава приборов для оснащения агрометеорологических комплексов, применяемых в системах прецизионного земледелия при орошении дождеванием. Определен порядок расчета оптимального состава программируемого приборного обеспечения для выполнения основных функций агрометеокомплекса с учетом технологических и экономических критериев и ограничений. В процессе исследований был разработан алгоритм решения задачи оптимизации в соответствии с принципом оптимальности Беллмана, использующего условные экстремумы целевой функции. Алгоритм включает в себя четыре шага конфигурации: ввод данных по составу приборного обеспечения и выполняемым функциям, структурирование, расчет функций качества и ограничений, выбор перспективного состава приборов. В соответствии с разработанным алгоритмом приведен пример моделирования оптимального количества приборов для оснащения агрометеостанции, включающий этапы решения матрицы взаимосвязей ее функций с вариантами набора приборов. Количество приборов (комплектов приборов) для расчета – 5, единиц с набором функций всего комплекса – 7, в число которых входят: определение температуры, влажности и давления воздуха; направления и скорости ветра; испаряемости; осадков; интенсивности солнечной радиации; температуры и влажности почвы; уровня грунтовых вод. В результате исследований выработан математический инструментарий, позволяющий в настоящее время на современном уровне оптимизировать состав различного технологического оборудования с целью внедрения инновационных технологий на основе многофакторного анализа, который может использоваться для создания унифицированных программных средств в данном направлении, в том числе и для оснащения агрометеокомплексов, применяемых в системах прецизионного орошения.

Ключевые слова: агрометеокомплекс, приборное обеспечение, прецизионное земледелие, орошение, дождевание, математическое моделирование.

**V. N. Shchedrin, S. M. Vasilyev, A. A. Churayev**

Russian Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,  
Russian Federation

## **OPTIMIZATION OF INSTRUMENTATION STRUCTURE OF AGRIMETEOROLOGICAL PARAMETERS CONTROL AS A STAGE OF PRECISION IRRIGATION PROCESS DEVELOPMENT**

The aim of this paper is to develop a scientific approach to the creation of application programs for the selection of optimal composition of instruments to equip the agrometeorological complexes used in precision farming systems in sprinkler irrigation. The procedure for calculating the optimal composition of programmable instrumentation to perform the basic functions of agrometeorological complex taking into account technological and eco-

conomic criteria and restrictions has been determined. In the process of research an algorithm for solving the optimization problem in accordance with Bellman's optimality principle using conditional extremum of the objective function has been developed. The algorithm includes four configuration steps: entering data on the composition of the instrumentation and the functions they perform, structuring, design of quality functions and constraints, the choice of perspective instruments components. In accordance with the developed algorithm an example of modeling the optimal number of instruments for agrometeorostation equipment, comprising the steps of matrix computation of relationships of its functions with the options of set of devices is given. The number of devices (sets) for design is 5, units with a set of functions of the whole complex is 7, which include: determining the temperature, humidity and air pressure; wind direction and speed; volatility; precipitation; intensity of solar radiation; temperature and soil moisture; groundwater level. As a result of research a mathematical instrumentation allowing to optimize the configuration of various technological equipment in real time at the contemporary level to introduce innovative technologies on the basis of multivariate analysis that can be used to create a standardized software in this direction, such as to equip agrometeorocomplexes used in precision irrigation systems.

Keywords: agrometeorocomplex, instrumentation, precision agriculture, irrigation, sprinkler irrigation, mathematical modeling.

**Введение.** В настоящее время наукоемкий уровень организации аграрного производства на орошаемых землях предполагает использование в оперативном режиме большого объема самой разнообразной информации. Состав и структура предоставляемых данных должны соответствовать принципам точного земледелия на орошаемых землях. Только такой подход поможет на высоком уровне реализовать растущие потребности в отечественной сельскохозяйственной продукции, сохраняя и восполняя существующий производственный потенциал орошаемых земель.

Точное земледелие на орошаемых землях включает в себя целый комплекс технологических мероприятий, ведущим из которых является технология прецизионного орошения.

К основным контролируемым метеопараметрам при возделывании сельскохозяйственных культур относят: температуру, влажность и давление воздуха; направление и скорость ветра; испаряемость; осадки; интенсивность солнечной радиации; температуру и влажность почвы; уровень грунтовых вод. С развитием точного земледелия в нашей стране для обеспечения оптимального управления продуктивностью сельскохозяйственного растениеводства возникла необходимость в отслеживании динамиче-

ских изменений в условиях variability среды обитания и состояния растений, в зависимости от различных агрофизических, агрохимических, фитосанитарных и других показателей на участке поля. В этой связи актуализируется применение современных методов и дополнительных средств контроля параметров в полевых условиях. Для наблюдения за процессами, происходящими в комплексе почва – растение – атмосфера, следует измерять и регистрировать параметры приземного слоя воздуха, теплообмена в почве и параметры, характеризующие состояние растений [1].

В настоящее время из известных методов измерения метеорологических параметров в сельском хозяйстве можно выделить два вида: контактные и бесконтактные (дистанционные методы).

Перспективными с практической точки зрения являются методы, основанные на принципах сенсорных технологий и дистанционных средств мониторинга, обеспечивающих снижение затрат на проведение анализа, повышение производительности и скорость обработки информации. Использование датчиков позволяет получать данные с гораздо меньшими временными и материальными затратами, чем при применении традиционных методов, когда отбираемые образцы почвы и растений анализируются в лабораторных условиях.

Основное значение данных дистанционного зондирования заключается в том, что только на их основе возможно одномоментное и оперативное получение информации, необходимой для оценки ландшафта. Существенными недостатками космических снимков являются их высокая стоимость, незначительная масштабность и разрешение, а также то, что получение космических снимков интересующей территории на конкретную дату ограничено погодными условиями.

К современным средствам контроля метеопараметров в сельском хозяйстве можно отнести мобильные приборы, агрометеокомплексы и метеостанции, укомплектованные датчиками, регистрирующими необходимые

агрометеорологические параметры, а также средства мониторинга метеопараметров окружающей среды, использующие ЭВМ и GPS.

В процессе реализации эксплуатационных режимов орошения оперативное управление поливами (их корректировка с учетом изменяющихся погодных, агротехнических и других условий) во многом зависит от быстрого сбора и обработки необходимой информации при помощи соответствующих современных средств контроля метеопараметров. В связи с этим целью работы является разработка научно обоснованного подхода к созданию прикладных программ по выбору оптимального состава приборов для оснащения агрометеорологических комплексов, используемых в системах прецизионного земледелия при орошении дождеванием.

Внедрение современных инновационных технологий при осуществлении контроля агрометеопараметров на орошаемом участке представляет собой комплекс мероприятий по приобретению, развертыванию, освоению, организации эксплуатации сложной техники, соответствующий условиям жесткой конкуренции по значительному количеству критериев, которые невозможно учесть без применения математических методов оптимизации и программных средств.

**Материалы и методы.** При реализации поставленной цели использовался метод ветвей и границ. Данный метод содержит общий алгоритмический подход для нахождения оптимальных решений различных задач дискретной и комбинаторной оптимизации. Он является вариацией полного перебора с отсевом подмножеств допустимых решений, заведомо не содержащих оптимальных, и применяется для решения задач целочисленного программирования. Цель метода состоит в поиске экстремума функции  $f(x)$  в множестве допустимых значений переменной  $x$ . Функция  $f(x)$  и переменная  $x$  могут быть произвольной природы. Для метода ветвей и границ необходимы две процедуры: ветвление и нахождение оценок (границ) [2–6].

Процедура ветвления заключается в разбиении множества допусти-

мых значений переменной  $x$  на подобласти (подмножества) меньших размеров. Процедуру можно рекурсивно применять к подобластям. Полученные подобласти образуют дерево, называемое деревом поиска или деревом ветвей и границ. Узлами этого дерева являются построенные подобласти (подмножества множества значений переменной  $x$ ). Процедура нахождения оценок состоит в поиске верхних и нижних границ для решения задачи на подобласти допустимых значений переменной  $x$ .

В основе метода ветвей и границ лежит следующая идея: если нижняя граница значений функции на подобласти  $A$  дерева поиска больше, чем верхняя граница на какой-либо ранее просмотренной подобласти  $B$ , то  $A$  может быть исключена из дальнейшего рассмотрения (правило отсева). Обычно минимальную из полученных верхних оценок записывают в глобальную переменную  $m$ ; любой узел дерева поиска, нижняя граница которого больше значения  $m$ , может быть исключен из дальнейшего рассмотрения [7–9].

Если нижняя граница для узла дерева совпадает с верхней границей, то это значение является минимумом функции и достигается на соответствующей подобласти.

### **Постановка задачи.**

Особенностью выбора оборудования является наличие большого количества факторов, влияющих на оптимальное решение. Исходные данные разработанного программного комплекса включают структуру инновационного технологического процесса, параметры производства, технологическое оборудование, требования к его установке и эксплуатации, финансовые ограничения. Причем каждый из перечисленных факторов в зависимости от особенностей производства может быть переведен либо в критерии, либо в ограничения. Отсюда следует, что программный комплекс должен обеспечивать оптимизацию в условиях нечеткого определения области поиска и неопределенности целевой функции. Поэтому вначале необходимо

установить метод оптимизации, наиболее подходящий для класса решаемых задач. Затем разработать универсальные средства приведения исходных данных к соответствию требованиям выбранного метода [10–16].

Агрометеокомплекс в системе прецизионного орошения должен обладать набором следующих операций: определение температуры, влажности и давления воздуха; направления и скорости ветра; испаряемости; осадков; интенсивности солнечной радиации; температуры и влажности почвы; уровня грунтовых вод. Одной из особенностей комплекса является вариантность, которая заключается в возможности получения одного и того же результата различными способами обработки поступающих данных. Эта особенность приводит к большему разнообразию оборудования и приборов, пригодных для реализации каждой операции или контроля соответствующего параметра.

Допустим, агрометеокомплекс должен выполнять  $m$  операций. Каждый прибор или комплект приборов, который может использоваться для выполнения  $i$ -ой операции, имеет свои технико-экономические параметры  $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$  ( $i = 1, \dots, n$ ), где  $n$  – количество параметров в унифицированной модели реализации  $m$  операций прибором (комплект приборов). Каждый параметр (набор параметров) может быть принят в качестве критерия (критериев) оптимальности и ограничений.

Обозначим целевую функцию (функцию качества)  $i$ -ой операции  $f(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ . Для каждой  $i$ -ой операции ( $i = 1, \dots, m$ ) необходимо найти такой состав приборов, чтобы обеспечить минимум либо максимум значения аддитивной функции качества по всем операциям технологического процесса (ТП) работы агрометеокомплекса. Функцию качества ТП можно записать как:

$$F(\bar{X}) = \sum_{i=1}^m f(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \rightarrow ext, \quad (1)$$

где  $ext$  – минимум либо максимум значения функции в зависимости

от того, что является лучшим;

$\bar{X}=(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{mn})$  – вектор параметров приборного обеспечения агрометеокомплекса.

В задачах оптимизации на технико-экономические параметры могут накладываться ограничения [2]. Их значения выбраны из области  $D: (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \in D (D=D_0 \times D_1 \times \dots \times D_n)$ . Область  $D$  зависит от технико-экономических требований и формируется совокупностью ограничений типа равенств  $(x_i = x_{i0})$ , неравенств  $(x_{imin} \leq x_i \leq x_{imax})$ , дискретности  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{mi})$ , функциональной связи  $(g_j(\bar{X}) \leq 0)$ .

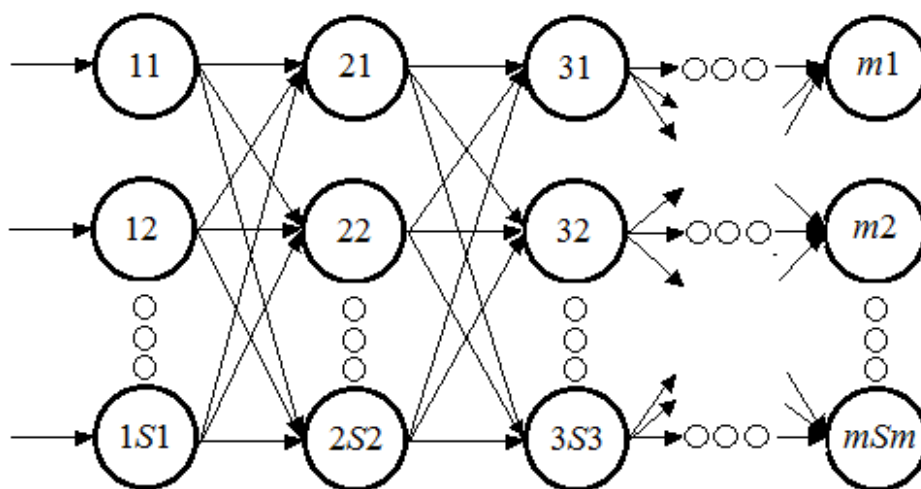
Согласно принципу оптимальности Беллмана [3, 12–16], условные минимумы (максимумы) целевой функции (1) можно определить по следующей формуле:

$$F_i = \min_{\substack{(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \in D \\ i=1, 2, \dots, m}} \{f(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) + F_{i+1}\} \quad (2)$$

или

$$F_i = \max_{\substack{(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \in D \\ i=1, 2, \dots, m}} \{f(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) + F_{i+1}\}. \quad (3)$$

Математическую модель задачи можно представить в виде направленного дерева ветвей (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Дерево ветвей (вариантов) подбора оптимального состава программируемого прибора (комплекта приборов) для оснащения агрометеокомплекса**

Узлами дерева ветвей являются варианты выбора прибора (комплекта приборов) для реализации одной операции. Задача выбора оптимального варианта оснащения агрометеокомплекса – это задача нахождения направления на дереве ветвей, способного обеспечить минимум или максимум функции.

**Результаты и обсуждение.** В результате анализа факторов, влияющих на урожайность на орошаемом участке, установлено, что наряду с выдчей поливной нормы дождевальная машина следует использовать мобильный агрометеокомплекс, измеряющий в режиме реального времени  $m$  параметров (влажность, скорость и направление ветра и др.), т. е. система обработки информации должна выполнять необходимый набор функций, полный набор которых математически можно представить следующим образом:  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ . При этом необходимо учитывать специфику работы агрометеокомплекса в условиях работы дождевальной машины, вектор параметров приборного обеспечения агрометеокомплекса должен по (1) обладать максимальными либо минимальными значениями ( $f \neq 0$ ).

На рынке приборных и программных средств представлено множество приборов (комплектов приборов)  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ , каждый из которых предназначен для выполнения определенного подмножества функций множества  $F$ . Взаимосвязь приборов (комплектов приборов) и выполняемых ими функций из множества  $F$  задается матрицей  $A$ :

$$A = |a_{s_i f_j}| = |a_{ij}|, \quad (4)$$

где  $a_{ij} = 1$ , если функция  $f_j$  выполняется  $s_i$ -м прибором (комплексом приборов) и  $a_{ij} = 0$ , если не выполняется ( $j = \overline{1, n}$ ;  $i = \overline{1, m}$ ).

Пример: С учетом стоимости ( $c_i$ ) прибора (комплекта приборов) методом ветвей и границ ( $s_i$ ) необходимо определить такой прибор (или вариант комплекта приборов), который бы имел минимальную стоимость, и



каждая функция  $f_j$  была представлена как минимум один раз в искомом варианте для следующих исходных данных: количество пакетов ( $n = 5$ ), количество функций ( $m = 7$ ), стоимость приборов или комплектов приборов ( $C = 210, 305, 115, 400, 270$ , в усл. ед.).

Матрицу взаимосвязи функций и приборов задаем в следующем виде:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} \quad (5)$$

Алгоритм решения данной задачи включает в себя четыре этапа-шага конфигурации: ввод данных по составу приборного обеспечения и выполняемым функциям, структурирование, расчет функций качества и ограничений, выбор перспективного состава приборов.

Этап 1 – ввод данных по составу приборного обеспечения и выполняемым функциям.

Конструируется множество  $G_0$  – множество всех вариантов решений. Для нахождения нижней оценки  $\xi(G_0)$  формируется таблица 1, в которой для каждой функции вычислен коэффициент покрытия  $a_j$ , а также произведено их упорядочение в порядке возрастания  $p$ .

В таблице 1:  $f_1$  – параметр «скорость ветра»;  $f_2$  – параметр «фотосинтетически активная радиация (ФАР)»;  $f_3$  – параметр «влажность почвы в слое 5–20 см»;  $f_4$  – параметр «влажность почвы в слое 20–40 см»;  $f_5$  – параметр «влажность воздуха»;  $f_6$  – параметр «рН»;  $f_7$  – параметр «испаряемость».

Для каждой функции вычисляется цена покрытия  $v_{ji}$ .

Для  $p = 1$ ,  $j_p = j_1 = 1$ ,  $f_{j_1} = f_1 = \{1, 5\}$ :

$$v_{j_1} = \min\{c_1, c_5\} = \min\{210, 270\} = 210 \text{ усл. ед.} \quad (6)$$

**Таблица 1 – Исходная матрица взаимосвязи функций и приборов**

Прибор (комплект приборов) $S$	Функция $F$							Стоимость, $c_i$ , усл. ед.
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	
$s_1$	1	1	1	0	1	0	0	210
$s_2$	1	1	1	1	0	1	1	305
$s_3$	0	0	0	1	0	1	1	115
$s_4$	0	1	1	0	1	1	1	400
$s_5$	1	0	0	0	1	0	0	270
$a_j$	3	3	3	2	3	3	3	-
$p$	1	3	4	2	5	6	7	-
$v_j$	210	0	0	115	0	0	0	-

Аналогично определяется цена покрытия  $v_{jp}$  для остальных функций:

$$-p = 2, j_p = j_2 = 2, f_{j_2} = f_4 = \{2, 3\}:$$

$$\begin{aligned} v_{j_2} = v_4 &= \min\{c_2 - v_{j_1}a_{2j_1}; c_3 - v_{j_1}a_{3j_1}\} = \\ &= \min\{305 - 210 \cdot 0; 115 - 210 \cdot 0\} = 115 \text{ усл. ед.}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$-p = 3, j_p = j_3 = 3, f_{j_3} = f_2 = \{1, 2, 4\}:$$

$$\begin{aligned} v_{j_3} = v_2 &= \min\{c_1 - v_{j_1}a_{1j_1} - v_{j_2}a_{1j_2}; c_2 - v_{j_1}a_{2j_1} - v_{j_2}a_{2j_2}; c_4 - v_{j_1}a_{4j_1} - v_{j_2}a_{4j_2}\} = \\ &= \min\{210 - 210 - 115 \cdot 0; 305 - 210 \cdot 0 - 115; 400 - 210 \cdot 0 - 115 \cdot 0\} = \\ &= \{0; 190; 400\} = 0; \end{aligned} \quad (8)$$

$$-p = 4, j_p = j_4 = 3, f_{j_4} = f_3 = \{1, 2, 4\}:$$

$$\begin{aligned} v_{j_4} = v_3 &= \min\{c_1 - v_{j_1}a_{1j_1} - v_{j_2}a_{1j_2}; c_2 - v_{j_1}a_{2j_1} - v_{j_2}a_{2j_2}; c_4 - v_{j_2}a_{4j_1} - v_{j_3}a_{4j_3}\} = \\ &= \min\{210 - 210 - 115 \cdot 0; 305 - 210 \cdot 0 - 115; 400 - 210 \cdot 0 - 115 \cdot 0\} = \\ &= \{0; 190; 400\} = 0; \end{aligned} \quad (9)$$

$$-p = 5, j_p = j_5 = 5, f_{j_5} = f_5 = \{1, 4, 5\}:$$

$$\begin{aligned} v_{j_5} = v_5 &= \min\left\{c_1 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij}a_{1ij}; c_4 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij}a_{4ij}; c_5 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij}a_{5ij}\right\} = \\ &= \min\{210 - 210; 400 - 210 \cdot 0 - 115 \cdot 0; 270 - 210 \cdot 1 - 115 \cdot 0\} = \\ &= \{0; 400; 60\} = 0; \end{aligned} \quad (10)$$

$$-p = 6, j_p = j_6 = 6, f_{j_6} = f_6 = \{2, 3, 4\}:$$

$$v_{j_6} = v_6 = \min \left\{ c_2 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{2ij}; c_3 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{3ij}; c_4 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{4ij} \right\} =$$

$$= \min \{305 - 210 \cdot 0 - 115 \cdot 1; 115 - 210 \cdot 0 - 115 \cdot 1; 400 - 210 \cdot 0 - 115 \cdot 0\} =$$

$$= \{190; 0; 400\} = 0; \tag{11}$$

$$-p = 7, j_p = j_7 = 7, f_{j_7} = f_7 = \{2, 3, 4\}:$$

$$v_{j_7} = v_7 = \min \left\{ c_2 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{2ij}; c_3 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{3ij}; c_4 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{4ij} \right\} =$$

$$= \min \{305 - 210 \cdot 0 - 115 \cdot 1; 115 - 210 \cdot 0 - 115 \cdot 1; 400 - 210 \cdot 0 - 115 \cdot 0\} =$$

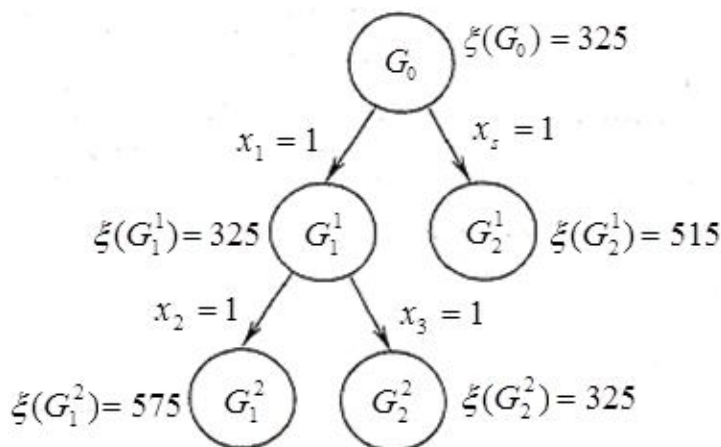
$$= \{190; 0; 400\} = 0. \tag{12}$$

Тогда нижняя оценка  $\xi(G_0)$  равна:

$$\xi(G_0) = \sum_{p=1}^7 v_{ij} = 115 + 210 = 325 \text{ усл. ед.} \tag{13}$$

Этап 2 – структурирование.

Исходное множество  $G_0$  делится на два непересекающихся подмножества:  $G_1^1$  и  $G_2^1$  (рисунок 2). Количество формируемых подмножеств определяется числом приборов (комплектов приборов), которые могут покрывать первую функцию.



**Рисунок 2 – Дерево ветвей при принятии решения методом покрытия графа по принципу оптимальности Беллмана**

Из исходной таблицы следует, что первая функция может покрываться первым и пятым приборами (комплектами приборов), т. е.  $f_1 = \{1, 5\}$ .

Этап 3 – расчет функций качества и ограничений.

Для подмножества  $G_1^1$  находятся функции, которые не покрываются первым пакетом, т. е.  $N_{G_1^1} = \{4, 6, 7\}$ , и формируется таблица 2 для вычисления нижней оценки  $\xi(G_0)$ .

**Таблица 2 – Матрица покрытия для множества  $G_1^1$**

Прибор (комплект приборов) $S$	Функция $F$			Стоимость $c_i$ , усл. ед.
	$f_4$	$f_6$	$f_7$	
$s_2$	1	1	1	305
$s_3$	1	1	1	115
$s_4$	0	1	1	400
$s_5$	0	0	0	270
$a_j$	2	3	3	-
$p$	1	2	3	-
$v_j$	115	0	0	-

На основе данных таблицы 2 вычисляются значения цены покрытия  $v_{jp}$ , при  $p = 1, \overline{p=1}, n(G_1^1)$ :

$$-p = 1, j_p = j_1 = 4, f_{j1} = f_4 = \{2, 3\}:$$

$$v_{j1} = \min\{c_2, c_3\} = \min\{305, 115\} = 115 \text{ усл. ед.}; \quad (14)$$

$$-p = 2, j_p = j_2 = 6, f_{j1} = f_6 = \{2, 3, 4\}:$$

$$\begin{aligned} v_{j2} = v_6 &= \min\{c_2 - v_{j1}a_{2j1}; c_3 - v_{j1}a_{3j1}; c_4 - v_{j1}a_{4j1}\} = \\ &= \min\{305 - 115; 115 - 115; 400 - 115 \cdot 0\} = \min\{190; 0; 400\} = 0; \end{aligned} \quad (15)$$

$$-p = 3, j_p = j_3 = 7, f_{j1} = f_7 = \{2, 3, 4\}:$$

$$\begin{aligned} v_{j3} = v_7 &= \min\left\{c_2 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{2ij}; c_3 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{3ij}; c_4 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{4ij}\right\} = \\ &= \min\{305 - 115 \cdot 1; 115 - 115 \cdot 1; 400 - 115 \cdot 0\} = \min\{190; 0; 400\} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

$$\xi(G_1^1) = \Delta_1 + \Delta_2; \quad (17)$$

где  $\Delta_1 = 115$  усл. ед.;

$$\Delta_2 = c_1 = 210 \text{ усл. ед.}$$

Тогда:

$$\xi(G_1^1) = 210 + 115 = 325 \text{ усл. ед.}$$

Для подмножества  $G_2^1$  находятся функции, которые не покрываются пятым прибором (комплект приборов) – множество  $N_{G_1^1} = \{2, 3, 4, 6, 7\}$ , и формируется таблица 3 для вычисления нижней оценки  $\xi(G_2^1)$ .

**Таблица 3 – Матрица покрытий для множества  $\xi(G_2^1)$**

Прибор (комплект приборов) $S$	Функция $F$					Стоимость $c_i$ , усл. ед.
	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_6$	$f_7$	
$s_1$	1	1	0	0	0	210
$s_2$	1	1	1	1	1	305
$s_3$	0	0	1	1	1	115
$s_4$	1	1	0	1	1	400
$a_j$	3	3	2	3	3	-
$p$	2	3	1	4	5	-
$v_j$	190	0	115	0	0	-

На основе данных таблицы 3 вычисляются значения цены покрытия  $v_{jp}$ , при  $p = 1, p = \overline{1, n(G_2^1)}$ :

$$-p = 1, j_p = j_1 = 4, f_{j_1} = f_4 = \{2, 3\}:$$

$$v_{j_1} = \min\{c_2, c_3\} = \min\{305, 115\} = 115 \text{ усл. ед.}; \quad (18)$$

$$-p = 2, j_p = j_2 = 2, f_{j_2} = f_2 = \{1, 2, 4\}:$$

$$\begin{aligned} v_{j_2} = v_2 &= \min\{c_1 - v_{j_1} a_{1j_1}; c_2 - v_{j_1} a_{2j_1}; c_4 - v_{j_1} a_{4j_1}\} = \\ &= \min\{210 - 115 \cdot 0; 305 - 115; 400 - 115 \cdot 0\} = \\ &= \min\{210; 190; 400\} = 190 \text{ усл. ед.}; \quad (19) \end{aligned}$$

$$-p = 2, j_p = j_3 = 3, f_{j_3} = f_3 = \{1, 2, 4\}:$$

$$\begin{aligned} v_{j_3} = v_3 &= \min\left\{c_1 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{1ij}; c_2 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{2ij}; c_4 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{4ij}\right\} = \\ &= \min\{210 - 115 \cdot 0; 305 - 115 \cdot 1 - 190 \cdot 1; 400 - 115 \cdot 0 - 190 \cdot 1\} = \\ &= \min\{210; 0; 210\} = 0; \quad (20) \end{aligned}$$

$$-p = 2, j_p = j_4 = 6, f_{j_4} = f_6 = \{2, 3, 4\}:$$

$$\begin{aligned} v_{j_4} = v_6 &= \min \left\{ c_2 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{2ij}; c_3 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{3ij}; c_4 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{4ij} \right\} = \\ &= \min \{305 - 115 \cdot 1 - 190 \cdot 1; 115 - 115 \cdot 1 - 190 \cdot 0; 400 - 115 \cdot 0 - 190 \cdot 1\} = \\ &= \min \{0; 0; 210\} = 0; \end{aligned} \quad (21)$$

$$-p = 5, j_p = j_4 = 7, f_{j_7} = f_7 = \{2, 3, 4\}:$$

$$\begin{aligned} v_{j_4} = v_6 &= \min \left\{ c_2 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{2ij}; c_3 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{3ij}; c_4 - \sum_{ij=1}^{p-1} v_{ij} a_{4ij} \right\} = \\ &= \min \{305 - 115 \cdot 1 - 190 \cdot 1; 115 - 115 \cdot 1 - 190 \cdot 0; 400 - 115 \cdot 0 - 190 \cdot 1\} = \\ &= \min \{0; 0; 210\} = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

$$\xi(G_1^2) = \Delta_1 + \Delta_2; \quad (23)$$

где  $\Delta_1 = 305$  усл. ед.;

$$\Delta_2 = c_1 = 270 \text{ усл. ед.}$$

Тогда:

$$\xi(G_1^2) = 305 + 270 = 575 \text{ усл. ед.}$$

Этап 4 – выбор перспективного состава приборов.

В качестве перспективной выбирается вершина  $G_1^1$ , имеющая минимальную нижнюю оценку. Осуществляется переход к выполнению следующей итерации. На этой итерации подмножество  $G_1^1$  делится на два подмножества, так как четвертая функция может покрываться вторым и третьим приборами (комплектами приборов). Для подмножества  $G_1^2$  переменная  $x_2 = 1$ , а множество  $N(G_1^2)$ , включающее функции, которые не покрываются первым и вторым пакетом, является пустым, т. е.  $N(G_1^2) = 0$ .

Тогда:

$$\xi(G_2^1) = c_1 + c_2 = 210 + 305 = 515 \text{ усл. ед.} \quad (24)$$

Аналогично находится нижняя оценка:

$$\xi(G_2^2) = 210 + 115 = 325 \text{ усл. ед.}$$

По таблице 1 подбираем прибор 2 или конкурирующий комплект приборов 1 + 3. Прибор 2 (затраты – 305 усл. ед.) покрывает набор функций  $f_1, f_2, f_3, f_4, f_6, f_7$ . Комплект приборов 1 + 3 (затраты – 325 усл. ед.) покрывает весь набор функций  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ . Так как функция  $f_5$  не удовлетворяет условию  $f \neq 0$ , то окончательный выбор остается за прибором 2.

### **Выводы**

1 В результате исследований разработан математический инструмент, позволяющий в настоящее время на современном уровне оптимизировать состав различного технологического оборудования с учетом технико-экономических показателей для внедрения инновационных технологий и создания унифицированных программных средств оптимизации по данному направлению, в том числе и для оснащения агрометеокомплексов, применяемых в системах прецизионного орошения.

2 Разработка специализированного математического и программного обеспечения требует больших капитальных и временных затрат, что не всегда возможно. Предложенный авторами подход ориентирован на создание унифицированных программных средств оптимизации выбора технологического оборудования относительно заданных параметров, что позволит снизить затраты на его приобретение. Таким образом, данный подход является перспективным для организаций, планирующих и осуществляющих модернизацию производства.

### **Список использованных источников**

1 Оросительные системы России: от поколения к поколению: монография / В. Н. Щедрин, А. В. Колганов, С. М. Васильев, А. А. Чураев. – В 2 ч. – Ч. 2. – Новочеркасск: Геликон, 2013. – 307 с.

2 Боровиков, С. М. Математические методы в конструировании и технологии РЭС / С. М. Боровиков. – Минск: БГУИР, 2009. – 101 с.

3 Калихман, И. Л. Динамическое программирование в примерах и задачах: учеб. пособие / И. Л. Калихман, М. А. Войтенко. – М.: Высш. шк., 1979. – 125 с.

4 Щедрин, В. Н. Комплексный подход к оценке поколений оросительных систем на основе средств имитационного моделирования сложных систем / В. Н. Щедрин,

С. М. Васильев, А. А. Чураев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2013. – № 4(32). – С. 189–193.

5 Арно, А. Логика, или искусство мыслить / А. Арно, П. Пиколь. – М.: Наука, 1991. – 414 с.

6 Буолдинг, К. Общая теория систем – как скелет науки / К. Буолдинг // Исследования по общей теории систем. – М.: Прогресс, 1969. – С. 106–124.

7 Венделин, А. Г. Подготовка и принятие управленческого решения. Методологический аспект / А. Г. Венделин. – М.: Экономика, 1977. – 150 с.

8 Горский, Д. П. Определения, их виды и правила / Д. П. Горский // Логика научного познания. – М.: Наука, 1987. – С. 140–159.

9 Добкин, В. М. Системный анализ в управлении / В. М. Добкин. – М.: Химия, 1984. – 224 с.

10 Клир, Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач / Дж. Клир: [пер с англ.]. – М.: Радио и связь, 1990. – 534 с.

11 Кулагин, О. А. Принятие решений в системах организационного управления. Основы методологии: учеб. пособие / О. А. Кулагин. – Ч. 1. – СПб.: Изд-во ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 1999.

12 Черноморов, Г. А. A Concept of Processes Integration of Instruction and Control by Training Engineer Personnel in a Distributed Computer Network Environment / Г. А. Черноморов, В. И. Лачин, В. А. Таранушич // Isee'95 international conference of engineering education. abstracts, may 23–25, 1995. – Russia, Moscow, 1995. – С. 188.

13 Черноморов, Г. А. Модели проектирования распределенных систем обработки информации на базе локальных вычислительных систем / Г. А. Черноморов, С. П. Воробьев, А. Н. Скоба // Техника, экономика, культура: сб. ст. и крат. науч. сообщ. сотр. и аспирантов НГТУ по материалам Юбилейной науч. сессии, посвящ. 100-летию ун-та, г. Новочеркасск, 5–15 апреля 1997 г. – Ростов н/Д.: Гефест, 1997. – С. 188.

14 Черноморов, Г. А. Применение метода ветвей и границ для оптимизации вычислительных сетей корпоративных информационных систем образовательных структур / Г. А. Черноморов, С. А. Шестаков // Проблемы создания автоматизированных обучающих и тестирующих систем: сб. науч. тр. – Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2001. – С. 173–177.

15 Емельянова, Т. В. Метод ветвей и границ и метод динамического программирования для задачи о ранце / Т. В. Емельянова // Новые компьютерные технологии. – 2008. – Т. 6. – № 1(6). – С. 58.

16 Теслинов, А. Г. Развитие систем управления: монография / А. Г. Теслинов. – М.: РВСН, 1997. – 229 с.

## References

1 Shchedrin V.N, Kolganov A.V., Vasiliev S.M., Churaev A.A. 2013. *Orositelnye sistemy Rossii: ot pokoleniya k pokoleniyu: monografiya* [Irrigation Systems of Russia: from Generation to Generation: monograph]. In 2 parts. P. 2. Novocherkassk, Helicon Publ., 307 p. (In Russian).

2 Borovikov S.M. 2009. *Matematicheskie metody v konstruirovanii I tekhnologii RES* [Mathematical methods in design and RES technology]. Minsk, BSUIR Publ., 101 p. (In Russian).

3 Kalikhman I.L., Voitenko M.A. 1979. *Dinamicheskoe programmirovaniye v primerakh i zadachakh: uch. pos.* [Dynamic programming in examples and problems: textbook]. Moscow, Higher school Publ., 125 p. (In Russian).

4 Shchedrin V.N., Vasiliev S.M., Churaev A.A. 2013. *Kompleksnyy podkhod k otsenke pokoleniy orositelnykh sistem na osnove sredstv imitatsionnogo modelirovaniya slozhnykh*



*sistem* [An integrated approach to the evaluation of generations of irrigation systems by means of complex systems simulation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa* [Bull. Nizhnevolzhsky AgroUniversity complex]. no. 4(32), pp. 189-193. (In Russian).

5 Arno A., Pichol P. 1991. *Logika ili iskusstvo myslit* [Logic, or the art of thinking]. Moscow, Nauka Publ., 414 p. (In Russian).

6 Buolding K. 1969. *Obshchaya teoriya sistem – kak skelet nauki* [The general theory of systems – as a skeleton of science]. *Issledovaniya po obshchey teorii sistem* [Investigation of general theory of systems]. Moscow, Progress Publ., pp. 106-124. (In Russian).

7 Wendelin A.G. 1977. *Podgotovka i prinyatie upravlencheskogo resheniya. Metodologicheskii aspekt* [Preparation and managerial decision making. Methodological aspect]. Moscow, Economics Publ., 150 p. (In Russian).

8 Gorsky D.P. 1987. *Opredeleniya, ikh vidy i pravila* [Definitions, their types and rules]. *Logika nauchnogo poznaniya* [Logic of scientific knowledge]. Moscow, Nauka Publ., pp. 140-159. (In Russian).

9 Dobkin V.M. 1984. *Sistemnyy analiz v upravlenii* [System analysis in management]. Moscow, Chemistry Publ., 224 p. (In Russian).

10 Clear J. 1990. *Sistemologiya. Avtomatizatsiya resheniya sistemnykh zadach* [Systemology. Automation of systems problem solving. Translation from English]. Moscow, Radio and Communications Publ., 534 p. (In Russian).

11 Kulagin O.A. 1999. *Prinyatie resheniy v sistemakh organizatsionnogo upravleniya. Osnovy metodologii: uch. pos.* [Decision-making in managerial control systems. Basics of methodology: Textbook]. p. 1, Saint Petersburg, VIKU im. Mozhaiskiy Publ. (In Russian).

12 Chernomorov G.A., Lachin V.I., Taranushich V.A. 1995. A Concept of Processes Integration of Instruction and Control by Training Engineer Personnel in a Distributed Computer Network Environment. Bull. ICEE'95 International Conference of Engineering Education. May 23-25, Moscow, Russia, 188 p. (In English).

13 Chernomorov G.A., Vorobyov S.P., Scoba A.N. 1997. *Modeli proektirovaniya raspredelitelnykh sistem obrabotki informatsii na base lokalnykh vychislitelnykh sistem* [Design models of distributed processing information systems on the basis of local computer systems]. *Tekhnika, ekonomika, kultura: sbornik statey u kratkikh nauchnykh soobshcheniy sotrudnikov i aspirantov NGTU po materialam Yubileynoy nauchnoy sessii, posvyashchenoy 100 universiteta* [Technique, economy, culture: collection of articles of students and post-graduates NGTU of Jubilee scientific session dedic. To 100th Anniversary of University, Novocherkassk, 5-15 April 1997]. Rostov n/Don, Gefest Publ., 188 p. (In Russian).

14 Chernomorov G.A., Shestakov S.A. 2001. *Primenenie metodov vetvey i granits dlya optimizatsii vychislitelnykh setey korporativnykh informatsionnykh sistem obrazovatelnykh struktur* [Application of branch and bounds method to optimize computer networks of corporate information systems of educational structures]. *Problemy sozdaniya avtomatizirovannykh obuchayushchikh i testiruyushchikh sistem: sbornik nauchnykh trudov* [Problems of creating automated training and testing systems: collection of sc. works]. Novocherkassk, SRSTU(NPI), pp. 173-177. (In Russian).

15 Emelyanova T.V. 2008. *Metod vetvey i granits i metod dinamicheskogo programmirovaniya dlya zadachi o rantse* [Branch and bound method and dynamic programming method for the knapsack problem]. *Novye kompyuternye technologii* [New Computer Technologies]. vol. 6, no. 1(6), 58 p. (In Russian).

16 Teslinov A.G. 1997. *Razvitie sistem upravleniya: monogr.* [Development of management systems: monograph]. Moscow, RVSNI Publ., 229 p. (In Russian).

---

### **Щедрин Вячеслав Николаевич**

Ученая степень: доктор технических наук

Ученое звание: академик Российской академии наук, профессор

Должность: директор

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: [rosniipm@yandex.ru](mailto:rosniipm@yandex.ru)

**Shchedrin Vyacheslav Nikolayevich**

Degree: Doctor of Technical Sciences

Title: Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor

Position: Director

Affiliation: Russian Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovskiy ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: [rosniipm@yandex.ru](mailto:rosniipm@yandex.ru)

**Васильев Сергей Михайлович**

Ученая степень: доктор технических наук

Ученое звание: доцент

Должность: заместитель директора по науке

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: [rosniipm@yandex.ru](mailto:rosniipm@yandex.ru)

**Vasilyev Sergey Mihailovich**

Degree: Doctor of Technical Sciences

Title: Associate Professor

Position: Deputy Director of Science

Affiliation: Russian Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovskiy ave, 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: [rosniipm@yandex.ru](mailto:rosniipm@yandex.ru)

**Чураев Александр Анатольевич**

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: заместитель директора по науке

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: [churaev75@mail.ru](mailto:churaev75@mail.ru)

**Churaev Aleksander Anatolievich**

Degree: Candidate of Technical Sciences

Position: Deputy Director of Science

Affiliation: Russian Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovskiy ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: [churaev75@mail.ru](mailto:churaev75@mail.ru)