А. С. Штанько, В. Н. Шкура

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

РАСЧЕТ СРЕДНЕГО ДИАМЕТРА И ОБЪЕМА КОНТУРА КАПЕЛЬНОГО УВЛАЖНЕНИЯ ПОЧВ

Цель исследования – разработка методики определения среднего диаметра и объема контура увлажнения, формируемого в почвенном пространстве при капельном поливе. Объектом исследования являются контуры капельного увлажнения почвы. Предмет исследования – расчетные зависимости и основанная на них методика расчета среднего диаметра и объема влажностных контуров, формируемых в различных почвенных условиях. В процессе разработки методики расчета была выдвинута рабочая гипотеза о возможности определения объема контура увлажнения путем приведения его к форме цилиндра. Диаметр данного цилиндра равен среднему диаметру контура увлажнения, который возможно определить по известным значениям глубины и максимального диаметра контура капельного увлажнения. Условием реализации выдвинутой рабочей гипотезы является наличие функциональных связей между средним и максимальным диаметром контура и между средним диаметром и глубиной контура. В рамках исследования установлено наличие искомых функциональных связей и получены системы экспериментальных зависимостей, позволяющих определить величину среднего диаметра контура по известным значениям максимального диаметра и глубины контура для широкого диапазона изменения таких почвенных характеристик, как содержание в почве глинистых частиц и ее наименьшая влагоемкость. В результате исследований предложена методика для определения среднего диаметра и объема контура увлажнения, основанная на опытных данных авторов и апробированная на данных специалистов в области капельного орошения. Полученные зависимости адекватно (с точностью до 12 %) описывают искомые функциональные связи и рекомендуются для практических расчетов в соответствующих диапазонах почвенных показателей.

Ключевые слова: капельное орошение, контур увлажнения, размеры контура, объем контура, почвенные характеристики, методика расчета.

A. S. Shtanko, V. N. Shkura

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

CALCULATION OF A MEAN DIAMETER AND SOIL MOISTURE CONTOUR VOLUME UNDER DRIP IRRIGATION

The purpose of the research is to develop a technique of determination of a mean diameter and volume of soil moisture contour formed in soil space under drip irrigation. The object of the study is soil drip moistening contours. The subject of the study is the calculated dependencies and the methodology for calculating the average diameter and volume of moisture contours formed under different soil conditions based on these dependences. The working hypothesis on the possibility for determining the volume of soil moisture contour by bringing it to the cylinder shape was proposed during the calculation methodology

development. The diameter of the given cylinder is equal to the moisture contour mean diameter which can be determined on the known values of the depth and maximum diameter of the moisture contour under drip irrigation. The condition for the implementation of the proposed working hypothesis is the existence of functional links between the mean and maximum diameter of the contour and between the average diameter and the depth of the contour. Within the framework of the research the availability of the required functional relations was found and experimental dependencies systems were obtained that allows to determine the mean diameter value of the contour according to the known values of the maximum diameter and depth of the contour for a wide range of changes in soil characteristics such as the clay particles content in soil and its lowest moisture capacity. As a result of the research, a methodology for determining the mean diameter and volume of moisture contour, based on the experimental data of the authors and tested on the data from specialists in the field of drip irrigation was proposed. The obtained dependences describe the desired functional relationships adequately (with an accuracy of 12 %) and are recommended for practical calculations in the corresponding ranges of soil indicators.

Key words: drip irrigation, moisture contour, contour dimensions, contour volume, soil characteristics, calculation methodology.

Введение. Контурные капельного увлажнения почвенного пространства имеют сложное внешнее очертание, что представляет определенные трудности для математического описания ограничивающих их линий и для определения объемов увлажняемой почвенной толщи.

В реальной практике при решении задачи по определению объемов зон капельного увлажнения прибегают к аппроксимации форм контуров – приведению их к относительно простым расчетным или математически описываемым формам, примеры которых представлены в работах О. Е. Ясони-ди, А. Д. Ахмедова, А. С. Овчинникова, О. Н. Карпенко, М. К. Гаджиева, В. С. Бочарникова, М. И. Ромащенко, М. Ю. Храброва, А. В. Шуравилина, В. В. Бородычёва и др. При этом чаще всего за основу принималось сечение контура вертикальной плоскостью, проходящей через ось капания, а пространственная форма контура рассматривалась как форма тела вращения этого сечения вокруг его вертикальной оси. Известен ряд предложений по аналитическому определению объемов контуров капельного увлажнения, учитывающих их аппроксимированную форму (В. Н. Шкура, Д. Л. Обумахов, А. Н. Рыжаков, М. Ю. Храбров, Е. В. Мелихова и др.). Несмотря на это в реальной практике при определении объемов контуров капельного увлажнения специалисты испытывают определенные трудно-

сти, что требует поиска новых, более простых и более точных решений поставленной задачи.

Наиболее просто определить объем контура приведением его сложнопровостранственной формы к более простой форме цилиндра (рисунок 1).

$h_{\text{кон}}$ – глубина контура капельного увлажнения; $d_{\text{ср}}$ – средний по глубине диаметр контура увлажнения; $d_{\text{кон}}$ – максимальный диаметр контура увлажнения;
 $d_{\text{пов}}$ – поверхностный диаметр контура увлажнения

Рисунок 1 – Схемы аппроксимированного (а) и приведенного к форме цилиндра (б) контуров капельного увлажнения почв

Данный подход принят в качестве рабочей гипотезы нижеописанного исследования. При предложенном подходе к определению объемов контуров необходимо предварительно установить величины среднего по глубине диаметра $d_{\text{ср}}$ и глубины контура капельного увлажнения почвы $h_{\text{кон}}$. Глубина контура соответствует заданной глубине зоны увлажнения и определяется по зависимостям, учитывающим почвенные и технологические параметры капельного полива. Определение среднего диаметра контура представляет собой трудоемкую задачу, на поиск путей решения которой направлено настоящее исследование. Конечной целью его является разработка методики определения среднего диаметра и объема контура увлажнения, формируемого в почве при капельном поливе.

Материалы и методы. При обосновании и разработке методики определения величины среднего диаметра контура капельного увлажнения подкапельного почвенного пространства использованы авторские опытные данные измерений контуров капельного увлажнения почвы, совместно полученные Д. Л. Обумаховым и В. Н. Шкурой [1], а также известные опубликованные данные А. С. Овчинникова, В. С. Бочарникова и М. П. Мещерякова [2], О. Е. Ясониди [3], А. М. Олейника и М. К. Гаджиева [4], М. К. Гаджиева [5], А. Д. Ахмедова и Е. Ю. Галиуллиной [6], Ю. С. Уржумовой [7], О. Н. Карпенко [8], В. И. Торбовского [9], М. И. Ромащенко [10] и других специалистов в области капельного орошения растений. Всего было собрано и обработано 46 контуров, сформировавшихся и зафиксированных в разных почвенных и технологических условиях проведения капельных поливов. В качестве определяющих процесс формирования и трансформации контуров почвенных факторов приняты содержание глинистых частиц в почве $W_{г/ч}$ в процентах от массы сухой почвы (% МСП) и наименьшая влагоемкость почвы $W_{нв}$, % МСП, определяемые по всей зоне увлажнения почвенного пространства. Технологические параметры капельного полива (поливная норма, расход капельниц и продолжительность полива) фиксировались по каждому контуру и изменялись в достаточно широких диапазонах. При этом предварительным анализом было установлено, что их влияние на исследуемый параметр (соотношение между средним и максимальным диаметром и глубиной контура) незначительно, что позволило в дальнейшем анализе его не учитывать.

Методика обработки выбранных к рассмотрению очертаний контуров (их сечений вертикальной плоскостью, проходящей через ось капания) предусматривала проведение нижеследующих технологических операций:

- вычерчивание вертикальных сечений контуров капельного увлажнения почвы в одинаковых горизонтальном и вертикальном масштабах;

- определение глубины $h_{\text{кон}}$ и максимального диаметра $d_{\text{кон}}$ контуров увлажнения почвы по их внешнему очертанию (их внешним границам);

- определение площади вертикального сечения контура (т. е. «вертикальной площади» контура увлажнения) посредством планиметра (по соответствующей условиям и методике его применения инструкции);

- по определенной планиметрированием вертикальной площади контура увлажнения $(\omega_{\text{кон}})_{\text{верт}}$ (м^2) и измеренной высоте контура $h_{\text{кон}}$ (м) (допуская приведение сложной формы контура к прямоугольнику) устанавливали средний диаметр контура увлажнения $d_{\text{ср}}$ (м) по зависимости:

$$d_{\text{ср}} = (\omega_{\text{кон}})_{\text{верт}} / h_{\text{кон}};$$

- определение значений $d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}}$ и $d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}}$ с фиксацией величин, характеризующих почвенные условия эксперимента ($W_{\text{г/ч}}$ и $W_{\text{НВ}}$);

- комплектация данных в виде функциональных соотношений (связей) $d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}} = f_1(W_{\text{г/ч}})$, $d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}} = f_2(W_{\text{НВ}})$, $d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}} = f_3(W_{\text{г/ч}})$ и $d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}} = f_4(W_{\text{НВ}})$ и получение соответствующих экспериментальных зависимостей, адекватно описывающих искомые связи по указанным соотношениям;

- определение расчетных значений среднего диаметра контура капельного увлажнения почвы с использованием полученных зависимостей.

Результаты и обсуждение. На первом этапе исследований было рассмотрено наличие функциональных связей между величинами среднего диаметра контура $d_{\text{ср}}$ и его глубиной $h_{\text{кон}}$ для различных почвенных условий. В результате обработки собственных опытных данных и известных данных по контурам капельного увлажнения, сформированным в различных по гранулометрическому составу почвах при капельном поливе, установлено наличие функциональных связей $d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}} = f_1(W_{\text{г/ч}})$ и $d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}} = f_2(W_{\text{НВ}})$, описываемых нижеприведенными зависимостями:

$$(d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}})_{W_{\text{г/ч}}} = 0,0765 \cdot W_{\text{г/ч}}^{0,6}, \quad (1)$$

$$(d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}})_{W_{\text{НВ}}} = 0,0292 \cdot W_{\text{НВ}}. \quad (2)$$

Указанные зависимости позволяют с достаточной для практического использования точностью ($\pm 12\%$) определить величины средних диаметров контуров $d_{\text{ср}}$ при известной глубине увлажнения почвенного профиля $h_{\text{кон}}$ для определенных значений $W_{\text{г/ч}}$ и $W_{\text{НВ}}$. Более точное соответствие результатов расчета опытным измерениям дает использование соотношения:

$$(\overline{d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}}})_{\text{расч}} = 0,5 \cdot [(d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}})_{W_{\text{г/ч}}} + (d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}})_{W_{\text{НВ}}}], \quad (3)$$

где $(\overline{d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}}})_{\text{расч}}$ – среднерасчетное (среднее) значение соотношения $d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}}$.

О степени соответствия рассчитанных по зависимости (3) значений $(\overline{d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}}})_{\text{расч}}$ опытным значениям этого соотношения можно судить по данным измерений контуров увлажнения, приведенным в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты сопоставления опытных и расчетных значений соотношения $d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}}$

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Почвенные характеристики										
$W_{\text{г/ч}}$, % МСП	6,7	15,9	20,8	27,4	36,1	42,8	50,4	57,1	63,7	74,6
$W_{\text{НВ}}$, % МСП	8,1	14,2	16,9	20,0	23,6	25,9	27,6	29,2	30,4	32,2
Опытные значения соотношения $d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}}$										
$(d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}})_{\text{min}}$	0,24	0,36	0,46	0,53	0,65	0,72	0,74	0,78	0,83	0,92
$(d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}})_{\text{max}}$	0,28	0,40	0,50	0,59	0,71	0,80	0,82	0,90	0,97	1,12
$(\overline{d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}}})_{\text{опыт}}$	0,26	0,38	0,48	0,56	0,68	0,76	0,78	0,84	0,90	1,02
Отклонения от среднего, %	7,7	5,3	4,2	5,4	4,4	5,3	5,1	7,1	7,8	9,8
Расчетные значения соотношения $(d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}})_{W_{\text{г/ч}}}$ (по зависимости (1))										
$(d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}})_{W_{\text{г/ч}}}$	0,24	0,40	0,47	0,56	0,66	0,73	0,80	0,87	0,93	1,02
Отклонения от $(\overline{d_{\text{ср}} / h_{\text{кон}}})_{\text{опыт}}$, %	7,9	5,9	1,5	0,4	3,2	4,1	3,0	3,1	2,8	0,3
Максимальные отклонения опытных значений от расчетных, %	16,7	10,0	2,7	5,7	7,9	9,7	8,0	9,9	10,3	9,5

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Расчетные значения соотношения $(d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}})_{W_{\text{НВ}}}$ (по зависимости (2))										
$(d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}})_{W_{\text{НВ}}}$	0,24	0,42	0,49	0,58	0,69	0,76	0,81	0,85	0,89	0,94
Отклонения от $(\overline{d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}}})_{\text{опыт}}$, %	9,0	9,1	2,8	4,3	1,3	0,5	3,3	1,5	1,4	7,8
Максимальные отклонения опытных значений от расчетных, %	18,1	13,2	6,7	9,2	5,7	5,8	8,2	8,6	9,2	19,1
Среднерасчетные значения $(\overline{d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}}})_{\text{расч}}$ (по зависимости (3))										
$(\overline{d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}}})_{\text{расч}}$	0,24	0,41	0,48	0,57	0,67	0,74	0,81	0,86	0,91	0,98
Отклонения от $(\overline{d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}}})_{\text{опыт}}$, %	8,5	7,5	0,6	1,9	1,0	2,3	3,2	2,3	0,7	4,1
Максимальные отклонения опытных значений от расчетных, %	17,6	10,0	4,8	7,2	5,3	7,8	8,1	9,2	8,4	6,0
$(d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}})_{\text{min}}$ – минимальное значение соотношения $d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}}$ по опытным данным; $(d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}})_{\text{max}}$ – максимальное определенное по опыту значение соотношения $d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}}$; $(\overline{d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}}})_{\text{опыт}}$ – среднее значение соотношения $d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}}$ по опытным данным.										

Судя по данным таблицы 1, средние расчетные и опытные значения соотношения $d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}}$ характеризуются высоким уровнем сходимости, несмотря на наличие более значительных отклонений единичных опытных и расчетных значений от средних (рисунок 2).

Для оценки возможности использования предложенной зависимости для широкого спектра почвенных условий капельного полива и формирования контуров увлажнения почвы в обстановке, отличной от условий проведения наших исследований, выполнено соответствующее сопоставление среднерасчетных значений $d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}}$ со значениями этого параметра, которые определены при камеральной графоаналитической обработке данных по капельным контурам, полученным рядом известных исследователей. Результаты проведенного сопоставления проиллюстрированы рисунком 3.

Приведенные на рисунке 2 авторские данные по опытным значениям $d_{\text{ср}}/h_{\text{кон}}$ и на рисунке 3 данные других исследователей в сопоставлении

со среднерасчетными величинами $(\overline{d_{\text{cp}}/h_{\text{кон}}})_{\text{расч}}$, определенными по зависимости (3), свидетельствуют о ее приемлемости для использования.

Рисунок 2 – Графики соответствия среднерасчетных значений $d_{\text{cp}}/h_{\text{кон}}$ опытным

Вторым определяющим размеры контура увлажнения (его объем и средний диаметр) параметром является его максимальный диаметр $d_{\text{кон}}$. Указанный факт предопределил поиск функциональных связей вида $d_{\text{cp}}/d_{\text{кон}} = f(W_{\text{г/ч}})$ и $d_{\text{cp}}/d_{\text{кон}} = f(W_{\text{НВ}})$ и установление соответствующих экспериментальных зависимостей, их описывающих. Отметим, что наличие функциональной связи между средним и максимальным диаметрами контура увлажнения для условий его формирования в суглинистых почвах было установлено и описано ранее [1]. Для относительно узкого диапазона почвенных условий были получены экспериментальные зависимости, описывающие указанную связь и имеющие вид:

$$(d_{\text{cp}}/d_{\text{кон}})_{W_{\text{г/ч}}} = 0,81 - 0,00075 \cdot W_{\text{г/ч}},$$

$$(d_{\text{cp}}/d_{\text{кон}})_{W_{\text{НВ}}} = 0,76 + 0,0009 \cdot W_{\text{НВ}}^{0,9}.$$

- ◆ А. В. Шуравилин, В. В. Бородыхев ($W_{г/ч} = 50,0$ % МСП)
- В. С. Бочарников ($W_{г/ч} = 21,2$ % МСП, $W_{HB} = 16,5$ % МСП)
- ▲ А. Д. Ахмедов и др. ($W_{г/ч} = 50,0$ % МСП, $W_{HB} = 23,4$ % МСП)
- × А. Д. Ахмедов и др. ($W_{г/ч} = 55,0$ % МСП, $W_{HB} = 23,8$ % МСП)
- * О. Е. Ясонида ($W_{г/ч} = 56,0$ % МСП, $W_{HB} = 25,7$ % МСП)
- О. Е. Ясонида ($W_{г/ч} = 51,2$ % МСП, $W_{HB} = 26,0$ % МСП)
- ◇ А. М. Олейник, М. К. Гаджиев ($W_{г/ч} = 69,7$ % МСП, $W_{HB} = 27,7$ % МСП)
- ⊗ А. М. Олейник, М. К. Гаджиев ($W_{г/ч} = 65,7$ % МСП, $W_{HB} = 26,8$ % МСП)
- ⊕ Ю. С. Уржумова ($W_{г/ч} = 58,0$ % МСП, $W_{HB} = 27,0$ % МСП)
- ◇ О. Н. Карпенко ($W_{г/ч} = 52,0$ % МСП, $W_{HB} = 30,0$ % МСП)
- О. Н. Карпенко ($W_{г/ч} = 52,5$ % МСП, $W_{HB} = 31,0$ % МСП)
- △ В. И. Торбовский ($W_{г/ч} = 60,0$ % МСП, $W_{HB} = 26,0$ % МСП)
- + А. В. Шуравилин (2013) ($W_{г/ч} = 17,0$ % МСП, $W_{HB} = 15,3$ % МСП)
- ▼ Д. Л. Обумахов, В. Н. Шкура ($W_{г/ч} = 25,0$ % МСП, $W_{HB} = 19,1$ % МСП)
- ▽ Д. Л. Обумахов, В. Н. Шкура ($W_{г/ч} = 37,2$ % МСП, $W_{HB} = 22,8$ % МСП)
- Н. О. Кохно ($W_{HB} = 28,5$ % МСП для условий тепличного грунта)

Рисунок 3 – Данные сопоставления расчетных (по зависимости (3)) $(d_{cp}/h_{кон})_{расч}$ и опытных значений, полученных другими исследователями

Функционально-регрессионный анализ авторских опытных данных для более широкого диапазона изменения почвенных параметров ($W_{Г/ч} = 6,7 \dots 74,6$ % МСП и $W_{НВ} = 8,1 \dots 32,2$ % МСП) позволил получить нижеприведенные экспериментальные зависимости для искомых соотношений:

$$(d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}})_{W_{Г/ч}} = 0,7891 - 0,0003 \cdot W_{Г/ч}, \quad (4)$$

$$(d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}})_{W_{НВ}} = 0,786 - 0,00002 \cdot (W_{НВ} - 8,1)^{2,15}, \quad (5)$$

$$(\overline{d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}}})_{\text{расч}} = 0,5 \cdot [(d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}})_{W_{Г/ч}} + (d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}})_{W_{НВ}}], \quad (6)$$

где $(\overline{d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}}})_{\text{расч}}$ – среднерасчетное значение соотношения $d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}}$.

Данные, позволяющие судить о соотношении расчетных, среднерасчетных и среднеопытных значений параметра $d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}}$, и графические образы зависимостей (4)–(6) приведены в таблице 2, на рисунках 4–6.

Таблица 2 – Опытные и расчетные значения соотношения $d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}}$

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W_{Г/ч}$, % МСП	6,7	15,9	20,8	27,4	36,1	42,8	50,4	57,1	63,7	74,6
$W_{НВ}$, % МСП	8,1	14,2	16,9	20,0	23,6	25,9	27,6	29,2	30,4	32,2
$(\overline{d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}}})_{\text{опыт}}$	0,786	0,785	0,783	0,782	0,779	0,778	0,775	0,773	0,771	0,767
$(\overline{d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}}})_{\text{расч}}$	0,787	0,785	0,783	0,781	0,779	0,776	0,774	0,772	0,770	0,767

Рисунок 4 – Осредненные опытные данные и график функциональной связи $d_{\text{ср}} / d_{\text{кон}} = f(W_{Г/ч})$

Рисунок 5 – Осредненные опытные данные и график функциональной связи $d_{cp}/d_{кон} = f(W_{HB})$

Рисунок 6 – Данные и график соответствия среднеопытных и среднерасчетных значений $d_{cp}/d_{кон}$

Судя по приведенным в таблице 2 и на рисунках 4–6 данным, предложенные зависимости адекватно и с достаточной для практических расчетов точностью ($\pm 12\%$) описывают осредненные данные измерений контуров увлажнения, что позволяет рекомендовать их к использованию.

Рекомендуемая к практическому применению расчетная зависимость (6) для определения значений $(\overline{d_{\text{ср}}/d_{\text{кон}}})_{\text{расч}}$ апробирована на обработанных нами по вышеописанной методике известных данных измерений параметров контуров капельного увлажнения почвенного пространства, полученных и опубликованных известными исследователями. Результаты сопоставления расчетных и опытных данных приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты сопоставления расчетных (по зависимости (6)) значений $(\overline{d_{\text{ср}}/d_{\text{кон}}})_{\text{расч}}$ с известными опытными данными

Источник информации	Автор (авторы)	Почвенные условия измерения контуров	Значение $d_{\text{ср}}/d_{\text{кон}}$		Отклонение, %
			опытное	расчетное	
1	2	3	4	5	6
[11]	А. В. Шуравилин, В. В. Бородычев и др.	$W_{\text{г/ч}} = 50,0\% \text{ МСП}$	0,738	0,776	–5,1
[12]	В. С. Бочарников	$W_{\text{г/ч}} = 21,2\% \text{ МСП}$ $W_{\text{НВ}} = 16,5\% \text{ МСП}$	0,714	0,784	–9,8
[6]	А. Д. Ахмедов и др.	$W_{\text{г/ч}} = 55,0\% \text{ МСП}$ $W_{\text{НВ}} = 23,8\% \text{ МСП}$	0,771	0,776	–0,6
[3]	О. Е. Ясониди	$W_{\text{г/ч}} = 52,5\% \text{ МСП}$ $W_{\text{НВ}} = 26,0\% \text{ МСП}$	0,717	0,775	–8,1
[3]	О. Е. Ясониди	$W_{\text{г/ч}} = 56,0\% \text{ МСП}$ $W_{\text{НВ}} = 25,7\% \text{ МСП}$	0,751	0,775	–3,2
[4]	А. М. Олейник, М. К. Гаджиев	$W_{\text{г/ч}} = 65,7\% \text{ МСП}$ $W_{\text{НВ}} = 28,8\% \text{ МСП}$	0,760	0,773	–1,7
[7]	Ю. С. Уржумова	$W_{\text{г/ч}} = 58,0\% \text{ МСП}$ $W_{\text{НВ}} = 25,9\% \text{ МСП}$	0,796	0,775	2,6
[8]	О. Н. Карпенко	$W_{\text{г/ч}} = 52,0\% \text{ МСП}$ $W_{\text{НВ}} = 30,0\% \text{ МСП}$	0,799	0,773	3,2

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6
[9]	В. И. Торбовский	$W_{г/ч} = 70,0 \text{ \% МСП}$ $W_{HB} = 29,0 \text{ \% МСП}$	0,762	0,771	–1,2
[13]	А. В. Шуравилин и др. (2013)	$W_{г/ч} = 17,0 \text{ \% МСП}$ $W_{HB} = 15,3 \text{ \% МСП}$	0,795	0,785	1,2
[1]	В. Н. Шкура, Д. Л. Обумахов	$W_{г/ч} = 25,0 \text{ \% МСП}$ $W_{HB} = 19,0 \text{ \% МСП}$	0,799	0,783	2,0
[1]	В. Н. Шкура, Д. Л. Обумахов	$W_{г/ч} = 37,2 \text{ \% МСП}$ $W_{HB} = 22,8 \text{ \% МСП}$	0,827	0,779	5,8
[14]	Н. О. Кохно	$W_{HB} = 28,5 \text{ \% МСП}$	0,792	0,773	2,4

Приведенные в таблице 3 данные свидетельствуют о приемлемом для практического использования соответствии расчетных по предложенным зависимостям и опытных данных ряда специалистов-«капельщиков».

Для большей надежности результатов определения значений среднего диаметра контуров капельного увлажнения его величину предлагается определять с использованием блок-схемы, приведенной на рисунке 7.

При известных значениях $d_{ср}$ и $h_{кон}$ искомый объем контура капельного увлажнения почвы в соответствии с принятой основной рабочей гипотезой данного исследования определяется по зависимости для цилиндра:

$$W_{кон} = 0,785 \cdot d_{ср}^2 \cdot h_{кон}.$$

Апробация предложенной методики проведена на контурах увлажнения почвы, полученных В. И. Торбовским (рисунок 8 и таблица 4) [9].

Отклонение аналитически определенных по предлагаемой методике объемов контуров капельного увлажнения почв от значений объемов контуров, зафиксированных В. И. Торбовским, не превышает 10 %. Полученный результат свидетельствует о приемлемости предлагаемой методики для практического применения.

Рисунок 7 – Блок-схема определения среднего диаметра контура капельного увлажнения

h – глубина контура, м; R – расстояние от оси увлажнения, м

Рисунок 8 – Контурсы капельного увлажнения, сформировавшиеся в южных глинистых черноземах ($W_{г/ч} = 64,8$ % МСП, $W_{нв} = 28,0$ % МСП), зафиксированные В. И. Торбовским [9]

Таблица 4 – Данные и результаты графоаналитической обработки контуров В. И. Торбовского для определения объемов увлажнения почвы при капельном поливе

Контур по рисунку 8	Глубина контура $h_{кон}$, м	Диаметр контура $d_{кон}$, м	Средний диаметр контура $d_{ср}$, м		Объем контура $W_{кон}$, м ³		Отклонение, %
			опытный	расчетный	опытный	расчетный	
<i>a</i>	0,875	1,040	0,750	0,784	0,386	0,422	–9,3
<i>б</i>	0,760	0,800	0,638	0,641	0,243	0,245	–0,8

Выводы

1 Объем контура капельного увлажнения является основным параметром для определения поливных норм, обеспечивающих заданную глубину и диаметр (ширину) зоны увлажнения. Несмотря на наличие ряда известных предложений по аналитическому определению объемов контуров капельного увлажнения, в реальной практике при определении объемов контуров капельного увлажнения специалисты испытывают определенные трудности. В связи с этим разработка новых более простых и более точных подходов и методики расчета объемов контуров капельного увлажнения является актуальной.

2 В процессе разработки методики расчета была выдвинута рабочая гипотеза о возможности определения объема контура увлажнения путем приведения его к форме цилиндра. Диаметр его равен среднему диаметру

контура увлажнения, который возможно определить по известным значениям глубины и максимального диаметра контура капельного увлажнения. Условием реализации рабочей гипотезы является наличие функциональных связей между средним диаметром контура и максимальным диаметром контура и между средним диаметром контура и его глубиной.

3 В процессе исследования установлено наличие искомых функциональных связей и получены экспериментальные зависимости, описывающие их для различных почвенных условий формирования контуров капельного увлажнения.

4 В результате исследований предложена методика определения среднего диаметра и объема контура увлажнения и проведена ее апробация на опытных данных авторов и других специалистов в области капельного орошения. Полученные зависимости адекватно (с точностью $\pm 12\%$) описывают искомые функциональные связи и могут рекомендоваться для ведения расчетов в широких диапазонах почвенных показателей ($W_{г/ч} = 6,7 \dots 74,6\%$ МСП и $W_{нв} = 8,1 \dots 32,2\%$ МСП).

Список использованных источников

- 1 Шкура, В. Н. Капельное орошение яблони: монография / В. Н. Шкура, Д. Л. Обухов, А. Н. Рыжаков; под ред. В. Н. Шкуры. – Новочеркасск: Лик, 2014. – 310 с.
- 2 Овчинников, А. С. Методика расчета и обоснование параметров контура увлажнения в условиях открытого и закрытого грунта / А. С. Овчинников, В. С. Бочарников, М. П. Мещеряков // Природообустройство. – 2012. – № 4. – С. 10–14.
- 3 Ясониди, О. Е. Капельное орошение: монография / О. Е. Ясониди; Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. – Новочеркасск: Лик, 2011. – 322 с.
- 4 Олейник, А. М. Характер формирования контуров увлажнения почвы при капельном орошении / А. М. Олейник, М. К. Гаджиев // Режимы орошения и водопотребление сельскохозяйственных культур на Северном Кавказе: сб. науч. тр. / ЮжНИИГиМ. – Новочеркасск, 1984. – С. 129–133.
- 5 Гаджиев, М. К. Особенности капельного орошения виноградников в условиях Дагестанской АССР: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.02 / Гаджиев Магомед Кебедович. – Новочеркасск, 1984. – 24 с.
- 6 Ахмедов, А. Д. Контурные увлажнения почвы при капельном орошении / А. Д. Ахмедов, Е. Ю. Галиуллина // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2012. – № 3. – С. 183–188.
- 7 Уржумова, Ю. С. Технологические и конструктивные элементы локального низконапорного орошения садов для условий южных черноземов Ростовской области:

автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / Уржумова Юлия Сергеевна. – Новочеркасск, 2004. – 24 с.

8 Карпенко, О. Н. Капельное орошение и агротехника возделывания роз в теплице / О. Н. Карпенко // Проблемы агротехники и мелиорации. Труды ЦКРНИИГиМ. – Днепропетровск, 1989. – С. 71.

9 Торбовский, В. И. Режим и техника капельного орошения малины: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.02 / Торбовский Василий Иванович. – Новочеркасск, 1992. – 24 с.

10 Системы капельного орошения: учеб. пособие / М. И. Ромашенко, В. И. Доценко, Д. М. Оноприенко, О. И. Шевелев; под ред. М. И. Ромашенко. – Днепропетровск: Оксамит-текст, 2007. – 175 с.

11 Капельное орошение сои на тяжелосуглинистых почвах / А. В. Шуравилин, В. В. Бородычѳ, М. Н. Лытов, О. А. Белин // Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство. – 2009. – № 3. – С. 21–26.

12 Бочарников, В. С. Научно-экспериментальное обоснование повышения эффективности технологических средств локального орошения в овощеводстве открытого и закрытого грунта: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 06.01.02 / Бочарников Виктор Сергеевич. – Волгоград, 2016. – 39 с.

13 Шуравилин, А. В. Формирование контуров увлажнения при капельном орошении картофеля в супесчаных почвах с водоаккумулирующим слоем из природных материалов / А. В. Шуравилин, Т. М. Ахмед, Т. И. Сурикова // Природообустройство. – 2013. – № 2. – С. 23–27.

14 Кохно, Н. О. Орошение розы в теплице / Н. О. Кохно, М. В. Карпенко // Актуальные проблемы мелиорации и водного хозяйства Юга России: сб. науч. ст. науч.-практ. конф. / НГМА. – Новочеркасск: НГМА, 2003. – С. 69–74.

References

1 Shkura V.N., Obumakhov D.L., Ryzhakov A.N., 2014. *Kapel'noe oroshenie yablo-ni: monografiya* [Drip irrigation of apple trees: monograph]. Novocherkassk, Lick Publ., 310 p. (In Russian).

2 Ovchinnikov A.S., Bocharnikov V.S., Meshcheryakov M.P., 2012. *Metodika rascheta i obosnovanie parametrov kontura uvlazhneniya v usloviyakh otkrytogo i zakrytogo grunta* [The calculation method and substantiation of moisture contour parameters under the conditions of the open and closed ground]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 10-14. (In Russian).

3 Yasonidi O.Ye., 2011. *Kapel'noe oroshenie: monografiya* [Drip irrigation: monograph]. Novocherkassk State Land Reclamation Academy, Novocherkassk, Lick Publ., 322 p. (In Russian).

4 Oleinik A.M., Gadzhiev M.K., 1984. *Kharakter formirovaniya konturov uvlazhneniya pochvy pri kapel'nom oroshenii* [The nature of moisture contours formation under drip irrigation]. *Rezhimy orosheniya i vodopotreblenie sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na Severnom Kavkaze: sb. nauch. tr.* [Irrigation regimes and water consumption of crops in the North Caucasus: Proceedings]. YuzhNIIGiM. Novocherkassk, pp. 129-133. (In Russian).

5 Gadzhiev M.K., 1984. *Osobennosti kapel'nogo orosheniya vinogradnikov v usloviyakh Dagestanskoy ASSR. Avtoreferat diss. kand. s.-kh. nauk* [Features of a drip irrigation of vineyards under the conditions of Dagestan ASSR. Abstract of cand. agri. sci. diss.]. Novocherkassk, 24 p. (In Russian).

6 Akhmedov A.D., Galiullina Ye.Yu., 2012. *Kontury uvlazhneniya pochvy pri kapel'nom oroshenii* [Soil moisture contours under drip irrigation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vyssheye professional'noe obrazovanie* [Bull.

Nizhnevolzhskiy Agrouniversity Complex: science and higher vocational education], no. 3, pp. 183-188. (In Russian).

7 Urzhumova Yu.S., 2004. *Tekhnologicheskie i konstruktivnye elementy lokal'nogo nizkonapornogo orosheniya sadov dlya usloviy yuzhnykh chernozemov Rostovskoy oblasti. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk* [Technological and constructive elements of local low-pressure irrigation of gardens for the conditions of southern chernozems in Rostov region. Abstract of cand. tech. sci. diss.]. Novocherkassk, 24 p. (In Russian).

8 Karpenko O.N., 1989. *Kapel'noe oroshenie i agrotekhnika vzdelyvaniya roz v teplitse* [Drip irrigation and roses cultivation practices in greenhouse]. *Problemy agrotekhniki i melioratsii. Trudy TSKRNIIGiM* [Problems of agrotechnology and irrigation. Proceed. of TsKRNIIGiM]. Dnepropetrovsk, 71p. (In Russian).

9 Torbovskiy V.I., 1992. *Rezhim i tekhnika kapel'nogo orosheniya maliny. Avtoreferat diss. kand. s.-kh. nauk* [The regime and technique of drip irrigation of raspberries. Abstract of cand. agri. sci. diss.]. Novocherkassk, 24 p. (In Russian).

10 Romashchenko M.I., Dotsenko V.I., Onoprienko D.M., Shevelev O.I., 2007. *Sistemy kapel'nogo orosheniya: ucheb. posobie* [Drip irrigation systems: Textbook]. Dnepropetrovsk, Oksamit-text Publ., 175 p. (In Russian).

11 Shuravilin A.V., Borodychev V.V., Lytov M.N., Belin O.A., 2009. *Kapel'noe oroshenie soi na tyazhelosuglinistyykh pochvakh* [Drip irrigation of soybean on heavy loam soils]. *Vestnik RUDN. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo* [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Animal Industries], no. 3. pp. 21-26. (In Russian).

12 Bocharnikov V.S., 2016. *Nauchno-eksperimental'noe obosnovanie povysheniya effektivnosti tekhnologicheskikh sredstv lokal'nogo orosheniya v ovoshchevodstve otkrytogo i zakrytogo grunta. Avtoreferat diss. d-ra tekhn. nauk* [Scientific-experimental substantiation of increasing the efficiency of technological means of local irrigation in vegetable growing of open and closed ground. Abstract of dr. tech. sci. diss.]. Volgograd, 39 p. (In Russian).

13 Shuravilin A.V., Ahmed T.M., Surikova T.I., 2013. *Formirovanie konturov uvlazhneniya pri kapel'nom oroshenii kartofelya v supeschanykh pochvakh s vodoakkumuliruyushchim sloem iz prirodnnykh materialov* [Formation of moisture contours under drip irrigation of potatoes in sandy-loamy soils with a water-storage layer on natural materials]. *Prirodobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 2, pp. 23-27. (In Russian).

14 Kokhno N.O., Karpenko M.V., 2003. *Oroshenie rozy v teplitse* [Irrigation of roses in a greenhouse]. *Aktual'nye problemy melioratsii i vodnogo khozyaystva Yuga Rossii: sb. nauch. statey nauch.-prakt. konf.* [Urgent problems of land reclamation and water management in the South of Russia: Proceed. scientific-practical conference]. NGMA. Novocherkassk, NGMA Publ., pp. 69-74. (In Russian).

Штанько Андрей Сергеевич

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: ведущий научный сотрудник

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

Shtanko Andrey Sergeevich

Degree: Candidate of Technical Sciences

Position: Leading Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

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

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Шкура Виктор Николаевич

Ученая степень: кандидат технических наук

Ученое звание: профессор

Должность: ведущий научный сотрудник

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

Shkura Viktor Nikolaevich

Degree: Candidate of Technical Sciences

Title: Professor

Position: Leading Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

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

E-mail: rosniipm@yandex.ru