МЕЛИОРАЦИЯ, РЕКУЛЬТИВАЦИЯ И ОХРАНА ЗЕМЕЛЬ

Научная статья

УДК 631.672.4:519.688

doi: 10.31774/2222-1816-2021-11-1-129-146

К определению количественных параметров гидравлической модели систем комбинированного орошения на основе алгоритмизации компьютерных вычислений

Михаил Николаевич Лытов

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова (Волгоградский филиал), Волгоград, Российская Федерация, LytovMN@yandex.ru

Аннотация. Цель: разработка компьютерного алгоритма для количественной оценки гидравлических параметров гидромелиоративной системы с возможностью комплексирования разных способов полива. **Материалы и методы.** В основу проектирования конструкций комбинированного орошения положен гидравлический расчет. Особенностью таких систем является возможность смены способов полива, что связано с существенным изменением гидравлических параметров и усложнением гидравлического расчета конструкций. Автоматизация гидравлических расчетов на основе универсального компьютерного алгоритма является наиболее приемлемым способом решения проблемы и основой проектирования систем комбинированного орошения. **Результаты.** Особенностью предложенного алгоритма определения количественных параметров системы комбинированного орошения является использование пошагового подхода с последующим формированием обобщенного гидравлического скрина всей конструкции. Под скрином гидравлических параметров здесь подразумевается количественная оценка гидравлических показателей для всех узловых точек конструкции, реализованная расчетным методом при заданных, стационарных режимах функционирования системы. Набор такого рода статических скринов позволяет оценить процесс в динамике, а также проводить сравнительные оценки гидравлических параметров при разных режимах работы системы комбинированного орошения. Алгоритм предлагает оригинальный способ идентификации объектов, основанный на использовании системы линейных координат. Способ позволяет организовать перебор конструктивных элементов системы и пошаговый расчет гидравлических параметров от входного сечения расчетного сегмента до любой заданной узловой точки. **Выводы.** Результаты расчета по предложенному алгоритму позволяют сформировать особым образом организованный массив данных, который представляет собой набор символично-числовых значений, определяющих уровень напора и расход воды и идентифицирующих их с узловой точкой системы.

Ключевые слова: комбинированное орошение, гидравлическая модель, автоматизация вычислений, система идентификации объектов, алгоритм

LAND RECLAMATION, RECULTIVATION AND LAND PROTECTION

Original article

Determining the quantitative parameters of the hydraulic model of combined irrigation systems based on the computer calculations algorithmization

Mikhail N. Lytov

All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (Volgograd branch), Volgograd, Russian Federation, LytovMN@yandex.ru

Abstract. Purpose: development of a computer algorithm for a quantitative assessment of the hydraulic parameters of an irrigation and drainage system with the possibility of integrating different irrigation methods. **Materials and methods.** The design of structures for combined irrigation is based on hydraulic calculation. A feature of such systems is the ability to change irrigation methods, which is associated with a significant change in hydraulic parameters and the complication of hydraulic design of structures. Automation of hydraulic calculations based on a universal computer algorithm is the most acceptable way to solve the problem and the basis for designing combined irrigation systems. **Results.** A feature of the proposed algorithm for determining the quantitative parameters of the combined irrigation system is the use of a step-by-step approach followed by the formation of a generalized hydraulic screenshot of the entire structure. A screenshot of hydraulic parameters here means a quantitative assessment of hydraulic indicators for all nodal points of a structure, implemented by a calculation method for given, stationary modes of system operation. A set of this kind of static screenshots allows you to evaluate the process in dynamics, as well as to carry out comparative assessments of hydraulic parameters under different operating modes of the combined irrigation system. The algorithm offers an original way to identify objects based on the use of a linear coordinate system. The method makes it possible to organize an enumeration of the structural elements of the system and a step-by-step calculation of hydraulic parameters from the inlet section of the design segment to any given nodal point. **Conclusions.** The calculation results according to the proposed algorithm make it possible to form a specially organized data array, which is a set of symbolic-numeric values that determine the pressure level and water flow rate and identify them with the nodal point of the system.

Keywords: combined irrigation, hydraulic model, automation of calculations, object identification system, algorithm

Введение. Комплексный анализ различных способов и технологий орошения позволяет сделать обоснованный вывод о недостаточности любого из них для решения системных задач регулирования гидротермического режима агрофитоценоза и протекции посевов от климатических рисков [1–6]. Наиболее перспективным подходом здесь является комбинирование различных способов и технологий орошения для достижения комплексных целей [7–10]. Конструкции комбинированных систем орошения, предложенные учеными ВНИИГиМ, являются достаточно удачным примером реализации такого подхода [11–13]. Однако сегодня такие системы существуют только в формате экспериментальных проектов. Нет и адаптированной методики проектирования таких систем, учитывающей особенности комплексирования технологий. Решение этих задач связано с необходимостью моделирования гидравлических параметров комбинированной

системы орошения, поскольку гидравлический расчет был и остается базисным для проектирования любых гидромелиоративных систем.

Гидравлическая модель для конструкций комбинированного орошения с закрытой напорной водопроводящей сетью включает статику и динамику напорно-расходных характеристик на каждом участке водовода и функциональных элементов системы. Фактическое давление воды в каждой точке системы определяется рабочими характеристиками насосной системы при выбранных режимах работы и потерями напора в собственно конструктивных элементах системы. В свою очередь потери напора зависят от конструктива функциональных элементов системы и скорости движения воды, которая определяется расходными характеристиками в области выбранного сечения. Расходные характеристики в каждом сечении системы в общем случае зависят от конструктива и напорно-расходных характеристик водовыпусков, а также режимов их одновременного использования. При комбинированном орошении следует учитывать и режимы поочередного или совместного использования водовыпусков разного типа с их индивидуальными напорно-расходными характеристиками.

Материалы и методы. Определение расходов и потерь напора на каждом из участков системы является основной задачей, которую должен решать разрабатываемый алгоритм. В соответствии с общепринятыми методиками общие потери напора складываются из местных потерь напора и потерь напора по длине [14, 15]. Местные потери напора возникают в связи с изменением режимов течения воды и определяются в прямой взаимосвязи с конструктивом функционального элемента системы, где эти изменения и происходят. Как правило, величина местных потерь напора входит в состав технических характеристик конструктивно-функционального элемента системы, а для ряда случаев имеет стандартные методики расчета. Это точечные, узловые величины, которые входят в сумму общих потерь напора для соответствующих сегментов системы.

Величина потерь напора по длине имеет непрерывную, распределенную характеристику с не всегда линейными параметрами. Потери напора по длине не одинаковы для различных режимов потока воды, а также существенно зависят от скорости ее движения по водоводу. Режимы потока воды, в свою очередь, также зависят от скорости ее движения и еще ряда условий, в т. ч. материала и диаметра труб-водоводов, свойств и состояния самой транспортируемой жидкости. Но если принять материалы труб и свойства жидкости одинаковыми, что в целом характерно для комплексно проектируемой системы комбинированного орошения, то число параметров, которые будут определять изменение режима потока транспортируемой воды в трубопроводах, существенно сокращается. И наиболее существенным фактором вновь становится скорость движения транспортируемой воды в водоводах.

Скорость движения воды в трубопроводах определяется ее расходом по сечению и диаметром самого трубопровода. Отсюда следует, что изменение этого параметра, определяющего потери напора воды по длине водовода, происходит либо в узлах сопряжения водоводов системы с разным диаметром трубопровода, либо в узлах отбора влаги и ветвления потока. Потери напора по длине между этими узлами остаются постоянными, конечно, при условии неизменности упомянутых выше исходных условий.

Динамика гидравлических параметров системы комбинированного орошения определяется изменением кинематической вязкости оросительной воды под влиянием суточных и внутрисезонных колебаний температуры окружающей среды, изменением режимов работы насосной станции, изменением расхода воды из-за одновременного включения различного числа поливных модулей. Спецификой комбинированного орошения является также и возможность изменения расхода воды в поливном модуле в зависимости от режима совместной работы водовыпусков разного типа. В статике, при неизменных конструктивных параметрах системы комбинированного

орошения, напорно-расходные характеристики изменяются вдоль поливных водоводов, от водозабора и насосной станции до поливного трубопровода с водовыпусками включительно. Статический скрин гидравлических параметров представляет собой набор напорно-расходных характеристик для любой координатной точки системы комбинированного орошения. При этом динамика процесса может быть отражена последовательностью статических скринов, снимаемых с любым заданным интервалом.

Результаты и обсуждение. Для описания статических скринов гидравлической модели системы комбинированного орошения необходимо выбрать систему координат, относительно которых эти данные могут быть представлены. В общем виде система представлена сетью напорных водоводов с расположенными на них различными гидравлическими устройствами и сооружениями, регулирующими транспорт и распределение оросительной воды. Координаты для такого рода объектов могут быть заданы в линейной системе. Для этого необходимо идентифицировать протяженный объект и задать на нем точку в любой удобной форме:

$$X(ID, l),$$

где ID – идентификатор линейного объекта;

l – расстояние от начала протяженного объекта до искомой точки,

или:

$$X(ID, t),$$

где t – характеристическое наименование, позволяющее верифицировать точечную координату на идентифицированном протяженном объекте.

Идентификатором протяженного объекта системы комбинированного орошения может быть порядковый номер (уровень) водовода, нумеруемый, например, от насосной станции или с головного устройства какого-либо сегмента системы, для которого строится модель. На идентифицированном протяженном объекте координата может быть задана метрически (расстоянием от начала объекта) либо по номеру узловой точки, в которой

меняются конструктивные (узел сопряжения) либо расходные характеристики (узел ветвления) протяженного объекта. Первый способ позволяет найти напорно-расходную дата-пару для любой точки системы, тогда как второй дает скрин только по узловым точкам. Однако на практике важно знать напорно-расходные характеристики именно в узловых, характеристических точках, которые и дают представление о работе системы. В этом случае при определении напорно-расходных дата-пар по координатам, заданным метрически, необходимо выполнение дополнительных манипуляций, чтобы верифицировать соответствие с узловой точкой. При использовании второго способа в таких вычислениях необходимость отпадает, а напорно-расходные характеристики между узловыми точками с учетом линейности процесса могут быть легко восстановлены.

Таким образом, для задания координаты на любой, как угодно распределенной сети комбинированного орошения необходимо указать порядковый уровень водовода и наименование (порядковый номер) узловой точки, для которой вычисляется искомая дата-пара (рисунок 1).

Для компьютерных вычислений эта координата может быть представлена в виде имени (*name*), заданного последовательностью идентифицирующих чисел. При этом возникает еще одна проблема, ведь, строго говоря, порядковый уровень водовода не может идентифицировать искомый протяженный объект, так как водопроводов определенного уровня может быть несколько. Имя же координаты должно дать исчерпывающую информацию для гарантированной идентификации объекта. С учетом этих требований была предложена следующая схема формирования числового имени координаты:

- порядковый уровень водовода определяется порядковым номером числа, расположенного в числовой последовательности;
- 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 характеризует узел ветвления потока на первом из рассматриваемого сегмента водоводе системы (магистральном трубопроводе, если модель предполагает охват оросительной системы в целом). 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. Такой подход дает возможность гарантированно идентифицировать водовод как искомый протяженный объект в системе линейных координат. Число 4 указывает на узел ветвления потока номер 4 в водоводе третьего уровня, присоединенного к узлу 5 ветвления потока на водоводе второго уровня. И наконец, число 12 дает окончательное представление об искомой координате, определяя ее как двенадцатую узловую точку (последнее число в числовой последовательности имени может указывать как на узел ветвления потока, так и на узел сопряжения, характеризуемый изменением каких-либо конструктивных параметров самого водовода) водовода четвертого уровня, присоединенного в узле 4 к водоводу третьего уровня, который в свою очередь в узле 5 соединен с водоводом второго уровня, присоединенным в узле 1 к водоводу первого уровня. Таким образом, имя координаты дает полное представление о пути от входного сечения рассматриваемого сегмента оросительной системы до любой заданной узловой точки на системе комбинированного орошения.

Используемая схема формирования имени координаты на машинном языке дает удобные инструменты для организации перебора координат с целью формирования полного скрина напорно-расходных характеристик системы комбинированного орошения. Перебор координат начинается с водовода самого высокого уровня с последовательным переходом на водоводы второго и последующих уровней. Соответственно, в начале перебора имя имеет самую короткую запись (одно число) со значениями номера узловой точки на первом водоводе сегмента оросительной системы, для которого составляется модель. Затем к имени прибавляется еще одна числовая запись, обозначающая водоводы второго уровня. Перебор последовательно ведется уже по паре чисел: поочередно меняются номера узловых точек на водоводе второго уровня, присоединенном к первой узловой

точке водовода первого уровня, после чего тот же перебор осуществляется для водовода, присоединенного ко второй узловой точке водовода первого уровня, и т. д. Процедура повторяется, пока расчетом не будут охвачены все узловые точки системы (или сегмента оросительной системы, для которого производится расчет).

Следующей важной задачей для создания статического скрина гидравлической модели системы комбинированного орошения является определение расхода оросительной воды в заданной координатой точке. Расход воды по заданному сечению определяется суммарным расходом всех водовыпусков, установленных и задействованных после сечения. Для решения данной задачи необходимо определить все водовыпуски, установленные на ветке оросительной системы после сечения, а также выявить, какие из них задействованы, а какие нет. Верифицированные по известным напорно-расходным характеристикам параметры производительности задействованных водовыпусков направляются в интегратор, где и вычисляется искомая величина.

Базисным ядром вычислений, проводимых для определения расхода воды по произвольно заданному сечению, является алгоритм перебора координат с ограничениями. Ограничения включают следующее:

- перебор координат должен проводиться только в пределах той ветки оросительной системы, которая расположена после расчетного сечения. Это требование обеспечивается фиксацией параметров имени расчетной координаты при организации процедуры перебора координат. Допустим, имя расчетного сечения «*name_3:5:2*». Параметры этого имени при переборе N -мерного массива фиксируются и остаются неизменными («*name_3:5:2:...r(N-1):rN*»);

- в перебор должны быть включены только те координаты, которые соответствуют водоводам последнего уровня. Это требование определяется тем, что водоводы последнего уровня являются поливными, а располо-

женные на них узловые точки (узлы ветвления потока) являются водовыпусками. Это означает, что имя любой координаты, участвующей в переборе, должно иметь параметр rN : «*name_r:r2:...rN*».

Ограниченный таким образом перебор координат позволяет учесть все водовыпуски, расположенные после произвольно заданной расчетной координаты. Для каждой координаты, участвующей в таком ограниченном переборе, производится процедура идентификации типа водовыпуска. Для идентификации типа водовыпуска по имени координаты необходима формула их расстановки на поливном трубопроводе. Предполагается, что эта формула известна и включена в состав исходных данных. Итогом этой процедуры является пара данных: координата и тип водовыпуска, позволяющий идентифицировать технические характеристики, а следовательно и напорно-расходную кривую устройства.

Следующим шагом необходимо узнать, задействован ли идентифицированный водовыпуск в технологическом процессе непосредственно в расчетное время (время скрина). Алгоритм решения этой задачи опирается на данные о режиме работы водовыпусков разного типа, а также на сведения о том, осуществляется ли полив на данном поливном модуле. Первый из указанных пакетов данных специфичен для систем комбинированного орошения, особенностью которых является использование для полива сразу нескольких, принципиально различающихся типов водовыпусков. Различия заключаются в реализации разных способов полива, направленных на преимущественное регулирование разных факторов жизни растений. При этом, даже если используются водовыпуски только двух типов, могут быть реализованы три комбинации включения: когда включен тип водовыпуска А, когда включен тип водовыпуска В и когда эти водовыпуски работают совместно.

Второй пакет данных формируется исходя из потребности в проведении полива на именно этом поливном модуле. Данные носят динамиче-

ский характер, но для рассматриваемого алгоритма также полагаются исходными. Следует учитывать, что комбинированное орошение предполагает реализацию разных способов полива, направленных на решение разных задач. А следовательно, и потребность в их проведении может возникать в разное время, а также иметь различную повторяемость.

Если идентифицированный для координаты водовыпуск не задействован в технологическом процессе, то выполнение дальнейших процедур расчета игнорируется, алгоритм возвращает счет к началу процедуры перебора координат с ограничениями. Цикл повторяется. Если водовыпуск включен, то для него извлекается необходимая техническая информация, в т. ч. сведения о производительности при заданных (рабочих) напорах. На выходе процедура предоставляет пару данных: координата и расход воды для данной узловой точки. Сведения о расходе на данном поливном водовыпуске заносятся в интегратор, а алгоритм инициирует новый цикл расчета с осуществлением процедуры ограниченного перебора координат.

Интегратор суммирует все поступившие сведения о расходе воды водовыпусками сегмента системы комбинированного орошения, располагающегося после расчетной узловой точки (сечения):

$$Q_{calc} = Q_{calc}^{name-1} + q(name_r^n),$$

где Q_{calc} – суммарный расход воды по расчетному сечению;

Q_{calc}^{name-1} – суммарный расход воды по расчетному сечению за предыдущую итерацию;

$q(name_r^n)$ – производительность водовыпуска, верифицированного по координате $name_r^n$.

По завершении полного цикла перебора координат в расчетном сегменте интегратор располагает данными о суммарном расходе воды для расчетного сечения системы комбинированного орошения на момент выполнения скрина.

Располагая данными о суммарном расходе, можно вычислить скорость течения воды для произвольно выбранного расчетного сечения системы комбинированного орошения. Для решения этой задачи алгоритм предлагает известное соотношение [14]:

$$V_{calc} = \frac{4 \cdot Q_{calc}}{\pi \cdot d_{name}^2},$$

где V_{calc} – расчетная скорость течения воды в заданном сечении водовода системы комбинированного орошения;

Q_{calc} – найденное значение расхода воды для заданного сечения водовода;

d_{name} – диаметр трубопровода в заданном сечении, соответствующем координате *name*.

Значение диаметра трубопровода d_{name} на уровне расчетной координаты полагается известным и включенным в массив исходных данных. Однако для выбора верного значения диаметра требуется процедура идентификации исходных данных по координате. Для этого, например, может быть использована информация об уровне водовода, извлекаемая из длины имени координаты *name*. Такая же процедура должна быть проведена для параметра l_{calc} , равного длине отрезка водовода между двумя смежными координатами: координатой расчетного сечения и предыдущей координатой по пути транспорта воды. Этот параметр необходим для определения потерь напора по длине для данного, расчетного, участка водовода. Для определения потерь напора по длине алгоритм предлагает известную расчетную формулу [15, 16]:

$$\Delta H_{calc}^{by\ length} = \lambda \cdot \frac{l_{calc} \cdot V_{calc}^2}{d_{name} \cdot 2g},$$

где $\Delta H_{calc}^{by\ length}$ – потери напора по длине расчетного участка водовода системы комбинированного орошения;

λ – значение коэффициента, характеризующего гидравлическое сопротивление по длине;

l_{calc} – длина расчетного участка водовода системы комбинированного орошения;

g – ускорение свободного падения, приблизительно равное $9,81 \text{ м/с}^2$.

Как мы уже отмечали, в основу принятой алгоритмом системы координат положены узловые точки, где характер течения воды изменяется. Это узлы ветвления потока или узлы сопряжения водоводов, водовыпуски, возможно, другие функциональные устройства. Эти устройства характеризуются собственным сопротивлением передвижению воды, которое определяет так называемые местные потери напора. Методики учета такого рода потерь напора разнообразны, есть достаточно сильная теоретическая база для моделирования местных сопротивлений [17], часто такие сведения включены в паспортные данные устройства, в других случаях используют эмпирические коэффициенты, устанавливающие пропорцию между местными потерями напора и по длине:

$$\Delta H_{calc}^{local} = k_{loc} \cdot \Delta H_{calc}^{by length},$$

где ΔH_{calc}^{local} – местные потери напора для расчетного узла;

k_{loc} – коэффициент пропорциональности между потерями напора по длине и местными потерями напора для расчетного узла;

$\Delta H_{calc}^{by length}$ – величина потерь напора по длине для расчетного участка.

На практике чаще используются последние два варианта расчета, которые и приведены для примера в предложенном алгоритме. Общие потери напора в пределах расчетного отрезка системы определяются суммой местных потерь напора и потерь напора по длине:

$$\Delta H_{calc}^{total} = \Delta H_{calc}^{by length} + (\Delta H_{calc}^{local}; \Delta H_{inputdata}^{local}),$$

где ΔH_{calc}^{total} – совокупные потери напора для расчетного участка трубопровода системы комбинированного орошения;

ΔH_{calc}^{local} – расчетная величина местных потерь напора;

$\Delta H_{inputdata}^{local}$ – паспортная величина местных потерь напора.

Совокупные значения потерь напора, определенные для участка системы комбинированного орошения, предшествующего расчетной координате и непосредственно включающего ее, позволяют определить фактический уровень давления воды в точке, этой координате соответствующей. Алгоритмом для решения этой задачи предусмотрено проведение процедуры пошагового вычитания потерь напора относительно координаты, предшествующей расчетной:

$$H_{name} = H_{(name-1)} - \Delta H_{calc}^{total},$$

где H_{name} – значение напора в точке, соответствующей расчетной координате;

$H_{(name-1)}$ – значение напора в узловой точке, предшествующей расчетной координате.

Эта процедура является последней в теле цикла расчетов, проводимых относительно заданной (расчетной) координаты системы комбинированного орошения. Значения напора в заданной расчетной точке, равно как и координаты этой точки, а также совокупный расход воды для соответствующего координате сечения по окончании этой процедуры направляются в блок формирования массива данных. Одновременно иницируется новый цикл расчетов для следующей координаты системы.

Формируемый массив данных представляет собой набор символьно-числовых значений, определяющих уровень напора и расход воды и идентифицирующих их с именем координаты. Данные в массив записываются последовательно, в соответствии с реализуемым алгоритмом перебора координат.

Вывод данных может осуществляться в символьном или графическом формате. Последний реализует возможность построения геоориенти-

рованного графа системы комбинированного орошения по известным координатам с указанием уровней напора и расхода воды.

Выводы. В результате исследований предложен алгоритм для компьютерного моделирования гидравлических параметров систем комбинированного орошения. Алгоритм реализует принцип статических скринов гидравлических параметров системы. Статические скрины можно осуществлять с любым интервалом времени, что позволяет оценить динамику процесса при изменяющихся внешних условиях. Алгоритм имеет встроенную оригинальную систему идентификации объектов, позволяющую не только однозначно верифицировать заданные узловые сечения, но и организовать последовательный перебор узловых точек в соответствии с архитектурой построения гидромелиоративной системы. Предложенный алгоритм позволяет определить напорно-расходные характеристики системы комбинированного орошения с известными (заданными) конструктивными параметрами для любого, произвольно заданного, сечения или выполнить полный скрин гидравлических параметров системы расчетными методами.

Список использованных источников

1 Закономерности энергомассообмена в среде «почва – растение – атмосфера» в современных климатических и хозяйственных условиях использования орошения / О. И. Жовтоног, Л. А. Филиппенко, В. В. Полищук, А. Ф. Салюк, А. В. Хоменко // Мелиорация и водное хозяйство. – 2018. – № 2(108). – С. 19–28. – DOI: 10.31073/mivg20180108-132.

2 Сатункин, И. В. Эффективность перспективных способов и техники полива картофеля при различных режимах орошения на Южном Урале / И. В. Сатункин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2020. – № 2(82). – С. 92–97.

3 Mirgol, B. Modelling climate change impact on irrigation water requirement and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.), barley (*Hordeum vulgare* L.), and fodder maize (*Zea mays* L.) in the semi-arid Qazvin plateau, Iran / B. Mirgol, M. Nazari, M. Eteghadipour // Agriculture. – 2020. – Vol. 10, № 3. – P. 60. – DOI: 10.3390/agriculture10030060.

4 Coping with drought: root trait variability within the perennial grass *Dactylis glomerata* captures a trade-off between dehydration avoidance and dehydration tolerance / P. Bristiel, F. Volaire, C. Roumet, C. Violle // Plant and Soil. – 2019. – Vol. 434, № 1–2. – P. 327–342. – DOI: 10.1007/s11104-018-3854-8.

5 Surge-flow alternate furrow irrigation for enhancing water productivity in semiarid regions / B. Krishna Rao, P. R. Bhatnagar, T. Kamble, R. S. Kurothe, P. K. Mishra, R. Shar-

ma, A. Kumar, V. C. Pande // Indian Journal of Agricultural Sciences. – 2019. – Vol. 89, № 12. – P. 1999–2002.

6 Лытов, М. Н. Агрофитоценоз как объект управления гидротермическим режимом в условиях орошения / М. Н. Лытов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2019. – № 4(76). – С. 9–14.

7 Бородычев, В. В. Техничко-технологические основы регулирования гидротермического режима агрофитоценоза в условиях орошения / В. В. Бородычев, М. Н. Лытов // Научная жизнь. – 2019. – Т. 14, № 10(98). – С. 1484–1495. – DOI: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1484-1495.

8 Piri, H. Effect of different levels of water, applied nitrogen and irrigation methods on yield, yield components and IWUE of onion / H. Piri, A. Naserin // Scientia Horticulturae. – 2020. – Vol. 268. – № 109361. – DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109361.

9 Shahrokhnia, M. H. Safflower model for simulation of growth and yield under various irrigation strategies, planting methods and nitrogen fertilization / M. H. Shahrokhnia, A. R. Sepaskhah // International Journal of Plant Production. – 2017. – Vol. 11, № 1. – P. 167–192. – DOI: 10.22069/IJPP.2017.3316.

10 Field assessment of surge and continuous furrow irrigation methods in relation to tillage systems / M. A. Mattar, M. A. El-Saadawy, M. A. Helmy, H. M. Sorour // International Agrophysics (Lublin). – 2017. – Vol. 31, № 2. – P. 219–230. – DOI: 10.1515/intag-2016-0039.

11 Система комбинированного орошения / В. В. Бородычев, М. Ю. Храбров, В. К. Губин, Н. Г. Колесова, Т. С. Акимова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2016. – № 1(41). – С. 201–210.

12 Система комбинированного орошения и эффективность производства овощной продукции / Н. Н. Дубенок, А. В. Майер, В. М. Гуренко, С. В. Бородычев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – № 2(54). – С. 253–265. – DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-31.

13 Мелихова, Е. В. Функционально-морфологический анализ и совершенствование технических средств комбинированного орошения / Е. В. Мелихова, В. В. Бородычев, А. Ф. Рогачев // Мелиорация и водное хозяйство. – 2018. – № 4. – С. 30–36.

14 Михайлов, Г. И. Построение продольных профилей и расчет водотоков мелиоративной системы: метод. указания / Г. И. Михайлов. – Горки: БГСХА, 2014. – 28 с.

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

16 Егорова, С. В. Мелиорация земель / С. В. Егорова. – Брянск: Брян. гос. инж.-технол. акад., 2010. – 169 с.

17 Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

References

1 Zhovtonog O.I., Filippenko L.A., Polishchuk V.V., Salyuk A.F., Khomenko A.V., 2018. *Zakonomernosti energomassobmena v srede "pochva – rastenie – atmosfera" v sovremennykh klimaticheskikh i khozyaystvennykh usloviyakh ispol'zovaniya orosheniya* [Patterns of energy-mass exchange in soil-plant-atmosphere environment under current climatic and economic conditions for irrigation]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Irrigation and Water Management], no. 2(108), pp. 19-28, DOI: 10.31073/mivg20180108-132. (In Russian).

2 Satunkin I.V., 2020. *Effektivnost' perspektivnykh sposobov i tekhniki poliva kartofelya pri razlichnykh rezhimakh orosheniya na Yuzhnom Urale* [Efficiency of promising

methods and techniques for watering potatoes under various irrigation regimes in the South Urals]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Orenburg State Agrarian University], no. 2(82), pp. 92-97. (In Russian).

3 Mirgol B., Nazari M., Eteghadipour M., 2020. Modelling climate change impact on irrigation water requirement and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.), barley (*Hordeum vulgare* L.), and fodder maize (*Zea mays* L.) in the semi-arid Qazvin plateau, Iran. *Agriculture*, vol. 10, № 3, p. 60, DOI: 10.3390/agriculture10030060.

4 Bristiel P., Volaire F., Roumet C., Violle C., 2019. Coping with drought: root trait variability within the perennial grass *Dactylis glomerata* captures a trade-off between dehydration avoidance and dehydration tolerance. *Plant and Soil*, vol. 434, no. 1-2, pp. 327-342, DOI: 10.1007/s11104-018-3854-8.

5 Krishna Rao B., Bhatnagar P.R., Kamble T., Kurothe R.S., Mishra P.K., Sharma R., Kumar A., Pande V.C., 2019. Surge-flow alternate furrow irrigation for enhancing water productivity in semiarid regions. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, vol. 89, no. 12, pp. 1999-2002.

6 Lytov M.N., 2019. *Agrofitotsenoz kak ob"ekt upravleniya gidrotermicheskim rezhimom v usloviyakh orosheniya* [Agrophytocenosis as an object of hydrothermal regime control under irrigation conditions]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 4(76), pp. 9-14. (In Russian).

7 Borodychev V.V., Lytov M.N., 2019. *Tekhniko-tekhnologicheskiye osnovy regulirovaniya gidrotermicheskogo rezhima agrofitotsenoz v usloviyakh orosheniya* [Technical and technological bases for regulating the hydrothermal agrophytocenosis regime under irrigation conditions]. *Nauchnaya zhizn'* [Scientific Life], vol. 14, № 10(98), pp. 1484-1495, DOI: 10.35679/1991-9476-2019-14-10-1484-1495. (In Russian).

8 Piri H., Naserin A., 2020. Effect of different levels of water, applied nitrogen and irrigation methods on yield, yield components and IWUE of onion. *Scientia Horticulturae*, vol. 268, no. 109361, DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109361.

9 Shahrokhnia M.H., Sepaskhah A.R., 2017. Safflower model for simulation of growth and yield under various irrigation strategies, planting methods and nitrogen fertilization. *International Journal of Plant Production*, vol. 11, no. 1, pp. 167-192, DOI: 10.22069/IJPP.2017.3316.

10 Mattar M.A., El-Saadawy M.A., Helmy M.A., Sorour H.M., 2017. Field assessment of surge and continuous furrow irrigation methods in relation to tillage systems. *International Agrophysics (Lublin)*, vol. 31, no. 2, pp. 219-230, DOI: 10.1515/intag-2016-0039.

11 Borodychev V.V., Khrabrov M.Yu., Gubin V.K., Kolesova N.G., Akimova T.S., 2016. *Sistema kombinirovannogo orosheniya* [Combined irrigation system]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Bulletin of Nizhnevolzhsky Agricultural University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 1(41), pp. 201-210. (In Russian).

12 Dubenok N.N., Mayer A.V., Gurenko V.M., Borodychev S.V., 2019. *Sistema kombinirovannogo orosheniya i effektivnost' proizvodstva ovoshchnoy produktsii* [Combined irrigation system and efficiency of vegetable production]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Bulletin of Nizhnevolzhsky Agricultural University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 2(54), pp. 253-265, DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-31. (In Russian).

13 Melikhova E.V., Borodychev V.V., Rogachev A.F., 2018. *Funktsional'nomo-rfologicheskii analiz i sovershenstvovanie tekhnicheskikh sredstv kombinirovannogo orosheniya* [Functional-morphological analysis and improvement of technical means of combined irrigation]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Irrigation and Water Economy], no. 4, pp. 30-36. (In Russian).

14 Mikhailov G.I., 2014. *Postroyeniye prodol'nykh profiley i raschet vodotokov meliorativnoy sistemy: metod. ukazaniya* [Construction of longitudinal profiles and calculation of

watercourses of the reclamation system: method. instructions]. Gorki, BGSKhA Publ., 28 p. (In Russian).

15 Schedrin V.N., Kolganov A.V., Vasiliev S.M., Churaev A.A., 2013. *Orositel'nye sistemy Rossii: ot pokoleniya k pokoleniyu* [Irrigation Systems in Russia: From Generation to Generation]. In 2 parts. Pt. 2. Novocherkassk, Helikon Publ., 307 p. (In Russian).

16 Egorova S.V., 2010. *Melioratsiya zemel'* [Land Reclamation]. Bryansk, Bryansk State Engineer Technological Academy, 169 p. (In Russian).

17 Idelchik I.E., 1992. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of Hydraulic Resistance]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 672 p. (In Russian).

Лытов Михаил Николаевич

Ученая степень: кандидат сельскохозяйственных наук

Ученое звание: доцент

Должность: ведущий научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова» (Волгоградский филиал)

Адрес организации: ул. Тимирязева, д. 9, г. Волгоград, Российская Федерация, 400002

E-mail: LytovMN@yandex.ru

Lytov Mikhail Nikolayevich

Degree: Candidate of Agricultural Sciences

Title: Associate Professor

Position: Leading Researcher

Affiliation: All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (Volgograd branch), Volgograd, Russian Federation

Affiliation address: st. Timiryazeva, 9, Volgograd, Russian Federation, 400002

E-mail: LytovMN@yandex.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.12.2020; одобрена после рецензирования 27.01.2021; принята к публикации 05.02.2021.

The article was submitted 01.12.2020; approved after reviewing 27.01.2021; accepted for publication 05.02.2021.