

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.674.6

doi: 10.31774/2712-9357-2022-12-3-123-140

Геометрия локальных контуров капельного увлажнения почвы, формирующихся в южных черноземах

Андрей Сергеевич Штанько¹, Виктор Николаевич Шкура²

^{1,2}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹shtanko.77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6699-5245>

²VNShkura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4639-6448>

Аннотация. Цель: установить эмпирические зависимости, позволяющие прогнозировать геометрические параметры локальных контуров влажности почвы, формирующихся при капельном поливе южных черноземов. **Материалы и методы.** Эмпирическую основу исследования составили данные опытных измерений параметров контуров увлажнения южных черноземов, сформированных при капельном поливе, на 10 экспериментальных площадках, характеризующихся: содержанием физической глины в диапазоне от 29,0 до 71,1 % массы сухой почвы (МСП), наименьшей влагоемкостью от 20,0 до 30,3 % МСП, плотностью почвы от 1,29 до 1,4 т/куб. м. Почвенные характеристики исследовались с использованием методик Н. А. Качинского, «заливаемых площадок» и «режущего кольца». Влажность почвенных образцов определялась по ГОСТ 28268-89. **Результаты.** Аналитическая обработка 10 опытных очертаний контуров влажности позволила получить систему эмпирических зависимостей для определения очертания, диаметра, площади горизонтальной проекции и объема локального контура влажности почвы. Зависимости учитывают почвенные характеристики – содержание физической глины, наименьшую влагоемкость и плотность сложения, а также технологические параметры капельного полива – расход капельницы, глубину увлажнения, уровни допосливной и постполивной влажности почвы и поливную норму. Полученные зависимости были апробированы на опытных данных других исследователей. В результате отклонения расчетных значений диаметра контура влажности от опытных не превысили 11,3 % и в среднем составили 4,8 %. Прогнозирование площади горизонтальной проекции показало отклонение расчета от опыта в среднем 8,9 %, а по объему контура влажности – 8,8 %. **Выводы.** Установлены эмпирические зависимости, позволяющие прогнозировать форму, линейные, площадные и объемные размеры контуров влажности почвы, формирующихся в южных черноземах при капельном поливе. Результаты апробации позволяют сделать заключение о приемлемости предложенных зависимостей для практического использования.

Ключевые слова: капельное орошение, локальный контур увлажнения почвы, глубина контура увлажнения почвы, диаметр контура увлажнения почвы, площадь контура увлажнения почвы, объем контура увлажнения почвы

Для цитирования: Штанько А. С., Шкура В. Н. Геометрия локальных контуров капельного увлажнения почвы, формирующихся в южных черноземах // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 3. С. 123–140. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-123-140>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Geometry of drip soil moisture local contours formed in southern chernozems

Andrey S. Shtanko¹, Viktor N. Shkura²

^{1,2}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

¹shtanko.77@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6699-5245>

²VNShkura@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4639-6448>

Abstract. Purpose: to determine empirical dependencies that allow predicting the geometric parameters of local soil moisture contours formed during drip irrigation of southern chernozems. **Materials and methods.** The empirical basis of the study was the data of experimental measurements of the moisture contour parameters of southern chernozems, formed during drip irrigation, on 10 experimental sites, characterized by: the content of physical clay from 29.0 to 71.1 % of the dry soil mass (DSM), the field moisture capacity from 20.0 to 30.3 % of DSM, soil density from 1.29 to 1.4 t/cub. m. Soil characteristics were studied using the methods of N. A. Kachinsky, “flooded areas” and “cutting ring”. The moisture content of soil samples was determined according to GOST 28268-89. **Results.** Analytical processing of 10 experimental moisture contour outlines made it possible to obtain a system of empirical dependencies for determining the outline, diameter, horizontal projection area and volume of the local soil moisture contour. Dependencies take into account soil characteristics – the content of physical clay, the field moisture capacity and bulk density, as well as the technological parameters of drip irrigation – dripper consumption, moisture depth, levels of pre-irrigation and post-irrigation soil moisture and irrigation rate. The obtained dependencies were tested on the experimental data of other researchers. As a result, the deviations of the calculated values of the moisture contour diameter from the experimental ones did not exceed 11.3 % and averaged 4.8 %. Forecasting the area of the horizontal projection showed a deviation of the calculation from the experiment on average 8.9 %, and for the volume of the moisture contour – 8.8 %. **Conclusions.** Empirical dependences that allow predicting the shape, linear, areal and volumetric dimensions of soil moisture contours formed in southern chernozems during drip irrigation have been established. The results of testing help conclude that the proposed dependencies are acceptable for practical use.

Keywords: drip irrigation, local soil moisture contour, soil moisture contour depth, soil moisture contour diameter, soil moisture contour area, soil moisture contour volume

For citation: Shtanko A. S., Shkura V. N. Geometry of drip soil moisture local contours formed in southern chernozems. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2022;12(3):123–140. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-123-140>.

Введение. Системы капельного орошения сельскохозяйственных культур предназначены для подачи поливной воды и растворенных в ней питательных веществ в освоенное корневыми системами культивируемых растений почвенное пространство. Технология капельного орошения отличается от других способов орошения сельскохозяйственных культур

локальностью зон увлажнения почвы, которые образуются системой контуров увлажнения почвы, формируемых подачей поливной воды или поливных растворов на поверхность почвенного покрова отдельными капельницами [1–3].

Геометрические и влажностные параметры локальных контуров капельного увлажнения почвы являются критериальными показателями качества капельного полива. В связи с этим изучению геометрических и влажностных параметров локальных контуров влажности почвы уделялось соответствующее внимание. Известны исследования процесса формирования локального контура влажности почвы и его формы, геометрических и влажностных параметров, нашедшие отражение в публикациях И. П. Айдарова, А. Д. Ахмедова, В. С. Бочарникова, М. К. Гаджиева, Е. Ю. Галиуллиной, А. О. Жатканбаевой, И. И. Икромова, Е. В. Мелиховой, М. П. Мещерякова, Д. Л. Обумахова, А. С. Овчинникова, А. М. Олейника, И. П. Орёл, А. Н. Рыжакова, Ю. С. Уржумовой, О. Е. Ясониди и др. Однако обобщающих эмпирических зависимостей, отражающих взаимосвязи между геометрическими параметрами локальных контуров капельного увлажнения почвы и технологическими, а также почвенными условиями проведения капельного полива, предложено не было. В связи с этим целью настоящей работы является установление эмпирических зависимостей, позволяющих прогнозировать геометрические параметры локальных контуров влажности почвы, формирующихся при капельном поливе южных черноземов.

Материалы и методы. Исследования проводились в нижеследующей последовательности: выбор местоположения экспериментальных площадок; определение почвенных характеристик на каждой экспериментальной площадке; проведение капельного полива; отбор почвенных проб и определение послеполивной влажности в зоне капельного увлажнения почвы; построение матриц влажности контуров капельного увлажнения почвы; установление функциональных связей между параметрами конту-

ров влажности и характеристиками условий их формирования; установление зависимостей, описывающих функциональные связи; апробация полученных эмпирических зависимостей на авторском экспериментальном материале и данных, полученных другими исследователями.

При выборе местоположения экспериментальных площадок определяющим фактором являлись почвенные условия. К исследованию были выбраны 10 экспериментальных площадок, расположенных на территории Ростовской области, почвенный покров которых представлен широко распространенным зональным типом почвы – южными черноземами степной зоны. Выбор площадок осуществлялся по почвенным картам сельскохозяйственных угодий с различными водно-физическими характеристиками почв.

Имеющиеся данные почвенных карт для всех экспериментальных площадок уточнялись отбором и последующей обработкой почвенных проб. В качестве экспериментально определяемых почвенных характеристик к рассмотрению приняты: послойное и среднее по метровому слою содержание в почве физической глины W_r , измеряемое в процентах от массы сухой почвы (% МСП); наименьшая влагоемкость почвы (по слоям и средняя по метровому почвенному профилю) – $W_{нв}$, % МСП; плотность сложения почвы (по слоям и средняя по профилю) – $\gamma_{об}$, т/м³. Отборы проб почвы осуществлялись с использованием буров послойно через каждые 10 см почвенного профиля. При отборе проб и определении характеристик почвы использовались общепринятые методики [4]: Н. А. Качинского – при определении гранулометрических показателей; «заливаемых площадок» – при определении наименьшей влагоемкости почвы; «режущего кольца» – при определении плотности почвы. Обобщенные результаты определения характеристик почв экспериментальных площадок представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики почв экспериментальных площадок
Table 1 – Soil characteristics of the experimental sites

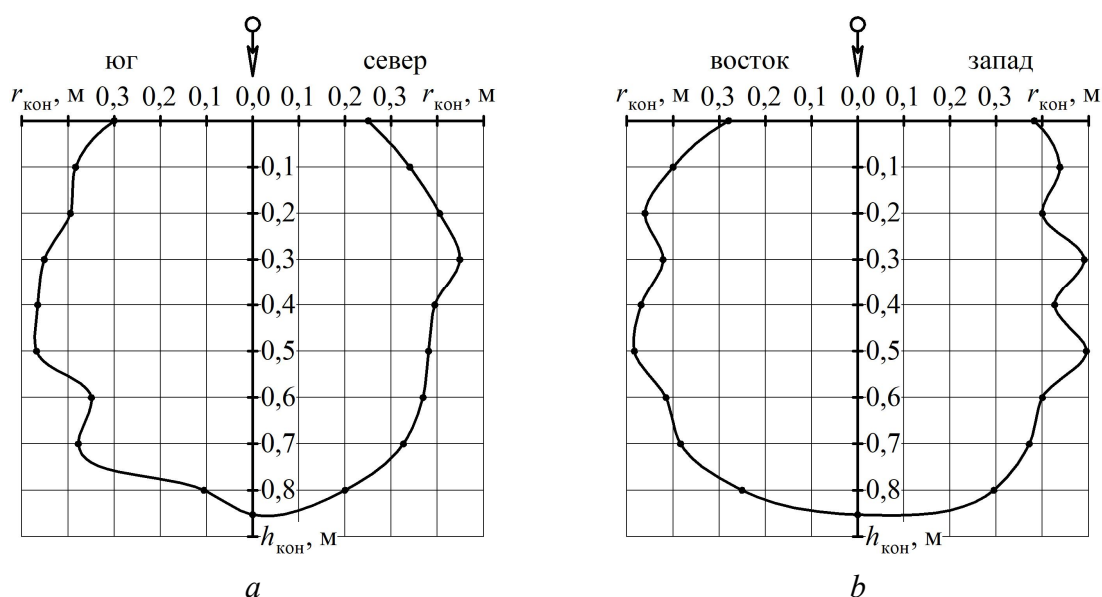
№ пло- щадки	Тип почвы	Значение почвенной характеристики		
		$\overline{W}_r$, % МСП	$\overline{W}_{\text{нв}}$, % МСП	$\overline{\gamma}_{\text{об}}$, т/м ³
1	легкосуглинистая	29,0	20,0	1,40
2	среднесуглинистая	36,9	21,1	1,38
3	среднесуглинистая	43,8	22,8	1,36
4	среднесуглинистая	45,5	26,4	1,30
5	тяжелосуглинистая	53,5	27,0	1,32
6	тяжелосуглинистая	57,6	26,8	1,31
7	тяжелосуглинистая	60,0	29,0	1,29
8	легкоглинистая	65,6	30,1	1,33
9	легкоглинистая	66,0	27,4	1,32
10	среднеглинистая	71,1	30,3	1,29
Примечание – $\overline{W}_r$ – среднее по метровому слою содержание в почве глинистых частиц, $\overline{W}_{\text{нв}}$ – средняя по метровому слою наименьшая влагоемкость почвы, $\overline{\gamma}_{\text{об}}$ – средняя по метровому слою плотность почвы.				

Капельный полив производился капельными водовыпусками с расходом $q_{\text{кап}} = (2,0 \pm 0,1)$ л/ч. На каждой экспериментальной площадке формировалось и исследовалось не менее трех локальных контуров влажности почвы.

Отборы проб почвы для определения влажности осуществлялись буром с шагом 10,0 и 15,0 см как по глубине зоны увлажнения, так и по длине каждой радиали. Период времени от завершения полива до начала отбора почвенных образцов составил $t_{\text{п/п}} = (25 \pm 4)$ ч. Отбор и хранение почвенных проб осуществлялись по апробированным методикам, а их количество по каждой экспериментальной площадке определялось шагом сетки отбора проб, количеством и протяженностью радиалей (от 600 до 1000 шт.). Значения влажности почвенных проб устанавливались термостатно-весовым способом по ГОСТ 28268-89, а в полевых условиях тарированным влагомером.

После определения влажности почвенных образцов строились матрицы распределения влажности в почвенном профиле, по которым вычерчивались ограничивающие контур влажности и внутриконтурные изопле-

ты, характеризующие распределение влажности почвы в зоне капельного увлажнения. В качестве ограничивающей контур влажности принималась изоплета с влажностью, превышающей доливную на $0,05W_{\text{HB}}$. В качестве примера на рисунке 1 проиллюстрированы два вертикальных профиля контура влажности почвы, зафиксированных по двум взаимно перпендикулярным замерным диаметралям в тяжелосуглинистом черноземе с показателями: $\overline{W}_{\text{г}} = 57,6 \text{ \% МСП}$; $\overline{W}_{\text{HB}} = 26,8 \text{ \% МСП}$; $\overline{\gamma}_{\text{об}} = 1,31 \text{ т/м}^3$.



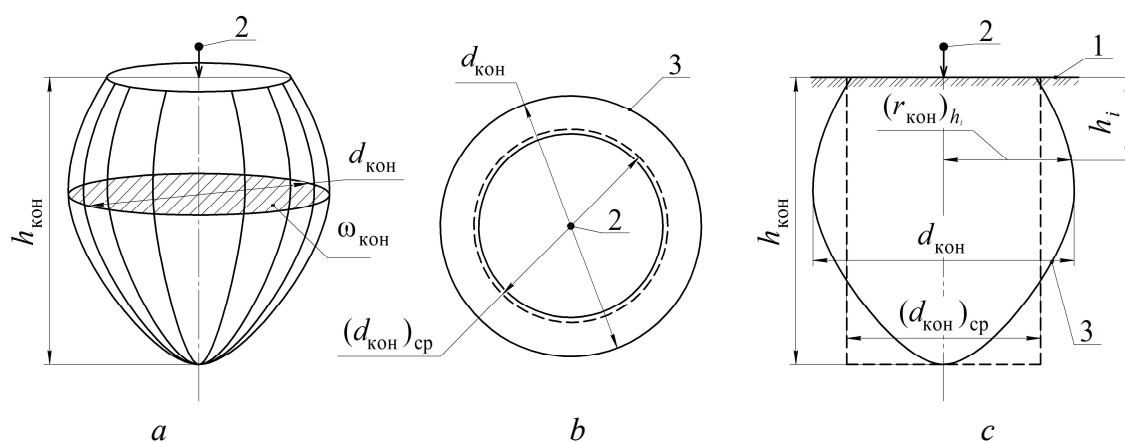
a – по направлению «юг – север»; b – по направлению «восток – запад»
 a – in the direction “south – north”; b – in the direction “east – west”

Рисунок 1 – Пример профилей локального контура влажности почвы
Figure 1 – An example of soil moisture local contour profiles

Методики проведения анализа экспериментального материала и последующих обобщений принимались в соответствии с поставленными задачами исследования. При определении размеров контуров влажности использовалось измерение их параметров на вычерченных в масштабе их профилях. При определении площадных показателей применялись технологии планиметрирования. При выводе расчетных зависимостей применялись методы математической статистики и дисперсионно-регрессионного анализа. На заключительном этапе полученные зависимости апробирова-

лись на авторских и экспериментальных данных, полученных другими исследователями. При этом сопоставлялись расчетные и опытные значения исследуемых параметров и определялись отклонения между сравниваемыми параметрами.

Результаты и обсуждение. Основными геометрическими параметрами контуров капельного увлажнения почвы, используемыми при проектировании поливного модуля систем капельного орошения сельскохозяйственных культур, являются: глубина контура влажности $h_{\text{кон}}$, м, соответствующая заданной глубине увлажнения почвенного слоя $h_{\text{увл}}$, м; максимальный диаметр контура капельного увлажнения почвы $d_{\text{кон}}$, м; средний диаметр контура капельного увлажнения почвы $(d_{\text{кон}})_{\text{ср}}$, м; площадь горизонтальной проекции контура увлажнения $\omega_{\text{кон}}$, м², и его объем $W_{\text{кон}}$, м³ (рисунок 2).



a – схема контура влажности почвы; b – вид сверху (горизонтальная проекция контура влажности); c – вид сбоку (вертикальная проекция контура влажности); 1 – поверхность земли; 2 – капельный водовыпуск; 3 – границная линия локального контура влажности почвы; $(r_{\text{кон}})_{h_i}$ – радиус профиля контура в сечении, заглубленном на величину h_i , м

a – scheme of soil moisture contour; b – top view (horizontal projection of moisture contour); c – side view (vertical projection of moisture contour); 1 – the soil surface; 2 – drip outlet; 3 – boundary line of soil moisture local contour; $(r_{\text{кон}})_{h_i}$ – the radius of the contour profile in the section buried by the value h_i , m

Рисунок 2 – Геометрические параметры локального контура капельного увлажнения почв

Figure 2 – Geometric parameters of drip soil moisture local contour

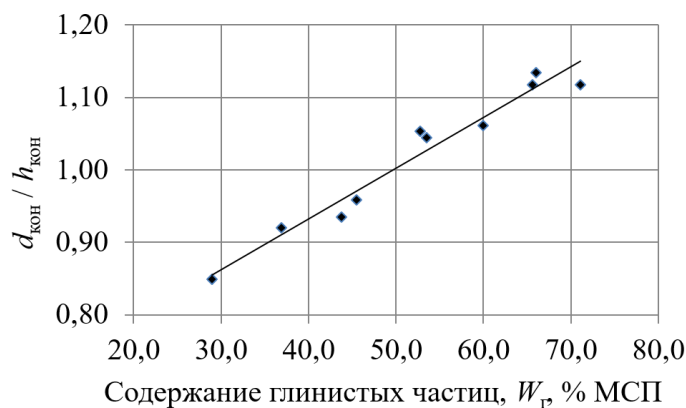
В процессе исследований установлено наличие устойчивой функциональной связи между диаметром $d_{\text{кон}}$ и глубиной $h_{\text{кон}}$ локального контура капельного увлажнения почвы. При этом установлено, что соотношение $d_{\text{кон}}/h_{\text{кон}}$ преимущественно зависит от водно-физических свойств почвы $W_{\text{г}}$, $W_{\text{нв}}$, $\gamma_{\text{об}}$. В связи с вышеуказанным на первом этапе обработка очертаний опытных контуров влажности осуществлена в направлении установления наличия и вида функциональных связей $d_{\text{кон}}/h_{\text{кон}} = f_1(W_{\text{г}})$, $d_{\text{кон}}/h_{\text{кон}} = f_2(W_{\text{нв}})$. Результаты обработки почвенных характеристик и параметров полученных локальных контуров влажности почвы по каждой экспериментальной площадке представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Данные о почвенных характеристиках и линейных параметрах контуров влажности почвы

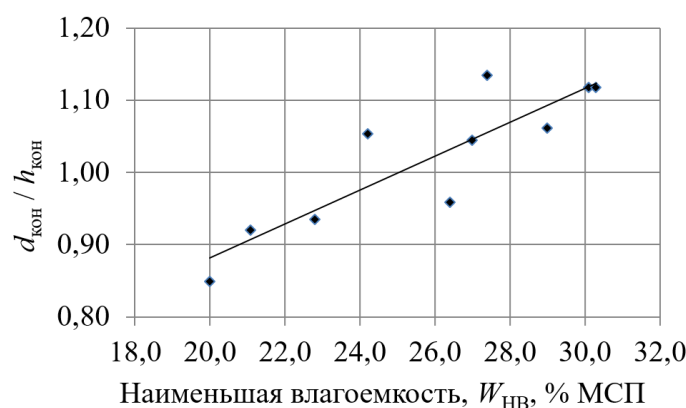
Table 2 – Data on soil characteristics and linear parameters of soil moisture contours

Параметр	Значение параметра по 10 контурам влажности									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W_{\text{г}}$, % МСП	29,0	36,9	43,8	45,5	53,5	57,6	60,0	65,6	66,0	71,1
$W_{\text{нв}}$, % МСП	20,0	21,1	22,8	26,4	27,0	26,8	29,0	30,1	27,4	30,3
$h_{\text{кон}}$, м	1,06	1,00	1,38	0,96	1,12	0,85	0,82	1,02	0,97	1,02
$d_{\text{кон}}$, м	0,90	0,92	1,29	0,92	1,17	0,93	0,87	1,14	1,10	1,14
$d_{\text{кон}}/h_{\text{кон}}$	0,85	0,92	0,93	0,96	1,04	1,09	1,06	1,12	1,13	1,12

При рассмотрении характеристик контуров влажности, зафиксированных на экспериментальных площадках и приведенных в таблице 2, можно заключить, что с увеличением $W_{\text{г}}$ от 29,0 до 71,1 % МСП и $W_{\text{нв}}$ от 20,0 до 30,3 % МСП имеет место увеличение значений соотношения $d_{\text{кон}}/h_{\text{кон}}$ от 0,85 до 1,13. Указанная закономерность изменения почвенных параметров и соотношения $d_{\text{кон}}/h_{\text{кон}}$ свидетельствует о наличии функциональной связи между рассматриваемыми параметрами, графики которой представлены на рисунке 3.



a



b

Рисунок 3 – Графики зависимости соотношения $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ от содержания в почве физической глины (a) и наименьшей влагоемкости (b)

Figure 3 – Dependencies graphs of the ratio $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ on the content of physical clay in soil (a) and the minimum moisture capacity (b)

Уравнение регрессии, описывающее зависимость соотношения $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ от содержания в почве глинистых частиц W_g (рисунок 3a), имеет вид:

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,51 + 0,009 \cdot W_g,$$

функциональная связь $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ и W_{HB} (рисунок 3b) описывается уравнением:

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,073 + 0,038 \cdot W_{\text{HB}}.$$

В связи с имеющей место вариабельностью значений W_g и W_{HB} для почв даже в одной природно-климатической зоне, соотношения $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$, определенные для конкретного типа почвы по одному из указан-

ных почвенных параметров, могут в разной степени отличаться. Учитывая это, для практического применения рекомендуем использовать среднее арифметическое значение соотношения $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$, определенное по обобщенной зависимости вида:

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,5 \cdot [(0,51 + 0,009 \cdot W_{\text{г}}) + (0,073 + 0,038 \cdot W_{\text{нв}})] = \quad (1) \\ = 0,5 \cdot (0,583 + 0,009 \cdot W_{\text{г}} + 0,038 \cdot W_{\text{нв}}).$$

Полученные эмпирические зависимости для прогнозирования значений $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ апробированы на опытных данных ряда специалистов (таблица 3).

Таблица 3 – Данные о почвенных характеристиках и линейных параметрах контуров влажности почвы

Table 3 – Data on soil characteristics and linear parameters of soil moisture contours

Автор	Почвенный параметр		Значение $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$		Отклонение, %
	$W_{\text{г}}$, % МСП	$W_{\text{нв}}$, % МСП	расчетное	опытное	
М. К. Гаджиев	46,3	22,5	0,93	0,92	–0,8
И. П. Орёл	–	24,5	1,00	1,04	+3,5
А. М. Олейник [5]	47,5	25,0	0,98	1,07	+8,4
О. Е. Ясонида [6]	58,9	28,1	1,09	0,98	–11,3
О. Е. Ясонида [6]	66,4	30,8	1,31	1,19	–10,1
Ю. С. Уржумова	58,0	25,8	1,04	1,05	+0,7
Д. Л. Обумахов [7]	58,0	31,0	1,14	1,16	+1,6
А. Н. Рыжаков [8]	38,2	23,2	0,90	0,92	+1,7
Примечание – Опытные данные о параметрах контуров капельного увлажнения и характеристиках почв, зафиксированных М. К. Гаджиевым, И. П. Орёл и Ю. С. Уржумовой, взяты из диссертационных работ этих ученых.					

Максимальное отклонение расчетных значений $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ от опытных не превышает 11,3 % и в среднем составляет 4,8 %. Результаты сопоставления значений соотношения $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$, рассчитанных по предложенной зависимости (1), с опытными значениями, полученными другими исследователями, свидетельствуют о приемлемости полученных зависимостей для практического использования при прогнозировании диаметра контура капельного увлажнения при определенной глубине увлажняемой почвенной толщи.

Значение среднего диаметра локального контура влажности $(d_{\text{кон}})_{\text{ср}}$ используется в предварительных расчетах, в частности при определении объема локального контура увлажнения почвы $W_{\text{кон}}$. С целью установления функциональных связей между $(d_{\text{кон}})_{\text{ср}}$ и другими параметрами контура $h_{\text{кон}}$ и $d_{\text{кон}}$, а также почвенными характеристиками $W_{\text{г}}$ и $W_{\text{нв}}$ была проведена аналитическая обработка данных, приведенных в таблице 4.

Таблица 4 – Данные о почвенных характеристиках и линейных параметрах контуров влажности почвы

Table 4 – Data on soil characteristics and linear parameters of soil moisture contours

Параметр	Значение параметра по 10 контурам влажности									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W_{\text{г}}$, % МСП	29,0	36,9	43,8	45,5	53,5	57,6	60,0	65,6	66,0	71,1
$W_{\text{нв}}$, % МСП	20,0	21,1	22,8	26,4	27,0	26,8	29,0	30,1	27,4	30,3
$(d_{\text{кон}})_{\text{ср}}$, м	0,69	0,70	0,93	0,71	0,84	0,70	0,65	0,85	0,86	0,86
$(d_{\text{кон}})_{\text{ср}}/d_{\text{кон}}$, м	0,77	0,76	0,72	0,77	0,72	0,75	0,75	0,75	0,78	0,75
$(d_{\text{кон}})_{\text{ср}}/h_{\text{кон}}$, м	0,65	0,70	0,67	0,74	0,75	0,82	0,79	0,83	0,89	0,84

Анализ данных показал отсутствие корреляционных связей между абсолютными значениями $(d_{\text{кон}})_{\text{ср}}$ и почвенными характеристиками $W_{\text{г}}$ и $W_{\text{нв}}$, а также между относительными значениями $(d_{\text{кон}})_{\text{ср}}/d_{\text{кон}}$ и этими же характеристиками почв. Вне зависимости от значений почвенных характеристик $W_{\text{г}}$ и $W_{\text{нв}}$ соотношение $(d_{\text{кон}})_{\text{ср}}$ и $d_{\text{кон}}$ составляет $(d_{\text{кон}})_{\text{ср}} = (0,75 \pm 0,03)d_{\text{кон}}$. В то же время наблюдается устойчивая функциональная связь соотношения $(d_{\text{кон}})_{\text{ср}}/h_{\text{кон}}$ со значениями характеристик $W_{\text{г}}$ и $W_{\text{нв}}$, которая имеет вид:

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

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

Для повышения точности определения среднего диаметра контура влажности рекомендуем использовать нижеприведенную зависимость:

$$(d_{\text{кон}})_{\text{ср}} / h_{\text{кон}} = 0,5 \cdot (0,0292 \cdot W_{\text{HB}} + 0,0765 \cdot W_{\text{г}}^{0,6}). \quad (2)$$

Геометрия локального контура влажности предусматривает описание его очертания, что может быть осуществлено по авторской методике [9]. Значения координат внешней ограничивающей контур изоплеты по глубине h_i , м, и в плане r_{h_i} , м, определяются с использованием зависимости:

$$r_{h_i} = r_{\text{кон}} \cdot \left(k_0 + k_1 \cdot \frac{h_i}{h_{\text{кон}}} - k_2 \cdot \left[\frac{h_i}{h_{\text{кон}}} \right]^2 + k_3 \cdot \left[\frac{h_i}{h_{\text{кон}}} \right]^3 - k_4 \cdot \left[\frac{h_i}{h_{\text{кон}}} \right]^4 - k_5 \cdot \left[\frac{h_i}{h_{\text{кон}}} \right]^5 - k_6 \cdot \left[\frac{h_i}{h_{\text{кон}}} \right]^6 - k_7 \cdot \left[\frac{h_i}{h_{\text{кон}}} \right]^7 - k_8 \cdot \left[\frac{h_i}{h_{\text{кон}}} \right]^8 - k_9 \cdot \left[\frac{h_i}{h_{\text{кон}}} \right]^9 - k_{10} \cdot \left[\frac{h_i}{h_{\text{кон}}} \right]^{10} \right),$$

где r_{h_i} – радиус профиля контура влажности почвы на глубине h_i , м;

$r_{\text{кон}}$ – максимальный радиус локального контура влажности:

$$r_{\text{кон}} = 0,5 \cdot d_{\text{кон}};$$

$k_0 - k_{10}$ – эмпирически установленные коэффициенты полинома:

$$\begin{aligned} k_0 &= 0,5 \cdot \left[(1 - 0,005 \cdot W_{\text{г/ч}} \cdot \gamma_{\text{об}}) + (1 - 0,001 \cdot W_{\text{HB}}^{1,84} - 0,002 \cdot W_{\text{HB}}^{0,45}) \right], \\ k_1 &= 1,03 / (k_0)^{1,2}, \quad k_2 = k_0 + k_1, \quad k_3 = 0,255 \cdot k_0^{0,01}, \quad k_4 = 0,005 \cdot k_0^{0,01}, \\ k_5 &= 0,010 \cdot k_0^{0,01}, \quad k_6 = 0,017 \cdot k_0^{0,01}, \quad k_7 = 0,027 \cdot k_0^{0,01}, \quad k_8 = 0,04 \cdot k_0^{0,01}, \\ k_9 &= 0,065 \cdot k_0^{0,01}, \quad k_{10} = 0,09 \cdot k_0^{0,01}; \end{aligned}$$

h_i – глубина заложения горизонтальных сечений профиля контура влажности, принимаемая от $h_i = 0$ м до $h_i = h_{\text{кон}}$, м.

Кроме линейных параметров контура определяются его площадь и объем. Под площадью локального контура капельного увлажнения почвы $\omega_{\text{кон}}$, м², понимается площадь его проекции на горизонтальную плоскость. Данный геометрический показатель контура влажности особенно важен при подборе количества капельных водовыпусков и их расположения

в зоне питания при поливе сельскохозяйственных культур с развитой корневой системой, в частности плодовых садов, бахчевых культур и др. При определении $\omega_{\text{кон}}$ предполагаем, что форма горизонтальной проекции локального контура влажности соответствует окружности с диаметром, равным $d_{\text{кон}}$. Следовательно, площадь горизонтальной проекции локального контура влажности почвы может быть определена по зависимости вида:

$$\omega_{\text{кон}} = 0,785 \cdot d_{\text{кон}}^2. \quad (3)$$

Подставив в уравнение (3) зависимость (1) и преобразовав его, получим:

$$\omega_{\text{кон}} = 0,785 \cdot (0,5 \cdot h_{\text{кон}} \cdot (0,583 + 0,009 \cdot W_{\text{г}} + 0,038 \cdot W_{\text{нв}}))^2.$$

Объемная характеристика локального контура капельного увлажнения почвы необходима для определения поливной нормы на одну капельницу. Объем контура влажности $W_{\text{кон}}$, м³, определяется по зависимости вида:

$$W_{\text{кон}} = 0,785 \cdot (d_{\text{кон}})_{\text{ср}}^2 \cdot h_{\text{кон}}. \quad (4)$$

Используем полученную ранее эмпирическую зависимость (2) для преобразования зависимости (4), которая в результате примет вид:

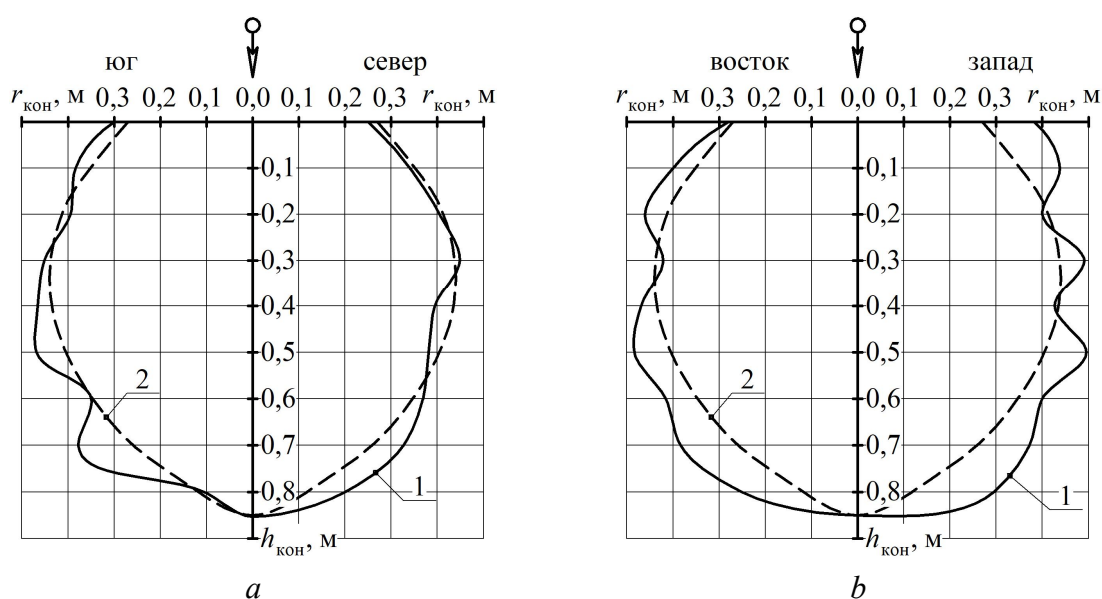
$$W_{\text{кон}} = 0,196 \cdot (0,0292 \cdot W_{\text{нв}} + 0,0765 \cdot W_{\text{г}}^{0,6})^2 \cdot h_{\text{кон}}^2.$$

Апробацию предложенного комплекса зависимостей для определения линейных, площадных и объемных характеристик локального контура капельного увлажнения почвы проведем на примере опытного контура влажности, приведенного на рисунке 1. Результаты расчета геометрических параметров контуров влажности и их сопоставление с опытными значениями, зафиксированными при $\overline{W_{\text{г}}} = 57,6 \text{ \% МСП}$, $\overline{W_{\text{нв}}} = 26,8 \text{ \% МСП}$, $\overline{\gamma_{\text{об}}} = 1,31 \text{ т/м}^3$, $q_{\text{кап}} = (2,0 \pm 0,1) \text{ л/ч}$ и $h_{\text{увл}} = h_{\text{кон}} = 0,85 \text{ м}$, приведены в таблице 5, а сопоставление опытного и расчетного очертаний контура на рисунке 4.

Таблица 5 – Сопоставление расчетных и опытных значений геометрических параметров контура увлажнения почвы

Table 5 – Comparison of the calculated and experimental values of the geometric parameters of soil moisture contour

Параметр	Значение параметра			Отклонение, %	
	расчетное	опытное			
			по рисунку 1a	по рисунку 1b	по рисунку 1a
$d_{\text{кон}}$, м	0,90	0,92	0,97	+2,07	+7,12
$(d_{\text{кон}})_{\text{ср}}$, м	0,70	0,69	0,73	−1,84	+3,74
$\omega_{\text{кон}}$, м ²	0,64	0,66	0,74	+4,11	+13,74
$W_{\text{кон}}$, м ³	0,39	0,36	0,43	−7,53	+9,98



a – по направлению «юг – север»; b – по направлению «восток – запад»;
 1 – опытное очертание контура; 2 – расчетное очертание контура
 a – in the direction “south – north”; b – in the direction “east – west”;
 1 – experimental contour outline; 2 – estimated contour outline

Рисунок 4 – Сопоставление опытного и расчетного очертаний контура капельного увлажнения почвы

Figure 4 – Comparison of experimental and calculated soil drip moisture contour outlines

Средние отклонения составили: по максимальному диаметру локального контура влажности почвы $\delta_{d_{\text{кон}}} = 4,6 \%$, по среднему диаметру контура влажности $\delta_{(d_{\text{кон}})_{\text{ср}}} = 2,8 \%$, по площади горизонтальной проекции контура влажности $\delta_{\omega_{\text{кон}}} = 8,9 \%$, по объему контура влажности $\delta_{W_{\text{кон}}} = 8,9 \%$.

Резюмируя результаты исследования, отметим нижеследующее.

1 Проведенные исследования состояли из двух этапов: экспериментального, включающего формирование контуров влажности на 10 экспериментальных площадках, отбор образцов и определение влажности почвы в контурах влажности, и аналитического, включающего обработку матриц влажности почвы, поиск и установление функциональных связей между геометрическими параметрами контуров влажности и почвенными характеристиками, а также апробацию выявленных зависимостей на известных опытных данных.

2 В процессе исследования установлено наличие функциональной связи между глубиной контура влажности, его максимальным и средним диаметрами, которые зависят от водно-физических свойств почвы, характеризующихся содержанием в почве физической глины и ее наименьшей влагоемкостью. В результате получены эмпирические зависимости, отражающие функциональную связь между вышеприведенными геометрическими параметрами контуров влажности и почвенными условиями. На основе полученных закономерностей были предложены зависимости для определения площади горизонтальной проекции локального контура увлажнения почвы и его объема.

3 В результате апробации полученных зависимостей для определения соотношения $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ на опытных данных других авторов, приведенных в известных публикациях, установлено, что в одном из восьми примеров максимальное отклонение расчетных значений геометрических параметров контуров влажности от опытных составило 11,3 %, а в среднем по всем примерам не превысило 4,8 %. Апробация зависимостей для определения линейных, площадных и объемных характеристик локального контура капельного увлажнения почвы, проведенная на примере опытного контура влажности, зафиксированного на южных черноземах с параметрами $\overline{W_r} = 57,6 \text{ \% МСП}$, $\overline{W_{\text{НВ}}} = 26,8 \text{ \% МСП}$, $\overline{\gamma_{\text{об}}} = 1,31 \text{ т/м}^3$, показала прием-

лемые для практического применения отклонения расчетных значений от опытных и количественное и качественное подобие очертаний опытного и расчетного контуров капельного увлажнения почвы. Полученные результаты свидетельствуют о приемлемости полученных зависимостей для практического применения. При увеличении банка данных о параметрах контуров увлажнения почвы и условиях их формирования возможны корректировки полученных зависимостей.

4 Полученные зависимости для прогнозирования линейных, площадных и объемных характеристик локальных контуров капельного увлажнения южных черноземов степного типа справедливы для зон увлажнения, сформированных в южных черноземах степного типа при поливной норме $(N_{\text{пол}})_{\text{кап}}$, л/кап, определяемой для отдельной капельницы по зависимости [10]:

$$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 0,00086 \cdot \bar{\gamma}_{\text{об}} \cdot h_{\text{кон}}^3 \cdot (0,0765 \cdot W_{\text{г/ч}}^{0,6} + 0,0292 \cdot W_{\text{нв}} + 0,6795 \cdot (\bar{V}_{\text{вп}})_{1 \text{ час}}^{-0,767})^2 \cdot (\bar{\beta}_{\text{п/п}} - \bar{\beta}_{\text{д/п}}).$$

5 Возможность прогнозирования геометрических параметров контуров капельного увлажнения почвы на этапе проектирования и в процессе эксплуатации поливной сети систем капельного орошения позволит создавать в почвенном пространстве зоны капельного увлажнения, соответствующие потребностям корневых систем выращиваемых культур по местоположению и геометрическим параметрам, что будет способствовать увеличению урожайности многолетних культур с распространенной корневой системой и повышению эффективности применения систем капельного орошения.

Выводы

1 В результате исследования установлены эмпирические зависимости, позволяющие прогнозировать форму, линейные, площадные и объемные размеры контуров увлажненного почвенного пространства, формирующихся в южных черноземах при наземном капельном поливе.

2 Полученные зависимости апробированы на материалах известных данных исследований локальных контуров капельного увлажнения черноземных почв. Результаты апробации позволяют сделать заключение о приемлемости предложенных зависимостей для практического использования.

Список источников

1. Семерджян А. К., Бень А. В. Опыт проектирования и строительства систем капельного орошения в Краснодарском крае // Природообустройство. 2018. № 4. С. 85–88. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-4-85-88.
2. Optimal design of drip irrigation submains: pressure-compensating emitters / C. E. Schilardi Sicoli, R. Aliod, F. Zorilla, J. A. Morábito // Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. 2019. Vol. 51(2). P. 154–166.
3. Dubenok N. N., Gemonov A. V., Lebedev A. V. Effects of drip irrigation regimes on growth, quality plum seedlings, and water use efficiency in European Russia // Journal of Physics: Conference Series. 2020, Nov. 52093. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/5/052093.
4. Руководство по контролю и регулированию почвенного плодородия орошаемых земель / В. Н. Щедрин, Г. Т. Балакай, Л. М. Докучаева, Р. Е. Юркова, О. Ю. Шалашова, Г. И. Табала; под ред. В. Н. Щедрина. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2017. 137 с.
5. Олейник А. М., Гаджиев М. К. Характер формирования контуров увлажнения почвы при капельном орошении // Режимы орошения и водопотребление сельскохозяйственных культур на Северном Кавказе. Новочеркасск, 1984. С. 129–133.
6. Ясониди О. Е. Капельное орошение. Новочеркасск: Лик, 2011. 322 с.
7. Обумахов Д. Л. Линейные параметры контуров увлажнения при капельном поливе // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета [Электронный ресурс]. 2014. № 100(06). С. 735–748. URL: <http://ej.kubagro.ru/2014/06/pdf/24.pdf> (дата обращения: 01.04.2022).
8. Рыжаков А. Н., Шкура В. Н., Штанько А. С. О форме локального контура капельного орошения // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2017. № 2(66). С. 94–100.
9. Васильев С. М., Шкура В. Н., Штанько А. С. Очертание локальных зон увлажнения подкапельного почвенного пространства // Аграрный научный журнал. 2019. № 3. С. 65–71. DOI: 10.28983/asj.y2019i3pp65-71.
10. Пат. 2638312 Российская Федерация, МПК⁶ А 01 G 25/00, СПК¹³ А 01 G 25/00. Способ определения поливной нормы при капельном поливе растений / Щедрин В. Н., Штанько А. С., Шкура В. Н.; заявитель и патентообладатель Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. № 2018128077; заявл. 31.07.18; опубл. 01.04.19, Бюл. № 10. 9 с.

References

1. Semerdzhyan A.K., Ben A.V., 2018. *Opyt proektirovaniya i stroitel'stva sistem kapel'nogo orosheniya v Krasnodarskom krae* [Experience in the design and construction of drip irrigation systems in Krasnodar Territory]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 85-88, DOI: 10.26897/1997 6011/2018 4-85-88. (In Russian).
2. Schilardi Sicoli C.E., Aliod R., Zorilla F., Morábito J.A., 2019. Optimal design of drip irrigation submains: pressure-compensating emitters. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, vol. 51(2), pp. 154-166.
3. Dubenok N.N., Gemonov A.V., Lebedev A.V., 2020. Effects of drip irrigation re-

gimes on growth, quality plum seedlings, and water use efficiency in European Russia. Journal of Physics: Conference Series, Nov., 52093, DOI: 10.1088/1742-6596/1679/5/052093.

4. Shchedrin V.N., Balakay G.T., Dokuchaeva L.M., Yurkova R.E., Shalashova O.Yu., Tabala G.I., 2017. *Rukovodstvo po kontrolyu i regulirovaniyu pochvennogo plodorodiya oroshaemykh zemel'* [Guidelines for Control and Regulation of Soil Fertility of Irrigated Lands]. Novocherkassk, RosNIIPM, 137 p. (In Russian).

5. Oleynik A.M., Gadzhiev M.K., 1984. *Kharakter formirovaniya konturov uvlazhneniya pochvy pri kapel'nom oroshenii* [The nature of soil moisture contours formation in drip irrigation]. *Rezhimy orosheniya i vodopotreblenie selskokhozyaystvennykh kultur na Severnom Kavkaze* [Irrigation Regimes and Water Consumption of Agricultural Crops in the North Caucasus]. Novocherkassk, pp. 129-133. (In Russian).

6. Yasonidi O.E., 2011. *Kapel'noe oroshenie* [Drip Irrigation]. Novocherkassk, Lik Publ., 322 p. (In Russian).

7. Obumakhov D.L., 2014. [Linear contours parameters humidified at drip irrigation]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU: politematicheskiiy setevoy elektronnyy zhurnal*, no. 100(06), pp. 735-748, available: <http://ej.kubagro.ru/2014/06/pdf/24.pdf> [accessed 01.04.2022]. (In Russian).

8. Ryzhakov A.N., Shkura V.N., Shtanko A.S., 2017. *O forme lokal'nogo kontura kapel'nogo orosheniya* [On the form of the local contour of drip irrigation]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 2(66), pp. 94-100. (In Russian).

9. Vasiliev S.M., Shkura V.N., Shtanko A.S., 2019. *Ochertanie lokal'nykh zon uvlazhneniya podkapel'nogo pochvennogo prostranstva* [Local moisture zones profile of subdrip soil space]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], no. 3, pp. 65-71, DOI: 10.28983/asj.y2019i3pp65-71. (In Russian).

10. Shchedrin V.N., Shtanko A.S., Shkura V.N., 2018. *Sposob opredeleniya polivnoy normy pri kapel'nom polive rasteniy* [Method for determining the irrigation rate for drip irrigation of plants]. Patent RF, no. 2638312. (In Russian).

Информация об авторах

А. С. Штанько – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук;

В. Н. Шкура – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, профессор.

Information about the authors

A. S. Shtanko – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences;

V. N. Shkura – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences, Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.05.2022; одобрена после рецензирования 20.06.2022; принята к публикации 27.06.2022.

The article was submitted 12.05.2022; approved after reviewing 20.06.2022; accepted for publication 27.06.2022.