

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.674.6

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-1-19-38

Определение поливной нормы для формирования первичного локального контура капельно-увлажненной почвы

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: разработка методики определения величины поливной нормы, обеспечивающей формирование в почвенном пространстве первичного локального контура увлажненной почвы при капельном поливе одной капельницей. **Материалы и методы.** Методологическую и фактологическую основу разработки составили материалы и эмпирические зависимости, полученные по данным полевых авторских исследований локальных контуров влажности, формирующихся в различных почвенных условиях при надземном и наземном капельном орошении. **Результаты и обсуждение.** Проведен анализ и дана оценка известных подходов к расчету поливных норм для капельного орошения растений, определено направление разработки методики. По материалам полевых исследований и их камеральной обработки получено 11 профилей контуров капельно-увлажненной почвы, сформировавшихся в различных почвенных и технологических условиях капельного полива. Почвенные условия характеризуются широким спектром изменения их параметров: содержание физической глины от 20,8 до 74,6 % массы сухой почвы (МСП), наименьшая влагоемкость от 16,9 до 32,2 % МСП, уровень допосливной влажности от 60 до 70 % наименьшей влагоемкости. Формировались контуры увлажнения со средней влажностью почвы, составляющей 90 % от наименьшей влагоемкости. Получены эмпирические зависимости для определения максимального и среднего радиуса (диаметра) контуров влажности при заданных глубинах увлажняемого слоя почвенной толщи, позволяющие прогнозировать объемы контуров влажности. Получены зависимость и методика расчета величины поливной нормы, обеспечивающей формирование контура влажности заданной глубины и заданного уровня увлажнения почвы, для широкого спектра гранулометрических и водно-физических характеристик почв. **Вывод.** Предложена методика расчета поливной нормы, необходимой для формирования в почвенном пространстве локального контура влажности с заданными размерно-влажностными параметрами при подаче поливной воды одним капельным микророводовыпуском.

Ключевые слова: капельный полив, поливная норма, влажность почвы, контур капельного увлажнения почвы, средний диаметр контура влажности, объем контура влажности

Для цитирования: Штанько А. С., Шкура В. Н. Определение поливной нормы для формирования первичного локального контура капельно-увлажненной почвы // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 1. С. 19–38. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-19-38>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Determining the irrigation rate for drip-moistened soil primary local contour formation

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: development of methodology for determining the irrigation rate value, which ensures the formation of a primary local contour of moistened soil in the soil space under drip irrigation with one emitter. **Materials and methods.** The methodological and factual basis of the development were materials and empirical dependencies obtained from the data of author's field studies of local moisture contours formed under various soil conditions with above-surface and surface drip irrigation. **Results and discussion.** The analysis and evaluation of known approaches to the calculation of irrigation rates for drip irrigation of plants is carried out, the direction of the development of the methodology is determined. Based on materials of field and office studies, 11 contour profiles of drip-moistened soil formed under various soil and technological conditions of drip irrigation were obtained. Soil conditions are characterized by a wide range of changes in their parameters: the content of physical clay is from 20.8 to 74.6 % of the dry soil mass (DSM), the lowest moisture capacity is from 16.9 to 32.2 % of DSM, the level of additional irrigation moisture is from 60 to 70 % of the lowest moisture capacity. Moisture contours were formed with an average soil moisture content of 90 % of the lowest moisture capacity. Empirical dependencies for determining the maximum and average radius (diameter) of moisture contours at given depths of the moistened soil layer, which make it possible to predict the volumes of moisture contours are obtained. The dependence and a method for calculating the irrigation rate value, which ensures the formation of a moisture contour of a given depth and a given level of soil moisture, are obtained for a wide range of granulometric and water-physical characteristics of soils. **Conclusion.** A method for calculating the irrigation rate required for the formation of a local moisture contour in soil space with specified dimensional and moisture parameters during irrigation water delivery by one drip micro emitter is proposed.

Keywords: drip irrigation, irrigation rate, soil moisture, drip-moistened contour, moisture contour average diameter, moisture contour volume

For citation: Shtanko A. S., Shkura V. N. Determining the irrigation rate for drip-moistened soil primary local contour formation. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(1):19–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-19-38>.

Введение. Величина поливной нормы ($N_{\text{пол}}$) является основным технологическим параметром искусственного увлажнения сельскохозяйственных угодий, реализуемого системами их капельного орошения. В процессе развития технологий капельного полива сельхозкультур использовались различные подходы и методики определения поливных

норм. Известны разработки и предложения ряда отечественных специалистов-гидромелиораторов (Г. Н. Аврамова, А. Д. Ахмедова, В. В. Бородычева, В. С. Бочарникова, М. К. Гаджиева, Е. Ю. Галиуллиной, А. И. Голованова, В. В. Изюмова, А. Т. Козыкеевой, Е. В. Кузнецова, М. Н. Лытова, Е. В. Мелиховой, А. С. Овчинникова, А. М. Олейника, Н. А. Пронько, Р. В. Прокопца, Г. А. Сенчукова, Е. А. Ходякова, М. Ю. Храброва, В. Н. Шкуры, А. С. Штанько, Б. Б. Шумакова, О. Е. Ясониди и др.). Подавляющее количество известных предложений по расчету значений поливных норм для капельного орошения сельскохозяйственных культур базируются на использовании зависимости А. Н. Костякова, предложенной для условий сплошного (по площади) увлажнения орошаемого участка, м³/га:

$$N_{\text{пол}} = 100 \cdot \bar{\gamma}_{\text{об}} \cdot h_{\text{увл}} \cdot (\bar{\beta}_{\text{п/п}} - \bar{\beta}_{\text{д/п}})^1, \quad (1)$$

где 100 – коэффициент перевода значений поливных норм в м³/га;

$\bar{\gamma}_{\text{об}}$ – средняя плотность сложения увлажняемого слоя почвы, т/м³;

$h_{\text{увл}}$ – требуемая глубина увлажняемого почвенного слоя, м;

$\bar{\beta}_{\text{п/п}}$ – осредненная по расчетному (увлажняемому) слою послеполивная влажность почвы в процентах от массы сухой почвы (% МСП);

$\bar{\beta}_{\text{д/п}}$ – заданное значение дополивной влажности почвы, % МСП.

Адаптирование зависимости (1) к условиям имеющего место при капельном орошении локального (т. е. несплошного) увлажнения почвенного пространства осуществлялось введением в нее корректирующего параметра (параметра локальности – $\Pi_{\text{лок}}$) и приведением ее к виду, м³/га:

$$N_{\text{пол}} = 100 \cdot \bar{\gamma}_{\text{об}} \cdot h_{\text{увл}} \cdot \Pi_{\text{лок}} \cdot (\bar{\beta}_{\text{п/п}} - \bar{\beta}_{\text{д/п}}). \quad (2)$$

Параметр локальности определяется соотношением капельно-увлажняемой площади ($S_{\text{увл}}$, м²) и площади поливного участка ($S_{\text{п/у}}$, м²) –

¹Здесь и в последующем с целью обеспечения единообразия изложения зависимости записаны в принятых авторами статьи обозначениях.

$\Pi_{\text{лок}} = S_{\text{увл}} / S_{\text{п/у}}$, величина которого выражается в долях от единицы. Значения этого параметра определяются специалистами по-разному – в зависимости от природно-климатических условий (степени аридности климата, состояния природной увлажненности территорий, почвенных характеристик), влаголюбивости (засухоустойчивости) возделываемых культур и др. [1–3]. Для многолетних древесно-плодовых насаждений в пособии к СНиП 2.06.03-85 «Мелиоративные системы и сооружения» [1] параметр локальности предлагается (рекомендуется) определять по соотношению: $\Pi_{\text{лок}} = n_{\text{кон}} \cdot \omega_{\text{кон}} / \omega_{\text{пит}}$, где $n_{\text{кон}}$ – количество капельных микроводовыпусков (капельниц), обеспечивающих орошение растения; $\omega_{\text{кон}}$ – площадь горизонтальной проекции увлажненной почвы («контура влажности») при поливе одной капельницей, м^2 ; $\omega_{\text{пит}} = L_{\text{м/р}} \cdot B_{\text{м/р}}$ – площадь питания растения, выделенная ему при посадке (или площадь корнеосвоенного почвенного пространства), м^2 ; $L_{\text{м/р}}$ – расстояние между двумя соседствующими растениями в ряду (при рядовой посадке культур), м; $B_{\text{м/р}}$ – ширина междурядового пространства (расстояние между двумя соседствующими рядами растений) или ширина свето-технологического коридора в садовом насаждении.

Зависимость (2) в целом соответствует существу технологии, но ее применение вызывает значительные затруднения при определении конкретных и соответствующих условиям культивируемых растений значений параметра $\Pi_{\text{лок}}$, необходимой площади увлажнения $S_{\text{увл}}$, площади контура влажности $\omega_{\text{кон}}$ и площади питания культуры $\omega_{\text{пит}}$. Широкие диапазоны изменения рекомендуемых значений этих параметров и имеющие место неопределенности для их установления не позволяют однозначно определить величины поливных норм для капельного орошения.

Известны предложения по корректировке значений параметра локальности ($\Pi_{\text{лок}}$) с учетом коэффициента неравномерности увлажнения (увлажненности) почвы в сложноформенных контурах влажности $k_{\text{нер}} = 0,5 \dots 0,7$ и (или) поправочного (экспериментально устанавливаемого) коэффициента, принимающего во внимание «форму расположения корней растения», $k_{\text{кор}} = 0,8$ [2].

Известны и другие (в разной степени сходные с вышеприведенными) зависимости для расчета поливных норм при капельном орошении сельскохозяйственных культур, определяемых в кубических метрах поливной воды на единицу орошаемой площади (гектар, десятину, акр). Рассмотренный «площадной» подход к определению норм капельного полива применительно к орошению древесных и кустарниковых плодовых насаждений не является методологически обоснованным и рациональным (не соответствует положениям точного (прецизионного) орошаемого земледелия) и приводит к значительным погрешностям в их значениях.

Известны предложения по расчету поливных норм для капельного орошения плодовых, культивируемых в промышленных садах растений, измеряемых в литрах на дерево [2, 3]. Отсутствие должного опытного подтверждения предлагаемого подхода к точному определению параметров капельного полива не привело к широкому применению указанного подхода.

В большей степени рассматриваемому случаю соответствует подход, ориентированный на определение поливных норм (объемов поливной воды) для одной капельницы (в литрах на капельницу $(N_{\text{пол}})_{\text{кап}}$, л/кап.), обеспечивающих формирование контура влажности с определенными геометрическими и влажностными параметрами. К примерам такого подхода относятся предложения М. К. Гаджиева, А. М. Олейника, М. Ю. Храброва и др. [2–4], предусматривающие использование зависимости, л/кап.:

$$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 0,01 \cdot \bar{\gamma}_{\text{об}} \cdot \omega_{\text{кон}} \cdot h_{\text{увл}} \cdot (\bar{\beta}_{\text{п/п}} - \bar{\beta}_{\text{д/п}}), \quad (3)$$

где $\omega_{\text{кон}} = 0,785 d_{\text{кон}}^2$ – площадь локального контура влажности, формирующегося в почвенном пространстве при поливе одной капельницей, м²;

$d_{\text{кон}}$ – диаметр проекции контура капельного увлажнения почвы (зоны увлажненной почвы) на горизонтальную плоскость, м;

$h_{\text{увл}} = h_{\text{кон}}$ – глубина увлажняемого слоя почвы или высота единичного контура влажности, формирующегося при капельном поливе, м.

Допуская, что $\omega_{\text{кон}} \cdot h_{\text{кон}} = W_{\text{кон}}$, зависимость (3) преобразуем к виду, л/кап.:

$$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 0,01 \cdot \bar{\gamma}_{\text{об}} \cdot W_{\text{кон}} \cdot (\bar{\beta}_{\text{п/п}} - \bar{\beta}_{\text{д/п}}), \quad (4)$$

где $W_{\text{кон}}$ – объем единичного контура капельного увлажнения почвы, м³.

Зависимость (4) в полной мере соответствует условиям процесса контурообразования – капельного увлажнения почвенной толщи с формированием контура влажности подачей поливной воды надземно или наземно расположенным капельным микроводовыпуском (капельницей).

При использовании вышеприведенных зависимостей (3) и (4) разработчиками предлагались основанные на эмпирических данных (измерений контуров влажности в строго определенных условиях их формирования) значения диаметров ($d_{\text{кон}}$) и глубин ($h_{\text{кон}}$) контуров. В результате аппроксимации очертаний (ограничивающих линий) контуров в работах А. М. Олейника, М. К. Гаджиева, О. Е. Ясониди, М. Ю. Храброва, А. Д. Ахмедова, Е. Ю. Галиуллиной [2–5] предложены зависимости для определения их объемов ($W_{\text{кон}}$). Так, М. Ю. Храбровым предложены зависимости для определения объемов контуров, очертание которых соответствует формам: усеченного шара (для условий тяжелых почв), цилиндра (для условий почв среднего гранулометрического состава) и усеченного конуса (для условий легких почв).

Известно предложение Е. В. Мелиховой [6] по определению поливной нормы на одну капельницу при формировании в почвенной толще контура увлажненного почвенного пространства, имеющего форму усеченного эллипсоида вращения, по зависимости, имеющей вид, м³/кап.:

$$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 4,96 \cdot h_{\text{кон}}^2 \cdot \bar{\gamma}_{\text{об}} \cdot (\bar{\beta}_{\text{п/п}} - \bar{\beta}_{\text{д/п}}).$$

Условность принятой формы контура, отсутствие строгих ограничений по количественным значениям условий ее формирования, недостаточность эмпирического обоснования зависимости применительно к условиям различных типов и видов почв не позволяют использовать ее в широком спектре условий контурообразования. На ограниченность условий ее применения указано в работе А. Ф. Рогачева, Е. В. Мелиховой [7], где отмечена возможность формирования и иных (отличных от рассмотренной) форм контуров, имеющих вид «параболы вращения», «конуса», «цилиндра» и «гиперболоида вращения».

Известно предложение А. Т. Козыкеевой и А. О. Жатканбаевой [8] по определению величины поливной нормы для контуров эллиптически-параболоидной формы, формирующихся в почвенном пространстве при «большой интенсивности водоподачи», с использованием зависимости, м³/кап.:

$$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 1,57 \cdot h_{\text{кон}} \cdot r_{\text{кон}}^2 \cdot \bar{\gamma}_{\text{об}} \cdot (\bar{\beta}_{\text{п/п}} - \bar{\beta}_{\text{д/п}}),$$

где $r_{\text{кон}}$ – радиус проекции контура капельного увлажнения почвы (зоны увлажненной почвы) на горизонтальную плоскость, м.

Кроме рассмотренных выше подходов к определению поливной нормы при капельном поливе известны и другие, не получившие до настоящего времени широкого применения предложения по установлению поливной нормы, а их разработка продолжается до настоящего времени [7, 9], что свидетельствует об актуальности решения этой задачи.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи выбран экспериментальный метод, предусматривающий проведение полевых ис-

следований контуров капельно-увлажняемого почвенного пространства. Измерения контуров влажности предусматривали определение их геометрических и влажностных параметров, позволяющих в процессе камеральной обработки вычислить объемы капельно-увлажненной почвы. Исследования контуров выполнены на четырех опытных площадках с применением известных методик [3, 10]. Контуров влажности формировались подачей поливной воды на поверхность почвенного покрова из наземно расположенных капельниц с расходом 2 л/ч. В процессе исследования проведены замеры 11 контуров. Почвенные и технологические условия формирования контуров влажности приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные об условиях проведения капельных поливов

Table 1 – Data on conditions for drip irrigation

№ пло- щадки	Почвенные условия опытов			Технологические условия опытов		
	$\bar{W}_г$, % МСП	$\bar{W}_{нв}$, % МСП	$\bar{\gamma}_{об}$, т/м ³	$\bar{\beta}_{д/п}$, % МСП	$\bar{\beta}_{п/п}$, % МСП	$(N_{пол})_{кап}$, л/кап.
1	20,8	16,9	1,36	10,80	15,20	20,0
2	48,0	23,4	1,28	18,91	21,06	20,0
3	60,0	29,0	1,29	19,72	26,10	20,0
4	74,6	32,2	1,39	21,25	30,59	20,0; 35,0; 40,0; 55,0
Примечание – $\bar{W}_г$ – среднее по слою содержание физической глины, % МСП; $\bar{W}_{нв}$ – средняя по слою наименьшая влагоемкость почвы, % МСП.						

При выборе качественно-количественных показателей, определяющих условия проведения капельного полива (каплевания) и процесс контурообразования (формирования контуров влажности), учтено, что на параметры контура капельного увлажнения почвенного пространства в общем случае оказывает влияние значительное количество факторов, включая почвенные, климатические и технологические. В качестве почвенных характеристик выбраны: гранулометрический состав почвенного слоя, выраженный через содержание в нем физической глины ($\bar{W}_г$, % МСП), плотность сложения слоя почвы ($\bar{\gamma}_{об}$, т/м³) и ее наименьшая влагоемкость ($\bar{W}_{нв}$, % МСП). В определенной степени на процесс формирования конту-

ров влажности оказывают влияние и другие характеристики почвы (тип почвы, содержание гумуса, химический состав и др.), но они в качестве показателей не учитывались.

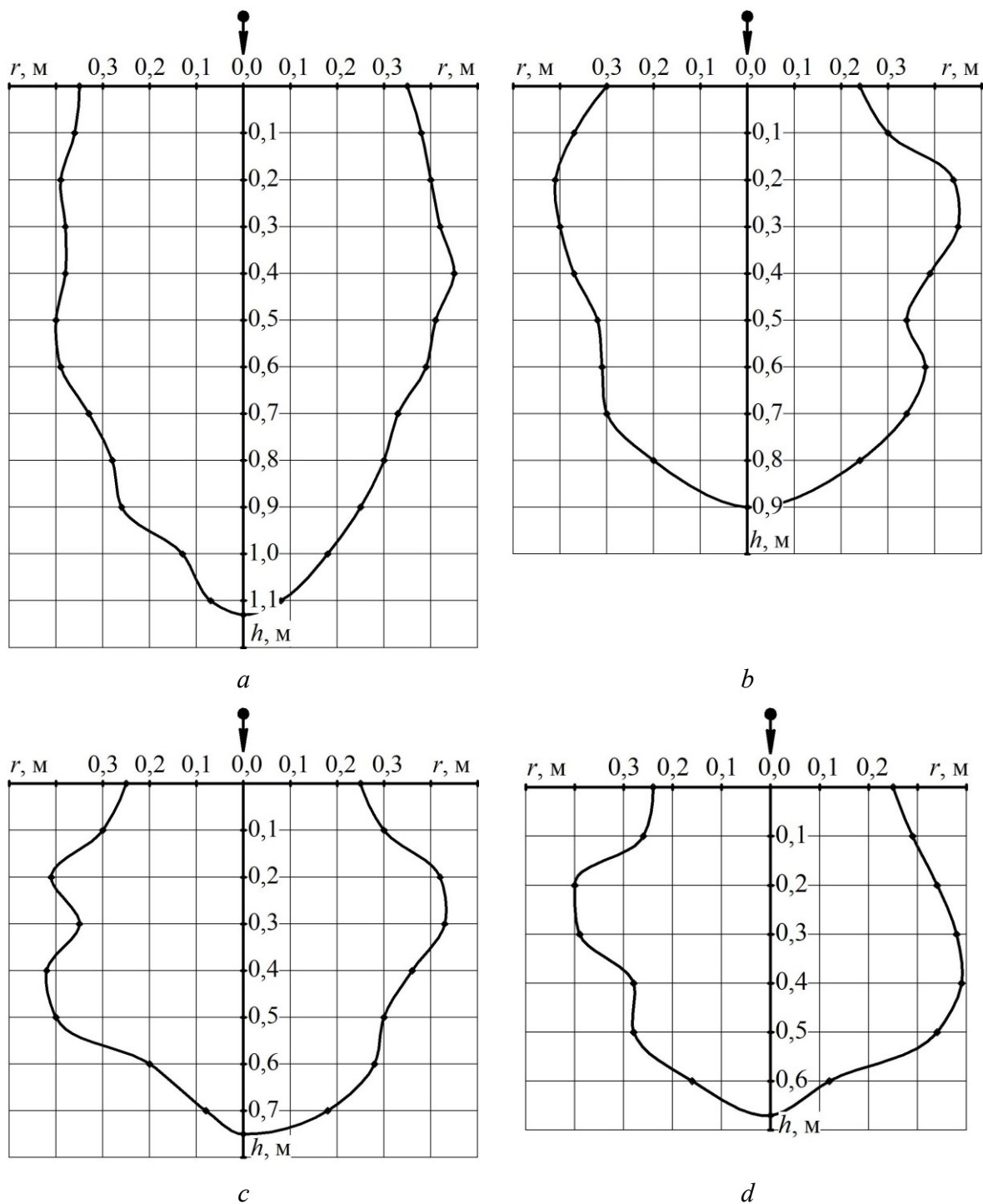
В качестве технологических параметров капельного полива рассматривались влажностные показатели почвы (дополивная $\bar{\beta}_{д/п}$ и постполивная $\bar{\beta}_{п/п}$ влажности) и поливная норма на одну капельницу $(N_{пол})_{кап}$. Такие возможные технологические факторы влияния, как расход капельницы (интенсивность водоподачи), продолжительность полива и высота расположения капельниц над поверхностью земли, в опытах не рассматривались.

Примеры профилей локальных (единичных) контуров влажности, сформированных в разных почвенных условиях при одинаковом объеме водоподачи $(N_{пол})_{кап} = 20,0$ л/кап., проиллюстрированы на рисунке 1.

Профили контуров влажности (по рисунку 1) позволяют оценить параметры их геометрии при одинаковых значениях поливных норм $((N_{пол})_{кап} = 20$ л/кап.) и одинаковых уровнях постполивной влажности почвы ($\bar{\beta}_{п/п}$), составляющих 90 % от влажности, соответствующей ее наименьшей влагоемкости ($\bar{W}_{нв}$), в почвах с разными значениями $\bar{W}_г$ и $\bar{W}_{нв}$.

Для оценки влияния величины поливной нормы на геометрические параметры контуров влажности на четвертой опытной площадке (т. е. в одинаковых почвенных условиях) было поставлено три дополнительных опыта с выдачей поливной нормы, составляющей 35,0; 40,0 и 55,0 л/кап. Виды профилей этих контуров влажности представлены на рисунке 2.

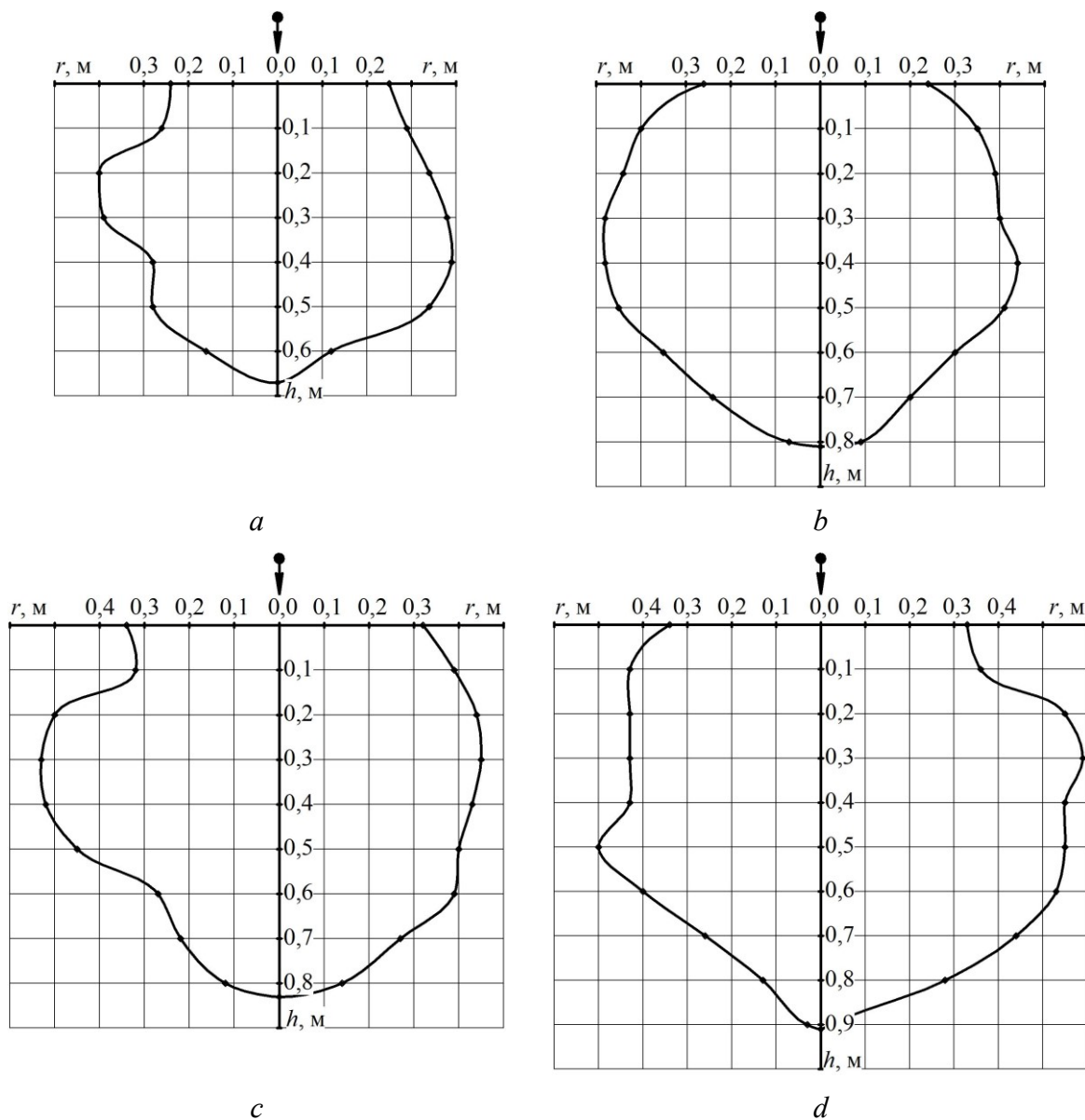
Полученные опытные контуры влажности, вкупе с другими, полученными нами ранее [11, 12], использованы при разработке методики расчета поливной нормы для капельного орошения почвы с формированием в почвенном пространстве локального первичного контура влажности.



a – при $\bar{W}_r = 20,8 \%$ МСП; b – при $\bar{W}_r = 48,0 \%$ МСП;
 c – при $\bar{W}_r = 60,0 \%$ МСП; d – при $\bar{W}_r = 74,6 \%$ МСП

Рисунок 1 – Профили опытных контуров влажности почвы

Figure 1 – Profiles of experimental moisture contours



a – при $(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 20,0$ л/кап.; b – при $(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 35,0$ л/кап.;
 c – при $(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 40,0$ л/кап.; d – при $(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 55,0$ л/кап.

Рисунок 2 – Профили локальных контуров влажности, сформировавшихся в среднесуглинистом черноземе ($\bar{W}_{\text{г}} = 74,6$ % МСП; $\bar{W}_{\text{нв}} = 32,2$ % МСП)

Figure 2 – Profiles of local moisture contours, formed in medium loamy chernozem ($\bar{W}_{\text{г}} = 74,6$ % DSM; $\bar{W}_{\text{нв}} = 32,2$ % DSM)

Результаты и обсуждение. Анализ известных предложений по определению поливных норм для капельного орошения сельскохозяйственных угодий, обеспечивающих формирование единичного контура увлажненной

почвы с определенными значениями размерно-влажностных параметров, позволил выбрать приемлемую для расчета зависимость вида, л/кап.:

$$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 10 \cdot \bar{\gamma}_{\text{об}} \cdot W_{\text{кон}} \cdot \Delta\beta, \quad (5)$$

где $(N_{\text{пол}})_{\text{кап}}$ – поливная норма на одну капельницу или на один локальный контур увлажнения почвы, формируемый одной капельницей, л/кап.;

$\Delta\beta = (\bar{\beta}_{\text{п/п}} - \bar{\beta}_{\text{д/п}}) = (\varepsilon_{\text{п/п}} - \varepsilon_{\text{д/п}}) \cdot \beta_{\text{нв}}$ – диапазон изменения влажности почвы от постполивного до дополивного уровня значений, % МСП;

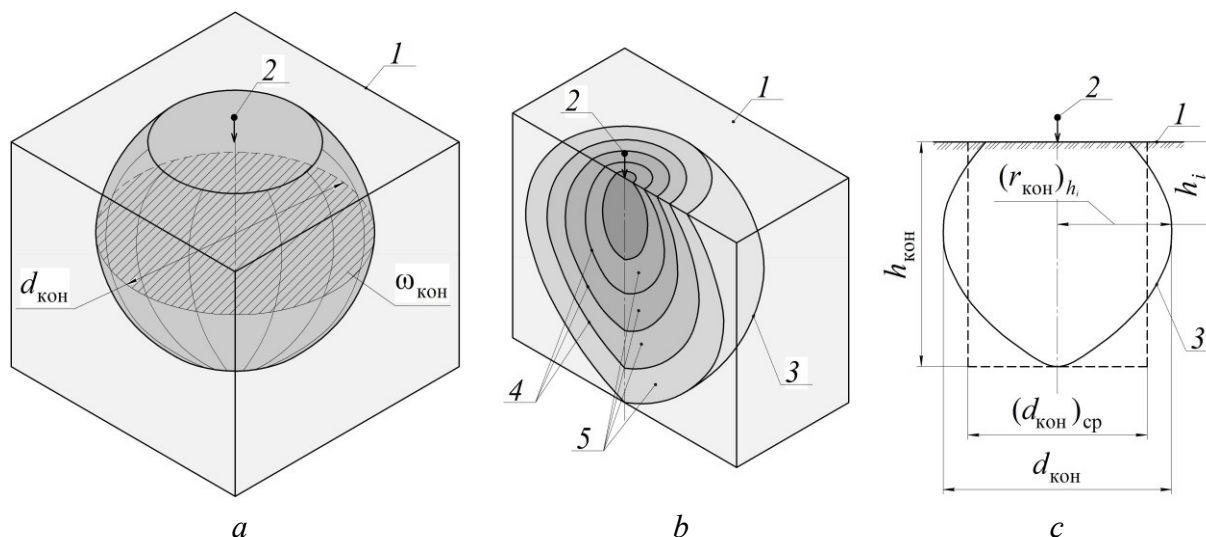
$\beta_{\text{нв}}$ – влажность, соответствующая наименьшей влагоемкости, % МСП;

$\varepsilon_{\text{д/п}}$ – показатель, характеризующий средний по глубине увлажняемого слоя уровень дополивной влажности почвы в долях от $\beta_{\text{нв}}$, принимаемый по данным измерений, а при расчетах от 0,6 до 0,7 от $\beta_{\text{нв}}$ для легких по гранулометрическому составу и 0,7–0,75 для тяжелых почв;

$\varepsilon_{\text{п/п}}$ – показатель, характеризующий уровень постполивной влажности почвенного пространства в контуре (зоне) капельного увлажнения, принимаемый (во избежание значительных по размерам зон переувлажненной почвы в пределах контура влажности) в диапазоне 0,85–0,95 $\beta_{\text{нв}}$;

$W_{\text{кон}}$ – объем контура влажности (капельно-увлажненной почвы), м³.

Применение зависимости (5) затруднено в связи с проблемностью определения значений объемов единичных контуров влажности, формируемых в подкапельном почвенном пространстве при капельном поливе с подачей воды одним капельным микроводовыпуском (одной капельницей). Известные предложения [3, 4, 6, 10] по расчетным зависимостям для определения значений $W_{\text{кон}}$ сделаны для определенных аппроксимаций очертаний контуров и характеризуются узкими диапазонами условий их применения. Предшествующими авторскими исследованиями [11–13] была установлена возможность одноформенной аппроксимации контуров влажности, общие виды и расчетная схема которых приведены на рисунке 3.



a – общий вид контура влажности почвы; *b* – общий вид профиля контура влажности почвы; *c* – расчетная схема профиля контура влажности почвы;
1 – поверхность земли; 2 – капельница; 3 – границная линия локального контура влажности почвы; 4 – внутриконтурные изоплеты влажности почвы;
5 – внутриконтурные зоны влажности почвы; $(r_{\text{кон}})_{h_i}$ – радиус профиля контура в сечении, заглубленном под поверхность земли на величину h_i , м
a – general view of soil moisture contour; *b* – general view of soil moisture contour profile;
c – the design scheme of soil moisture contour profile; 1 – ground surface; 2 – emitter;
3 – boundary line of local soil moisture contour; 4 – intra-contour isopleths of soil moisture;
5 – intra-contour zones of soil moisture; $(r_{\text{кон}})_{h_i}$ – contour profile radius in a section buried under the surface by value h_i , m

Рисунок 3 – Общий вид (а), профиль (b) и расчетная схема (c) контура влажности почвы

Figure 3 – General view (a), profile (b) and calculated diagram (c) of soil moisture contour

В соответствии с данными рисунков 1–3 замеренные (фактические) и аппроксимированный контуры влажности характеризуются сложной формой, что затрудняет получение зависимости для определения их объема без предварительного установления их линейных параметров. Анализ глубинных ($h_{\text{кон}}$) и плановых ($d_{\text{кон}}$) размеров контуров позволил установить наличие функциональных связей вида: $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = f(\bar{W}_{\text{г}})$ и $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = f(\bar{W}_{\text{нв}})$. Характер указанных связей проиллюстрирован на рисунке 4.

Приведенные на рисунке 4 связи аппроксимируются зависимостями:

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,009 \cdot \bar{W}_{\text{г}} + 0,52, \quad (6)$$

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,034 \cdot \bar{W}_{\text{HB}} + 0,14. \quad (7)$$

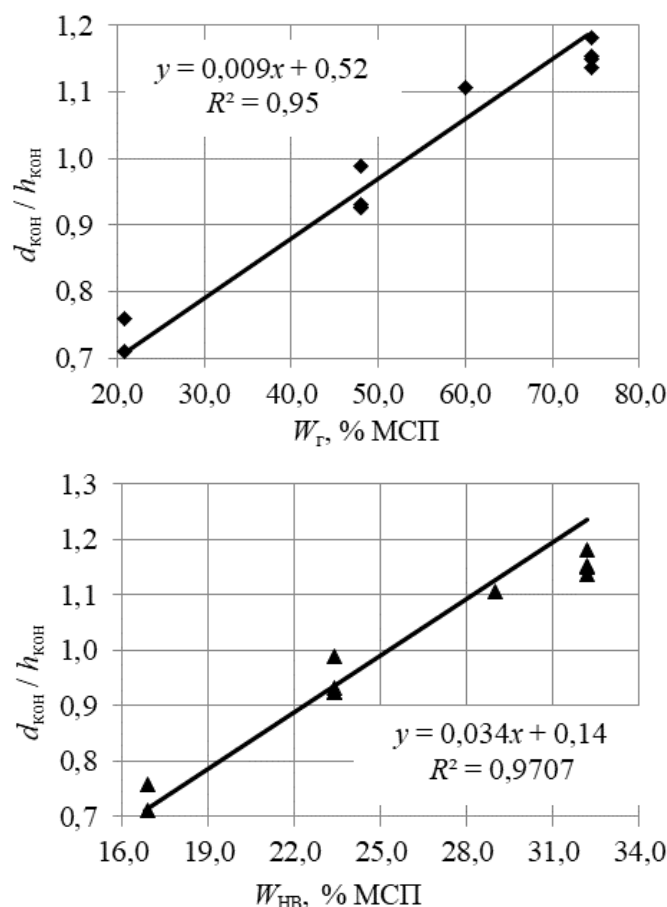


Рисунок 4 – Графическое отображение функциональных связей

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = f(\bar{W}_{\gamma}) \text{ и } d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = f(\bar{W}_{\text{HB}})$$

Figure 4 – Graphical display of functional relationships

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = f(\bar{W}_{\gamma}) \text{ and } d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = f(\bar{W}_{\text{HB}})$$

С учетом многообразия возможных сочетаний значений характеристик $\bar{W}_{\gamma}$ и $\bar{W}_{\text{HB}}$ в почвах различного типа, вида и состояния более точные значения соотношений $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ могут быть получены по зависимости:

$$d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}} = 0,5 \cdot \left[(0,009 \cdot \bar{W}_{\gamma} + 0,52) + (0,034 \cdot \bar{W}_{\text{HB}} + 0,14) \right]. \quad (8)$$

Предложенные зависимости соответствуют широкому спектру почвенных условий контурообразования, что подтверждается приведенными в таблице 2 результатами сопоставления опытных данных, полученных известными специалистами в области капельного орошения, с расчетными значениями $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$, полученными по зависимостям (6)–(8).

Таблица 2 – Данные сопоставления рассчитанных по зависимости (8) значений $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ с опытными значениями этого соотношения, полученными отечественными специалистами

Table 2 – Comparison data calculated according to the dependence (8) values $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$ with the experimental values of this ratio obtained by domestic specialists

Автор	Источник информации	Почвенные условия		Значение $d_{\text{кон}} / h_{\text{кон}}$		Отклонение, %
		$\bar{W}_r$, % МСП	$\bar{W}_{\text{нв}}$, % МСП	опыт	расчет	
Е. Ю. Галиуллина	[5]	40,0	22,9	0,91	0,92	+5,2
М. Н. Лытов	[14]	42,1	24,9	0,96	0,90	+6,2
Е. В. Мелихова	[6]	–	23,1	0,86	0,92	–7,0
А. М. Олейник	[2]	47,5	25,0	1,07	0,98	+8,4
Н. А. Пронько	[15]	35,0	23,1	0,87	0,83	+4,6
Д. Л. Обумахов	[10]	22,2	17,4	0,71	0,74	4,2
Д. Л. Обумахов	[10]	75,4	33,0	0,80	1,12	–3,7
Д. Л. Обумахов	[10]	31,2	22,0	0,75	0,79	–5,3
Д. Л. Обумахов	[10]	38,2	23,2	0,92	0,89	+3,3
О. Е. Ясониди	[3]	58,9	28,1	0,98	1,05	–6,7
О. Е. Ясониди	[3]	66,4	30,8	1,19	1,10	+7,6

Для определения значений максимального диаметра локальных контуров влажности почвы $d_{\text{кон}}$ зависимость (8) преобразуется к виду, м:

$$d_{\text{кон}} = 0,5 \cdot h_{\text{кон}} \cdot \left[(0,009 \cdot \bar{W}_r + 0,52) + (0,034 \cdot \bar{W}_{\text{нв}} + 0,14) \right]. \quad (9)$$

Зависимость (9) позволяет по заданной величине увлажняемого почвенного слоя ($h_{\text{кон}} = h_{\text{увл}}$) определять значение диаметра контура $d_{\text{кон}}$, величина которого по ряду предложений использовалась при расчетах площади ($\omega_{\text{кон}}$) и объема ($W_{\text{кон}}$) контура влажности. Такой подход к использованию $d_{\text{кон}}$ приводил к получению завышенных значений $\omega_{\text{кон}}$ и $W_{\text{кон}}$.

Более точные значения площадных и объемных параметров контуров могут быть получены при использовании средних диаметров контуров $\bar{d}_{\text{кон}}$ и при условной аппроксимации контуров к форме цилиндра.

Для установления значений среднего диаметра контура проведена камеральная обработка вертикальных профилей опытных контуров двумя спо-

собами – определением $\bar{d}_{\text{кон}}$ по 10 сечениям контуров горизонтальными плоскостями как $\bar{d}_{\text{кон}} = \sum (d_{\text{кон}})_{h_i} / 10$ и через отношение площади вертикального профиля контура $\omega_{\text{проф}}$ к его высоте $h_{\text{кон}}$. Корреляционно-дисперсионным анализом полученных данных установлено наличие функциональной связи между значениями $\bar{d}_{\text{кон}}$ и $d_{\text{кон}}$, описываемой уравнением, м:

$$\bar{d}_{\text{кон}} = 0,780 \cdot d_{\text{кон}}. \quad (10)$$

Совместное решение зависимостей (9) и (10) позволяет получить формулу для определения среднего диаметра контура влажности $\bar{d}_{\text{кон}}$, м:

$$\bar{d}_{\text{кон}} = 0,390 \cdot h_{\text{кон}} \cdot [(0,009 \cdot \bar{W}_{\text{г}} + 0,52) + (0,034 \cdot \bar{W}_{\text{нв}} + 0,14)],$$

или

$$\bar{d}_{\text{кон}} = 0,390 \cdot h_{\text{кон}} \cdot (0,009 \cdot \bar{W}_{\text{г}} + 0,034 \cdot \bar{W}_{\text{нв}} + 0,66). \quad (11)$$

Зависимость (11) и условно принятая аппроксимация контура к форме цилиндра позволяют определить значение объема контура по формуле, м³:

$$W_{\text{кон}} = 0,785 \cdot \bar{d}_{\text{кон}}^2 \cdot h_{\text{кон}}. \quad (12)$$

Подстановкой зависимости (11) в формулу (12) получаем зависимость, м³:

$$W_{\text{кон}} = 0,119 \cdot h_{\text{кон}}^3 \cdot (0,009 \cdot \bar{W}_{\text{г}} + 0,034 \cdot \bar{W}_{\text{нв}} + 0,66)^2. \quad (13)$$

С учетом формулы (13) зависимость (5) для определения поливной нормы, рассчитанной на один локальный контур влажности $(N_{\text{пол}})_{\text{кап}}$, примет вид, л/кап. или л/кон.:

$$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = (N_{\text{пол}})_{\text{кон}} = 1,19 \cdot \bar{\gamma}_{\text{об}} \cdot h_{\text{кон}}^3 \cdot (0,66 + 0,009 \cdot \bar{W}_{\text{г}} + 0,034 \cdot \bar{W}_{\text{нв}})^2 \times \\ \times (\varepsilon_{\text{п/п}} - \varepsilon_{\text{д/п}}) \cdot \beta_{\text{нв}}.$$

Полученные зависимости позволяют предложить методику расчета поливной нормы, обеспечивающей формирование единичного первичного контура влажности с требуемыми размерными и влажностными параметрами ($h_{\text{кон}} = h_{\text{увл}}$ и $\beta_{\text{п/п}}$) в определенных почвенных и технологических

условиях капельного полива (т. е. при заданных значениях $\bar{\gamma}_{об}$, $\bar{W}_г$, $\bar{W}_{нв}$ и $\bar{\beta}_{д/п}$) при подаче поливной воды надземно расположенной капельницей с расходом, составляющим $q_{кап} = 2$ л/ч. Методика предусматривает последовательное выполнение следующих технологических операций.

- 1 Установление почвенных характеристик $\bar{\gamma}_{об}$, $\bar{W}_г$, $\bar{W}_{нв}$ и $\bar{\beta}_{д/п}$.
- 2 Назначение технологических параметров полива: $h_{кон} = h_{увл}$ и $\beta_{п/п}$.
- 3 Расчет геометрических параметров контуров $d_{кон}$, $\bar{d}_{кон}$ и $W_{кон}$.
- 4 Расчет поливной нормы на один контур (капельницу) $(N_{пол})_{кап}$.
- 5 Установление поливной нормы на 1 га орошаемого угодья, л/га:

$$(N_{пол})_{га} = n_{кап} \cdot (N_{пол})_{кап},$$

где $n_{кап}$ – количество одновременно функционирующих капельниц на 1 га.

Выводы

1 Получены данные полевых измерений параметров контуров влажности, формирующихся в различных типах и видах почв, характеризующихся широким спектром характеристик по гранулометрическому составу, наименьшей влагоемкости и плотности сложения.

2 Получена система расчетных зависимостей для прогнозирования линейных размеров локальных контуров влажности почвы и их объемов.

3 Предложена методика расчета поливной нормы, рассчитанной в литрах на одну капельницу, обеспечивающей в заданных почвенных и технологических условиях формирование первичных локальных контуров влажности с требуемой глубиной увлажнения почвенной толщи.

Список источников

1. Капельное орошение: пособие к СНиП 2.06.03-85 «Мелиоративные системы и сооружения»: утв. Приказом Союзводпроекта от 11 апр. 1986 г. № 113. М.: Союзводпроект, 1986. 149 с.
2. 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.
3. Ясонида О. Е. Капельное орошение. Новочеркасск: Лик, 2011. 322 с.

4. Храбров М. Ю. Расчет распространения влаги в почве при капельном орошении // Мелиорация и водное хозяйство. 1999. № 4. С. 34–35.
5. Ахмедов А. Д., Галиуллина Е. Ю. Контуры увлажнения почвы при капельном орошении // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2012. № 3. С. 183–188.
6. Мелихова Е. В. Моделирования процессов влагопереноса при оросительных мелиорациях с учетом эвапотранспирации // Парадигма аграрного образования в условиях цифровой экономики: материалы междунар. науч.-практ. конф. Волгоград, 2019. С. 355–362.
7. Рогачев А. Ф., Мелихова Е. В. Компьютерное моделирование и параметризация в среде MathCAD контуров увлажнения при капельном орошении // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 4(64). С. 367–378. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-37.
8. Жатканбаева А. О., Козыкеева А. Т., Мустафаев Ж. С. Математическое моделирование линейного параметра контуров увлажнения при капельном орошении // Исследования и результаты. 2016. № 2. С. 120–127.
9. Расчет поливных норм при капельном орошении в условия сухостепного Заволжья / Н. А. Пронько, В. В. Корсак, Ю. Ю. Каднова, М. Ю. Филиппова, О. А. Баклушина // Основы рационального природопользования: материалы VI Нац. конф. с междунар. участием. Саратов, 2020. С. 55–59.
10. Шкура В. Н., Обумахов Д. Л., Рыжаков А. Н. Капельное орошение яблони: монография / под ред. В. Н. Шкуры. Новочеркасск: Лик, 2014. 310 с.
11. Штанько А. С., Шкура В. Н. Способ графоаналитического построения очертаения контуров капельного увлажнения почв // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2018. № 1(29). С. 67–85. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=526&id=531> (дата обращения: 04.03.2021).
12. Штанько А. С., Шкура В. Н. Геометрия локальных контуров капельного увлажнения почвы, формирующихся в южных черноземах // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2022. Т. 12, № 3. С. 123–140. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1297> (дата обращения: 04.09.2022). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-123-140>.
13. Шкура В. Н., Штанько А. С. Теоретическое обоснование компоновочно-конструктивных решений поливных модулей систем капельного орошения древесно-плодовых насаждений // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2022. Т. 12, № 4. С. 119–135. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1316> (дата обращения: 16.11.2022). DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-119-135.
14. Лытов М. Н. Особенности применения дифференцированных режимов водобеспечения при капельном способе орошения // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2020. № 2(78). С. 54–60.
15. Пронько Н. А., Корсак В. В., Ломовцева А. Н. Контур увлажнения при капельном орошении на почвах Заволжья // Научная жизнь. 2015. № 1. С. 74–81.

References

1. *Kapel'noe oroshenie: posobie k SNIp 2.06.03-85 "Meliorativnye sistemy i sooruzheniya"* [Drip Irrigation: manual to SNIp 2.06.03-85 "Reclamation Systems and Structures"]. Moscow, Soyuzvodproekt Publ., 1986, 149 p. (In Russian).
2. Oleinik A.M., Gadzhiev M.K., 1984. *Kharakter formirovaniya konturov uvlazhneniya pochvy pri kapel'nom oroshenii* [The nature of formation of soil moisture contours under drip irrigation]. *Rezhimy orosheniya i vodopotreblenie sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na Severnom Kavkaze* [Irrigation Regimes and Water Consumption of Agricultural Crops in the North Caucasus]. Novocherkassk, pp. 129-133. (In Russian).

3. Yasonidi O.E., 2011. *Kapel'noe oroshenie* [Drip Irrigation]. Novocherkassk, Lik Publ., 322 p. (In Russian).
4. Khrabrov M.Yu., 1999. *Raschet rasprostraneniya vlagi v pochve pri kapel'nom oroshenii* [Calculation of moisture distribution in soil during drip irrigation]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Irrigation and Water Management], no. 4, pp. 34-35. (In Russian).
5. Akhmedov A.D., Galiullina E.Yu., 2012. *Kontury uvlazhneniya pochvy pri kapel'nom oroshenii* [Contours of soil moistening under drip irrigation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 3, pp. 183-188. (In Russian).
6. Melikhova E.V., 2019. *Modelirovaniya protsessov vlagoperenosa pri orositel'nykh melioratsiyakh s uchetom evapotranspiratsii* [Modeling of moisture transfer processes under irrigation taking into account evapotranspiration]. *Paradigma agrarnogo obrazovaniya v usloviyakh tsifrovoy ekonomiki: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Paradigm of Agrarian Education under the Conditions of Digital Economy: Proc. of International Scientific-Practical Conference]. Volgograd, pp. 355-362. (In Russian).
7. Rogachev A.F., Melikhova E.V., 2021. *Kompyuternoe modelirovanie i parametri-zatsiya v srede MathCAD konturov uvlazhneniya pri kapel'nom oroshenii* [Computer modeling and parameterization in the MathCAD environment of moisture contours during drip irrigation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee profes-sional'noe obrazovanie* [Proceedings of Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], no. 4(64), pp. 367-378, DOI: 10.32786/2071-9485-2021-04-37. (In Russian).
8. Zhatkanbaeva A.O., Kozykeeva A.T., Mustafaev Zh.S., 2016. *Matematicheskoe modelirovanie lineynogo parametra konturov uvlazhneniya pri kapel'nom oroshenii* [Mathematical modeling linear parameter of moisture contours under drip irrigation]. *Issledovaniya i rezul'taty* [Research and Results], no. 2, pp. 120-127. (In Russian).
9. Pronko N.A., Korsak V.V., Kadnova Yu.Yu., Phillipova M.Yu., Baklushina O.A., 2020. *Raschet polivnykh norm pri kapel'nom oroshenii v usloviyakh sukhostepnogo Zavolzh'ya* [Calculation of irrigation rates for drip irrigation under the conditions of Trans-Volga dry steppe]. *Osnovy ratsional'nogo prirodopol'zovaniya: materialy VI Natsionalnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Basis of Rational Use of Nature Resources: Proc. of VI National Conference with International Participation]. Saratov, pp. 55-59. (In Russian).
10. Shkura V.N., Obumakhov D.L., Ryzhakov A.N., 2014. *Kapel'noe oroshenie ya-bloni: monografiya* [Drip Irrigation of Apple Tree: monograph]. Novocherkassk, Lick Publ., 310 p. (In Russian).
11. Shtanko A.S., Shkura V.N., 2018. [Method of graphoanalytical design of moisture contour under drip irrigation]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 1(29), pp. 67-85, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=526&id=531> [accessed 04.03.2021]. (In Russian).
12. Shtanko A.S., Shkura V.N., 2022. [Geometry of local drip soil moisture contours formed in southern chernozems]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 12, no. 3, pp. 123-140, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1297> [accessed 04.09.2022], <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-123-140>. (In Russian).
13. Shkura V.N., Shtanko A.S., 2022. [Theoretical substantiation of layout and design solutions for irrigation modules of drip irrigation systems in tree and fruit plantations]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 12, no. 4, pp. 119-135, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1316> [accessed 16.11.2022], DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-119-135. (In Russian).
14. Lytov M.N., 2020. *Osobennosti primeneniya differentsirovannykh rezhimov vo-doobespecheniya pri kapel'nom sposobe orosheniya* [Features of differentiated water supply

modes application with drip irrigation method]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 2(78), pp. 54–60. (In Russian).

15. Pronko N.A., Korsak V.V., Lomovtseva A.N., 2015. *Kontur uvlazhneniya pri kapel'nom oroshenii na pochvakh Zavolzh'ya* [Moisture contour under drip irrigation on soils of the Trans-Volga region]. *Nauchnaya zhizn* [Scientific Life], no. 1, pp. 74–81. (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 19.12.2022; одобрена после рецензирования 19.01.2023; принята к публикации 07.02.2023.

The article was submitted 19.12.2022; approved after reviewing 19.01.2023; accepted for publication 07.02.2023.