ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. АГРОИНЖЕНЕРИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-29

TO THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF AUTOMATION OF CALCULATIONS WHEN DESIGNING THE COMBINED IRRIGATION SYSTEMS

V. V. Borodychev, M. N. Lytov

*Federal State Budget Science Center «All-Russian Scientific Research Institute of Hydrotechnics
and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov»*

Received 28.10.2020

Submitted 02.12.2020

Summary

An algorithm is proposed that makes it possible to automate some of the most time-consuming computational processes in the design of combined irrigation systems. The algorithm is focused on the creation of optimized technical systems, and the solution of the optimization problem involves the determination of a number of indicators that take into account the entire life cycle of structural elements.

Abstract

introduction. Parametric optimization of structures has always been and remains an urgent task in the design of complex technical systems. Modern irrigation systems, of course, are precisely such - complex - technical systems, which, in addition, are large-scale and require significant resources to create. Minimization of resource costs for the creation of irrigation systems should not compromise the quality of the technological process, reliability and durability of structures in operation. Combined irrigation systems are distinguished by the fact that they realize the possibility of irrigation in various ways with a single water supply network, as well as other structural elements of the system. Such a system should "be able" to operate in various modes, which complicates the design task and the search for optimal design parameters. The implementation of multivariate calculations based on computer algorithms allows you to more accurately solve design problems, allows you to find such options that can be lost in manual mode. The purpose of this study is the algorithmization of automated calculations in the design of combined irrigation systems. **Object.** The object of research is a combined technical irrigation and drainage system, which provides the possibility of irrigation in various ways in a given technological process. **Materials and methods.** The design of combined irrigation systems, like any other irrigation system, is based on hydraulic calculation. The system must provide a given performance in terms of water consumption when creating certain, - working, - pressures. In the case of combined irrigation, these parameters may vary depending on the current operating mode of the system, which must be taken into account when designing. The solution to the problem of optimal design also implies the need to take into account the possibility of increasing the resource intensity of the project with an increase in the range of operating heads in the system and the maximum possible minimization of this vector. It is also necessary to find the optimal balance between the pressure losses during water transport and the resource intensity of the designed water pipelines of the combined irrigation system. The creation of an algorithm makes it possible to automate calculations at the most computationally intensive stages, which greatly facilitates the design process itself. **Results and conclusions.** The principle on which the proposed algorithm is built fits into the well-known scheme: analysis (decomposition of a complex technical system into a sequence of simple structural elements organized in a certain way) - solving an optimization problem - synthesis. The algorithm assumes a search of the structural elements of the combined irrigation system organized in a certain order, the determination of the optimal design parameters of each of the elements and their integration into a single hydraulic model with a check of the feasibility of the given technological modes. To organize the enumeration of structural elements of systems, it is proposed to use a specially formed code, which gives a complete picture of the position of an element in the system and allows it to be uniquely identified. The formation of such a code assumes the use of the principle of linear coordinates used to describe branched linear objects. In this problem, it is assumed that the ordinal level of the water

conduit is determined by the serial number of a number located in a numerical sequence, and the number itself determines the number of the nodal point on the water conduit of the system, determined along the direction of movement of irrigation water when performing the transport function. The procedure for generating the code starts the calculation cycle. Enumeration allows you to sequentially select structural elements of a system of the same level. For the selected element, the optimal design parameters are determined. Optimization of design parameters is carried out by organizing a sequential enumeration of their values with subsequent substitution in the hydraulic model with parallel calculations of resource costs. The generalization of the results of these calculations makes it possible to assess the quality of the implementation of the technological process and the resource costs required for the creation and operation of the system. The solution to the optimization problem involves the choice of such design parameters of the element of the combined irrigation system, at which the total cost of resources for its creation and operation would be minimal. This ensures the creation of optimized technical irrigation and drainage systems of a combined type, and the solution of the optimization problem involves the determination of a number of indicators that take into account the entire life cycle of structural elements.

Key words: *irrigation and drainage system, combined irrigation, optimal design, computing automation, algorithm.*

Citation. Borodychev V.V., Lytov M.N. To the solution of the problem of automation of calculations when designing the combined irrigation systems. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2020.4(60). 291-304 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-29.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 631.67:581.55

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННОГО ОРОШЕНИЯ

В. В. Бородычев, доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН

М. Н. Лытов, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский

институт гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова, г. Волгоград

Дата поступления в редакцию 028.10.2020

Дата принятия к печати 02.12.2020

Актуальность. Параметрическая оптимизация конструкций всегда была и остается актуальной задачей проектирования сложных технических систем. Современные системы орошения, безусловно, относятся именно к таким сложным техническим системам, которые, кроме этого, отличаются масштабностью и требуют значительных затрат ресурсов на создание. Минимизация затрат ресурсов на создание оросительных систем не должна идти в ущерб качеству технологического процесса, надежности и долговечности конструкций в эксплуатации. Системы комбинированного орошения отличаются тем, что реализуют возможность полива различными способами при единой водоподводящей сети, а также других конструктивных элементов системы. Такая система должна «уметь» работать в различных режимах, что усложняет задачу проектирования и поиска оптимальных конструктивных параметров. Реализация многовариантных расчетов на основе компьютерных алгоритмов позволяет более точно решать задачи проектирования, позволяет находить такие варианты, которые в ручном режиме могут быть потеряны. Целью настоящего исследования является алгоритмизация автоматизированных вычислений при проектировании систем комбинированного орошения. **Объект.** Объектом исследований является комбинированная техническая гидромелиоративная система, обеспечивающая возможность проведения поливов различными способами в заданном технологическом процессе режиме. **Материалы и методы.** В основу проектирования систем комбинированного орошения, как и всякой другой оросительной системы, положен гидравлический расчет. Система должна обеспечивать заданную производительность по расходу воды при создании определенных рабочих напоров. В случае с комбинированным орошением

эти параметры могут варьировать в зависимости от реализуемого в данный момент режима работы системы, что необходимо учитывать при проектировании. Решение задачи оптимального проектирования также предполагает необходимость учета возможности повышения ресурсоемкости проекта с увеличением диапазона рабочих напоров в системе и максимально возможной минимизации этого вектора. Также необходим поиск оптимального баланса между потерями напора при транспорте воды и ресурсоемкостью проектируемых водоводов комбинированной системы орошения. Создание алгоритма позволяет автоматизировать расчеты по наиболее вычислительно емким этапам, что существенно облегчает сам процесс проектирования. **Результаты и выводы.** Принцип, на котором построен предложенный алгоритм, укладывается в известную схему: анализ (разложение сложной технической системы на определенным образом организованную последовательность простых конструктивных элементов) – решение оптимизационной задачи – синтез. Алгоритм предполагает организованный в определенном порядке перебор конструктивных элементов системы комбинированного орошения, определение оптимальных конструктивных параметров каждого из элементов и их интеграцию в единую гидравлическую модель с проверкой реализуемости заданных технологических режимов. Для организации перебора конструктивных элементов систем предложено использовать особым образом сформированный код, который дает полное представление о положении элемента в системе и позволяет его однозначно идентифицировать. Формирование такого кода предполагает использование принципа линейных координат, используемых для описания разветвленных линейных объектов. В настоящей задаче принято, что порядковый уровень водовода определяется порядковым номером числа, расположенного в числовой последовательности, а само число определяет номер узловой точки на водоводе системы, определенного по ходу движения оросительной воды при осуществлении функции транспорта. Процедурой формирования кода осуществляется запуск цикла расчетов. Перебор позволяет последовательно выбирать конструктивные элементы системы одного уровня. Для выбранного элемента определяются оптимальные конструктивные параметры. Оптимизация конструктивных параметров проводится путем организации последовательного перебора их значений с последующей подстановкой в гидравлическую модель с параллельными вычислениями затрат ресурсов. Обобщение результатов этих вычислений позволяет оценить качество реализации технологического процесса и затраты ресурсов, необходимые для создания и эксплуатации системы. Решение оптимизационной задачи предполагает выбор таких конструктивных параметров элемента системы комбинированного орошения, при которых совокупные затраты ресурсов на его создание и эксплуатацию были бы минимальны. Этим обеспечивается создание оптимизированных технических гидромелиоративных систем комбинированного типа, причем решение оптимизационной задачи предполагает определение ряда показателей, учитывающих весь жизненный цикл конструктивных элементов.

Ключевые слова: системы комбинированного орошения, комбинированное орошение, проектирование систем орошения.

Цитирование. Бородычев В. В., Лытов М. Н. К решению задачи автоматизации вычислений при проектировании систем комбинированного орошения. *Известия НВ АУК*. 2020. 4(60). 291-304. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-29.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Система комбинированного орошения, как всякая сложная техническая система, включает совокупность взаимно интегрированных конструктивных элементов, в комплексе позволяющих реализовать определенный технологический процесс [6, 7, 9]. Конструктивные элементы систем орошения взаимодействуют на принципах иерархической архитектуры, когда совокупность конструкций низшего порядка определяет состав более сложных элементов системы, отвечающих за контроль и реализацию технологического процесса в различных аспектах [4, 8]. Основные конструктивно-структурные комплексы системы комбинированного орошения такие же, как и у

любой оросительной системы. Сюда входит система водозабора, насосная станция, системы водоподготовки, система транспорта воды, система распределения воды по орошаемому участку, запорно-регулирующая арматура и системы управления [5]. Работа этих систем должна быть согласована на принципах оптимальности, предполагающих минимизацию затрат ресурсов при обеспечении заданных параметров технологического процесса. Системы комбинированного орошения отличаются тем, что реализуют возможность полива различными способами, а также возможность более гибкого регулирования параметров орошения. При этом используются единая водоподводящая и распределительные сети, а также другие конструктивные элементы системы. Такая система должна «уметь» работать в различных режимах, что усложняет задачу проектирования и поиска оптимальных конструктивных параметров. Реализация многовариантных расчетов на основе компьютерных алгоритмов позволяет более точно решать задачи проектирования, позволяет находить такие варианты, которые в ручном режиме могут быть потеряны [1, 3, 14]. Целью исследований является алгоритмизация автоматизированных вычислений при проектировании систем комбинированного орошения.

Материалы и методы. В основу проектирования систем комбинированного орошения, как и всякой другой оросительной системы, положен гидравлический расчет [2, 10]. Система должна обеспечивать заданную производительность по расходу воды при создании определенных рабочих напоров [11-13]. В случае с комбинированным орошением эти параметры могут варьировать в зависимости от реализуемого в данный момент режима работы системы. Пределы варьирования этих параметров при проектировании необходимо учитывать вкупе с поиском оптимальной величины гидромодуля. Решение задачи оптимального проектирования также предполагает:

- необходимость учета возможности повышения ресурсоемкости проекта с увеличением диапазона рабочих напоров в системе. В целом это абсолютно объективный фактор, определяющийся тем, что для работы с повышенными рабочими напорами требуются более прочные и, как правило, более дорогостоящие конструктивные элементы. Технология комбинированного орошения в классическом ее варианте [6, 9] реализует процесс низконапорного капельного полива; более высокие напоры требуются для дождевания и, наконец, кратно требуется повышать давление при мелкодисперсном дождевании. Если ориентироваться исключительно на наибольшую величину технологического напора, система может оказаться слишком дорогостоящей даже при использовании единых конструктивных элементов. Оптимизация в этом плане предполагает поиск решений с минимальной протяженностью водоводов, где требуется создание повышенных напоров;

- необходимость поиска оптимального баланса между потерями напора при транспорте воды и ресурсоемкостью проектируемых водоводов комбинированной системы орошения. Безусловно, потери напора в системе должны быть минимизированы и не превышать определенного, предельно установленного уровня. При этом следует учитывать, что увеличение диаметра водовода, как основного конструктивного параметра, определяющего потери напора по длине, связано с существенным увеличением затрат по проекту. С другой стороны, увеличение потерь напора связано с систематическими затратами дополнительной энергии, требуемыми для создания повышенного давления в системе. Причем эти дополнительные затраты не одномоментны, а будут требоваться в течение всего жизненного цикла системы. Поэтому даже небольшое увеличение потерь напора может потребовать существенного увеличения затрат ресурсов на эксплуатацию системы;

- необходимость оценки возможности использования дополнительных запорно-регулирующих устройств для регулирования потока по группам применяемых в системе водовыпусков. Сама технология комбинированного орошения реализуется посредством установки разных типов водовыпусков, характеризующихся различными режимами работы. Сегодня уже есть технические решения, позволяющие включать водовыпуски дожде-

вального типа при достижении определенного уровня давления сети. Это позволяет проводить капельные поливы при неработающих дождевальных аппаратах. Однако при проведении поливов способом мелкодисперсного дождевания капельные водовыпуски тоже работают. Это увеличивает секундный расход воды, а следовательно, обуславливает повышенную нагрузку на всю систему. С другой стороны, конструкции, позволяющие разделить потоки при различных режимах работы системы, существенно увеличивают ее стоимость. Это требует как проведения работ в плане технического совершенствования такого рода устройств, так и решения оптимизационной задачи на предмет их использования.

Предложенный алгоритм решает не все эти задачи, однако позволяет автоматизировать расчеты по наиболее вычислительно емким этапам, что существенно облегчает сам процесс проектирования.

Результаты и обсуждение. Укрупненная схема алгоритма проектирования систем комбинированного орошения приведена на рисунке 1. Принцип, на котором построен предложенный алгоритм, достаточно прост и укладывается в известную схему: анализ (разложение сложной технической системы на определенным образом организованную последовательность простых конструктивных элементов) – решение оптимизационной задачи – синтез (с проверкой работоспособности системы).

Для решения каждой задачи используются стандартные вычислительные процедуры. Реализация такого рода алгоритмов требует многократных циклических расчетов, однако вычислительные мощности современных компьютерных систем позволяют успешно решать такие задачи.

Алгоритм предполагает организованный в определенном порядке перебор конструктивных элементов системы комбинированного орошения, определение оптимальных конструктивных параметров каждого из элементов и их интеграцию в единую гидравлическую модель с проверкой реализуемости заданных технологических режимов. Последовательность, в которой ведется перебор конструктивных элементов системы, определяется следующим. Во-первых, перебор элементов системы осуществляется в обратном движении оросительной воды направлении: от водовыпуска к головному элементу системы. Головной элемент системы конструктивно может быть представлен водозабором с насосной станцией, если проектируется оросительная система в целом или узлом ветвления потока с известными гидравлическими параметрами, если проектируемая система является одним из сегментов оросительной системы. Во-вторых, необходимо, чтобы для каждого из конструктивных элементов, на которые раскладывается проектируемая система, гидравлический расчет мог бы быть произведен стандартными методами. Это, в частности, предполагает возможность формирования единых исходных условий и требований, а также возможность выбора критерия оптимизации, с учетом которых проводится расчет. И наконец, результаты расчета конструктивного элемента используются для формирования системы исходных условий и требований для расчета конструктивного элемента более высокого уровня.

Для организации перебора конструктивных элементов систем предложено использовать особым образом сформированный код, который дает полное представление о положении элемента в системе и позволяет его однозначно идентифицировать. Такой код может быть сформирован на основе ранее предложенной системы идентификации числового имени координаты в линейной системе координат, принятой для описания разветвленной совокупности водоводов и конструктивных узлов комбинированного орошения. Принятая схема формирования числового имени координаты предполагает, что порядковый уровень водовода определяется порядковым номером числа, расположенного в числовой последовательности, а само число определяет номер узловой точки на водоводе системы, определенного по ходу движения оросительной воды при осуществлении функции транспорта. Например, в имени `name_1:5:4:12`, - число 1 ха-

рактически узел ветвления потока на первом, из рассматриваемого сегмента, водоводе системы, число 5 характеризует номер узла ветвления на водоводе второго уровня, причем известно, что данный водовод соединен с водоводом первого уровня в узле ветвления потока 1, и так далее. Такой подход дает возможность гарантированно идентифицировать водовод как искомый протяженный объект в системе линейных координат. Таким образом, имя координаты в используемом ранее алгоритме для моделирования гидравлических параметров системы включает последовательность значений r , состоящую из n уровней. Причем n -ый уровень соответствует уровню водовода, или другого конструктивного элемента системы комбинированного орошения. А значение r идентифицирует узел ветвления-преобразования потока на элементе n -ного уровня.

Рисунок 1 – Укрупненная схема алгоритма автоматизированного проектирования систем комбинированного орошения

Figure 1 – An enlarged diagram of the algorithm for the automated design of combined irrigation systems

Такого рода узел предполагает, в частности, присоединение водовода следующего уровня, конструктивно оформленный водовыпуск, элемент системы водоподготовки и т.д. Собственно, эти элементы и являются теми техническими элементами системы, оптимальные конструктивные параметры которых необходимо определить. То есть имя координаты name_r^n может быть взято за основу для формирования кода конструктивного элемента code_r^n . Для того чтобы организовать перебор с последнего периферийного элемента системы, код первого расчетного элемента code_r^n формируется на основе краевой координаты системы name_r^N . В алгоритме это реализовано процедурой присвоения последовательности N значений $г$ имени координаты последовательности n значений $г$ кода конструктивного элемента. Процедурой присвоения значений и осуществляется запуск цикла расчетов.

Вслед за формированием кода первого расчетного элемента системы комбинированного орошения реализуется процедура перебора конструктивных элементов системы уровня n по значению $г$. Этот перебор позволяет последовательно выбирать конструктивные элементы системы одного уровня. Для выбранного элемента определяются оптимальные конструктивные параметры. Процедура определения оптимальных конструктивных параметров достаточно сложна и будет рассмотрена ниже в рамках самостоятельного алгоритмического решения.

Результатами расчета является комплекс данных, включающих код конструктивного элемента code_r^n и, собственно, полученные в результате решения оптимизационной задачи, значения конструктивных параметров этого элемента системы. Эти данные отправляют в блок формирования матрицы данных, и одновременно осуществляется запуск проверки условия перебора по $г$:

$$1 \leq r^n < R^n,$$

где r^n – код текущего расчетного элемента системы уровня n ; R^n – код предельного расчетного элемента системы уровня n .

Если условие выполняется, то инициируется новый цикл расчета для следующего конструктивного элемента системы $(г + 1)$ этого же уровня. Если условие не выполняется и предельный счет по $г$ уже достигнут, осуществляется переход к следующему уровню системы:

$$n = n - 1.$$

Результаты расчета по каждому элементу системы обобщаются и включаются в единую базу данных. Данные в такого рода базе формируются в форме матрицы комплексированных значений, включающих код конструктивного элемента и оптимальные значения конструктивных параметров и записанных в той последовательности, в какой проводился расчет.

Переход на новый, более высокий уровень системы осуществляется до тех пор, пока выполняется условие:

$$0 \leq n \leq N,$$

где n – текущий уровень системы, для конструктивных элементов которого выполняются оптимизационные расчеты, N – предельный периферийный уровень системы, 0 – соответствует головному конструктивному узлу системы (проектируемого сегмента системы).

Если условие не выполняется, перебор считается завершенным, а оптимальные конструктивные параметры определены для всех элементов системы. По завершении этого цикла расчетов инициируется построение цепочек конструктивных решений. Па-

параметры для этой процедуры выбираются из сформированной ранее матрицы данных, включающих комплексированные значения кода и конструктивных параметров элементов системы. При этом информация об архитектуре конструктивных цепочек приводится в коде конструктивных элементов системы, который, помимо решения задачи идентификации, указывает и точное место расположения элемента в составе системы.

Расчет элементов системы комбинированного орошения в обратном направлении: от водовыпуска к головному устройству – позволяет создать последовательность, когда конструктивные решения элемента низшего уровня определяют требования к элементам более высокого порядка. Такой подход в целом позволяет получать согласованные решения. Однако возможны ситуации, когда оптимизированные конструктивные элементы в совокупности образуют неработоспособное решение. Причиной может быть не обоснованно заданная архитектура системы, чрезмерные ограничения по набору доступных значений конструктивных параметров, неправильная постановка задачи оптимизации и др. Поэтому предложенный алгоритм предполагает процедуру согласования режимных параметров интегрируемых элементов системы. Если режимные параметры интегрируемых элементов системы согласованы, то разработка проекта считается завершенной, а результаты расчета выводятся на печать.

Если заданные режимы работы системы не выполняются, либо выполняются не в полной мере, алгоритм предусматривает возможность отклонения проекта с определенными расчетом параметрами. В этом случае проводится анализ причин, по которым проект оказался несогласованным и разрабатывается новая система ограничений по исходным вводным проекта. В этом случае возможным является изменение архитектуры системы, расширение доступных для расчета конструктивных параметров, смещение приоритетов в решении оптимизационной задачи и др. Новые вводные замещают соответствующие разделы исходных данных, корректируют постановку и приоритеты оптимизации конструктивных параметров. Одновременно формируется команда на новый расчет, уже с обновленными исходными данными. Цикл расчетов повторяется.

Одним из ключевых операционных блоков предложенного алгоритма является определение оптимальных конструктивных параметров элементы системы $code_r^n$. Это самостоятельная, достаточно сложная задача, которая, впрочем, также имеет типизированные методы решения, поддающиеся алгоритмизации. Схема алгоритма, позволяющего решить эту задачу, приведена на рисунке 2.

Расчетный конструктивный элемент системы комбинированного орошения в приведенном на рисунке 2 алгоритме является одной из вводных для расчета, определяющих начало вычислительного процесса. Собственно, сам алгоритм базируется на принципах многовариантного анализа применительно к доступным конструктивным параметрам элемента системы. Причем алгоритмом предусмотрена возможность полного перебора всех доступных сочетаний конструктивных параметров.

Организация такого рода перебора в алгоритме осуществляется в два этапа. На первом этапе выбирается конструктивный параметр, для которого будут варьироваться значения. Набор конструктивных параметров зависит от элемента системы комбинированного орошения и задается в исходных данных. Для трубчатого водовода такими параметрами, например, могут быть длина и диаметр, материал и толщина стенки, прочность на разрыв, число узлов ветвления потока и т.д.

На втором этапе организуется непосредственно перебор доступных значений для выбранного конструктивного параметра элемента системы комбинированного орошения. Например, если конструктивный элемент системы – водовыпуск, то одним из варьируемых параметров может быть производительность водовыпуска, причем перечень доступных значений производительности будет ограничен номенклатурой выпускаемых водовыпусков.

Выбранное значение варьируемого конструктивного параметра определяет запуск цикла расчетов и используется для определения основных гидравлических характеристик конструктивного элемента системы. Моделирование гидравлических характеристик элемента с известными конструктивными параметрами может быть реализовано с использованием алгоритма, рассмотренного в разделе 2 отчета. Результатом этой процедуры являются верифицированные значения двух важных гидравлических параметров. Это расход воды в головной части конструктивного элемента Q_{a_i} и совокупные потери напора ΔH_{a_i} при заданных конструктивных параметрах.

Рисунок 2 – Определение оптимальных конструктивных параметров элемента системы комбинированного орошения

Figure 2 – Determination of the optimal design parameters of the element of the combined irrigation system

Расчетная величина совокупных потерь напора на элементе сравнивается с предельным (допустимым) уровнем и если она превышает порог, оцениваемое значение конструктивного параметра элемента бракуется и инициируется новый цикл расчетов со следующим значением конструктивного параметра. Если расчетная величина сово-

купных потерь напора на элементе не превышает допустимого уровня, осуществляется переход к оптимизационным расчетам, включающим на первом этапе определение совокупной стоимости конструктивного элемента.

Стоимость может оцениваться как в денежном, так и в энергетическом эквиваленте, у каждого подхода есть свои плюсы и минусы. Алгоритмом эта позиция не регламентируется. Вместе с тем важно максимально учесть не только стоимость самой конструкции, но и эксплуатационные расходы, которые также могут существенно изменяться в зависимости от принятого технического решения. Поскольку конструктивные параметры расчетного элемента системы определяют, в первую очередь, изменение гидравлических характеристик элемента, то было принято решение при расчете эксплуатационных затрат от них и отталкиваться. Действительно, потери напора при определенной производительности элемента по пропуску оросительной воды имеют прямое выражение в затратах энергии. Если оценка ведется в денежном эквиваленте, то нетрудно выполнить соответствующие преобразования, помножив величину затрат энергии на ее стоимость. В любом случае цена энергетических потерь на конструктивном элементе системы будет пропорциональна потерям напора при заданном уровне производительности:

$$C_{we} = f(\Delta H_{a_i}; Q_{a_i}), \quad (1)$$

где C_{we} – стоимость энергетических потерь на конструктивном элементе системы; ΔH_{a_i} – совокупные потери напора для элемента системы при заданных конструктивных параметрах; Q_{a_i} – расход оросительной воды в головном сечении конструктивного элемента системы.

Известно, что потребляемая мощность насоса при заданных величинах напора и производительности, равна:

$$P = \frac{\gamma \cdot H \cdot Q}{\eta}, \quad (2)$$

где P – мощность насоса, Вт; γ – удельный вес жидкости, Н/м³; H – напор насоса, м; Q – производительность насоса по перекачиваемой жидкости, м³/с; η – коэффициент полезного действия насоса.

Тогда мощность, теряемая на расчетном конструктивном элементе системы, определится как:

$$P_{a_i}^{r^n} = \frac{\gamma_w \cdot \Delta H_{a_i} \cdot Q_{a_i}}{\eta}, \quad (3)$$

где $P_{a_i}^{r^n}$ – мощность, теряемая на элементе системы r^n с конструктивными параметрами a_i , Вт; γ_w – удельный вес воды (зависит от температуры, ориентировочно может быть принят равным 9810 Н/м³); ΔH_{a_i} – потери напора на конструктивном элементе с параметрами a_i ; Q_{a_i} – расход оросительной воды в головном сечении конструктивного элемента системы с параметрами a_i .

Чтобы определить энергию, теряемую на конструктивном элементе системы, необходимо знать время полезной работы этого элемента. Это время можно определить из выражения:

$$t^{r^n} = k_s^{r^n} \cdot t_{lt}^{r^n}, \quad (4)$$

где t^{r^n} – совокупное время использования конструктивного элемента r^n за весь период эксплуатации, с; $t_{lt}^{r^n}$ – срок службы конструктивного элемента r^n с параметрами a_i , с; $k_s^{r^n}$ – коэффициент сезонного использования конструктивного элемента r^n в составе проектируемой системы комбинированного орошения.

Тогда энергия, теряемая на конструктивном элементе системы, определится как:

$$E_w^{r^n} = t^{r^n} \cdot P_{a_i}^{r^n},$$

или

$$E_w^{r^n} = t^{r^n} \cdot \frac{\gamma_w \cdot \Delta H_{a_i} \cdot Q_{a_i}}{\eta}, \quad (5)$$

где $E_w^{r^n}$ – энергия, теряемая на конструктивном элементе системы r^n , Дж или Вт·с.

Теперь, чтобы узнать денежный эквивалент стоимости теряемой на элементе энергии, достаточно полученное значение умножить на цену:

$$C_{we} = C_{price} \cdot E_w^{r^n}, \quad (6)$$

где C_{price} – цена (денежный эквивалент) единицы энергии, руб.

Если анализ проводится в энергетических эквивалентах, то значение C_{price} принимается равным 1.

На следующем этапе вычислений стоимостная оценка совокупных потерь энергии на конструктивном элементе системы суммируется со стоимостью самого конструктивного элемента. Данная стоимость подразумевается известной и может быть идентифицирована при выборе конструктивных параметров элемента:

$$C_{a_i}^{total} = C_{a_i} + C_{we}, \quad (7)$$

где $C_{a_i}^{total}$ – совокупные затраты ресурсов на создание и эксплуатацию конструктивного элемента системы комбинированного орошения; C_{a_i} – стоимостная оценка конструктивного элемента системы комбинированного орошения; C_{we} – стоимость энергетических потерь на конструктивном элементе системы в процессе эксплуатации.

На следующем этапе ведется комплексирование данных по схеме $[a_i; C_{a_i}^{total}; \Delta H_{a_i}; Q_{a_i}]$ и формирование матрицы таким образом организованных данных при i от 1 до I и a от 1 до A . Одновременно проводится оценка завершенности перебора по значению конструктивного параметра i и по параметру a . При завершении перебора матрица данных считается сформированной и пригодной для использования при решении оптимизационной задачи.

Решение оптимизационной задачи предполагает выбор таких конструктивных параметров элемента системы комбинированного орошения, при которых совокупные затраты ресурсов на его создание и эксплуатацию были бы минимальны:

$$a_i^{opt} = \min_{\substack{1 \leq a \leq A \\ 1 \leq i \leq I}} f(C_{a_i}^{total}), \quad (8)$$

где a_i^{opt} – оптимальные конструктивные параметры элементы системы комбинированного орошения.

Определенные в результате решения оптимизационной задачи конструктивные параметры элемента системы комбинированного орошения являются итогом выполнения алгоритма. Наряду с ними, алгоритм предполагает возможность использования матрицы данных, включающей верифицированные для каждого конструктивного параметра значения потерь напора, расхода оросительной воды и совокупных затрат ресурсов на создание и эксплуатацию элемента системы комбинированного орошения.

Выводы. Предложенный алгоритм позволяет автоматизировать часть наиболее трудоёмких вычислительных процессов при проектировании систем комбинированного орошения. Алгоритм ориентирован на создание оптимизированных технических систем, причем решение оптимизационной задачи предполагает определение ряда показателей, учитывающих весь жизненный цикл конструктивных элементов.

Библиографический список

1. Абдуллаев Э. А. Интеллектуальная система проектировщика для автоматизации комплексного проектирования технических систем // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 7-3 (18-3). С. 261-264.
2. Алгоритм расчета систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды / С. Я. Семененко, М. Н. Лытов, А. Н. Чушкин, Е. И. Чушкина // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2017. № 4 (28). С. 20-36.
3. Информационно-технологическая поддержка гидравлических расчетов водозаборных сооружений оросительных систем / М. Р. Гонзалез-Гальего, А. А. Белоусов, Д. А. Нецепляев, В. И. Коржов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2019. № 4 (76). С. 154-160.
4. Клевцов С. И., Клевцов А. Б., Буринов С. В. Модель параметрической качественной иерархической оценки состояния технической системы // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3 (37). С. 20.
5. Лытов М. Н., Бородычев В. В. Функциональная технологическая модель оросительной системы // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 1 (53). С. 327-334.
6. Майер А. В., Захаров Ю. И., Криволуцкая Н. В. Универсальная многофункциональная система орошения для комбинированных способов полива // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2015. № 1 (37). С. 206-210.
7. Мелихова Е. В., Бородычев В. В., Рогачев А. Ф. Функционально-морфологический анализ и совершенствование технических средств комбинированного орошения // Мелиорация и водное хозяйство. 2018. № 4. С. 30-36.
8. Миронов А. Н., Лисицкий В. В., Столбов А. В. Математические основы решения многокритериальных оптимизационных задач синтеза сложных иерархических организационно-технических систем // Нелинейный мир. 2020. Т. 18. № 3. С. 5-17.
9. Повышение эффективности комбинированных способов орошения / А. С. Овчинников, М. Ю. Храбров, Н. Г. Колесова, С. В. Бородычев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 1 (53). С. 231-241.
10. Сафронова Т. И., Фияткин Д. А. Гидравлический расчет системы капельного орошения // StudNet. 2020. Т. 3. № 2. С. 143-147.
11. An integrated approach involving EMO and hydrus-2d software for SWRT-based precision irrigation / C. C. Tutum, A. K. Guber, K. Deb, A. Smucker, A. P. Nejadhashemi, B. Kiraz // IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2015. N15. P. 885-892.
12. Nalliah V., Sri Ranjan R. Evaluation of a capillary-irrigation system for better yield and quality of hot pepper (*Capsicum Annuum*) // Applied Engineering in Agriculture. 2010. V. 26. № 5. P. 807-816.
13. Oberholzer S., Hund A., Prasuhn V. Crop water use under swiss pedoclimatic conditions – evaluation of lysimeter data covering a seven-year period // Field Crops Research. 2017. V. 211. P. 48-65.
14. The standardization of intelligent computer systems as a key challenge of the current stage of development of artificial intelligence technologies / V. Golenkov, N. Guliakina, V. Golovko, V. Krasnoproshin // Open Semantic Technologies for Inteligent Systems. 2020. № 4. P. 73-88.

Conclusions. The proposed algorithm makes it possible to automate some of the most time-consuming computational processes in the design of combined irrigation systems. The algorithm is focused on the creation of optimized technical systems, and the solution of the optimization problem involves the determination of a number of indicators that take into account the entire life cycle of structural elements.

Reference

1. Abdullaev Je. A. Intellekual'naya sistema proektirovschika dlya avtomatizacii kompleksnogo proektirovaniya tehnikeskikh sistem // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika. 2015. T. 3. № 7-3 (18-3). P. 261-264.
2. Algoritm rascheta sistem kapel'nogo orosheniya s modulem Jlektrohimicheskoy aktivacii orositel'noj vody / S. Ya. Semenenko, M. N. Lytov, A. N. Chushkin, E. I. Chushkina // Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii. 2017. № 4 (28). P. 20-36.
3. Informacionno-tehnologicheskaya podderzhka gidravlicheskih raschetov vodozabornyh sooruzhenij orositel'nyh sistem / M. R. Gonzalez-Gal'ego, A. A. Belousov, D. A. Neceplyaev, V. I. Korzhov // Puti povysheniya Jffektivnosti oroshaemogo zemledeliya. 2019. № 4 (76). P. 154-160.
4. Klevcov S. I., Klevcov A. B., Burinov S. V. Model' parametricheskoy kachestvennoj ierarhicheskoy ocenki sostoyaniya tehnikeskoy sistemy // Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. № 3 (37). P. 20.
5. Lytov M. N., Borodychev V. V. Funkcional'naya tehnologicheskaya model' orositel'noj sistemy // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2019. № 1 (53). P. 327-334.
6. Majer A. V., Zaharov Yu. I., Krivoluckaya N. V. Universal'naya mnogofunkcional'naya sistema orosheniya dlya kombinirovannyh sposobov poliva // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2015. № 1 (37). P. 206-210.
7. Melihova E. V., Borodychev V. V., Rogachev A. F. Funkcional'no-morfologicheskij analiz i sovershenstvovanie tehnikeskikh sredstv kombinirovannogo orosheniya // Melioraciya i vodnoe hoz'yajstvo. 2018. № 4. P. 30-36.
8. Mironov A. N., Lisickij V. V., Stolbov A. V. Matematicheskie osnovy resheniya mnogokriterial'nyh optimizacionnyh zadach sinteza slozhnyh ierarhicheskikh organizacionno-tehnikeskikh sistem // Nelinejnyj mir. 2020. T. 18. № 3. P. 5-17.
9. Povyshenie Jffektivnosti kombinirovannyh sposobov orosheniya / A. S. Ovchinnikov, M. Yu. Hrabrov, N. G. Kolesova, S. V. Borodychev // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2019. № 1 (53). P. 231-241.
10. Safronova T. I., Fiyatkin D. A. Gidravlicheskij raschet sistemy kapel'nogo orosheniya // StudNet. 2020. T. 3. № 2. P. 143-147.
11. An integrated approach involving EMO and hydrus-2d software for SWRT-based precision irrigation / C. C. Tutum, A. K. Guber, K. Deb, A. Smucker, A. P. Nejadhashemi, B. Kiraz // IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2015. N15. P. 885-892.
12. Nalliah V., Sri Ranjan R. Evaluation of a capillary-irrigation system for better yield and quality of hot pepper (Capsicum Annuum) // Applied Engineering in Agriculture. 2010. V. 26. № 5. P. 807-816.
13. Oberholzer S., Hund A., Prasuhn V. Crop water use under swiss pedoclimatic conditions – evaluation of lysimeter data covering a seven-year period // Field Crops Research. 2017. V. 211. P. 48-65.
14. The standardization of intelligent computer systems as a key challenge of the current stage of development of artificial intelligence technologies / V. Golenkov, N. Guliakina, V. Golovko, V. Krasnoproshin // Open Semantic Technologies for Intelegent Systems. 2020. № 4. P. 73-88.

Информация об авторах:

Borodychev Viktor Vladimirovich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the Volgograd Branch of the Federal State Budget Scientific Institution All-Russian Scientific Research Institute of Hydrotechnics and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova (400002, Volgograd, Timiryazev St., 9), Doctor of Agricultural Sciences, Professor.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0279-8090>. E-mail: vkovniigim@yandex.ru

Lytov Michail Nikolaevich, Leading Researcher, Volgograd Branch of the Federal State Budget Scientific Institution All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation A.N. Kostyakova (400002, Volgograd, Timiryazev St., 9), Candidate of Agricultural Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825> LytovMN@yandex.ru

Информация об авторах:

Бородычев Виктор Владимирович, академик РАН, директор Волгоградского филиала федерального государственного бюджетного научного учреждения Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова (400002, г. Волгоград, ул. Тимирязева, 9), доктор сельскохозяйственных наук, профессор.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0279-8090>. **E-mail:** vkovniigim@yandex.ru

Лытов Михаил Николаевич, ведущий научный сотрудник Волгоградского филиала федерального государственного бюджетного научного учреждения Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова (400002, г. Волгоград, ул. Тимирязева, 9), кандидат сельскохозяйственных наук,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2743-9825> LytovMN@yandex.ru