

УДК 631.674.6

DOI: 10.31774/2222-1816-2019-1-55-71

А. С. Штанько, В. Н. Шкура

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ВЛАЖНОСТИ ВНУТРИКОНТУРНОГО КАПЕЛЬНО УВЛАЖНЯЕМОГО ПОЧВЕННОГО ПРОСТРАНСТВА

Целью исследования определена разработка методики расчета среднего и абсолютных значений зональных уровней влажности почвы в пределах контуров увлажнения, формирующихся в подкапельном почвенном пространстве при капельном поливе. Величина влажности почвы и ее зональное распределение в пределах локальных единичных контуров капельного увлажнения почвогрунтовой толщи в значительной степени влияют на условия водного, питательного и воздушного режимов функционирования корневой системы растений, а в конечном итоге на их развитие и продуктивность. Для управления почвенными условиями роста и функционирования корней растений необходимо прогнозирование влажностных показателей почвы в пределах зон ее промачивания для различных почвенных, фитопочвенных и технологических условий капельного полива. До настоящего времени такое прогнозирование осуществляется только для частных и экспериментально исследованных условий контурообразования, а общепринятая методика проведения соответствующих расчетов для оценки внутриконтурного распределения влажностных показателей увлажняемого почвенного пространства, несмотря на все возрастающую потребность в ней, отсутствует. Основой для разработки методики являются данные авторских экспериментальных (натурных и лабораторных) исследований контуров капельного увлажнения почвы, выполненных для широкого спектра почвенных условий капельного полива. Измерения и фиксация геометрических и влажностных параметров контуров увлажнения почвы осуществлялись в соответствии с общепринятой методикой проведения исследований. В результате исследований получены экспериментальные зависимости для определения и разработана методика прогнозирования параметров контуров капельного увлажнения почвы, которая доведена до уровня программы для ЭВМ и позволяет с приемлемой для практического использования точностью прогнозировать очертание, геометрические и влажностные параметры зон капельного увлажнения подкапельного почвенного пространства.

Ключевые слова: капельное орошение, контур увлажнения, изоплеты влажности, влажность почвы, очертание контура, объем контура, зоны влажности.

A. S. Shtanko, V. N. Shkura

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

DETERMINATION OF AVERAGE MOISTURE OF INSIDE-CONTOUR DRIP HUMIDIFIED SOIL SPACE

The purpose of the study is the development of the calculation method of the average and absolute values of the zone soil moisture levels within the moisture contours formed in the sub-drip soil space during drip irrigation. The soil moisture content and its zone distribution within the local single drip moisture contours of soil-ground depth affect largely the con-

ditions of water, nutrient and air regimes of plant root system operating and ultimately their development and productivity. To control the plant roots growth and operating soil conditions it is necessary to predict the soil humidity indicators within the zones of its wetting for different soil, phytosoil and technological conditions of drip irrigation. Until now, such prediction is carried out only for private and experimentally studied conditions of contour formation, and there is no generally accepted methodology for carrying out appropriate calculations to assess the inside-contour distribution of moisture indicators of a moistened soil space in spite of increasing demands. The basis for the method development is the data of the authors' experimental (full-scale and laboratory) studies of soil drip moisture contours carried out for a wide range of soil conditions of drip irrigation. Measurements and recording of the geometric and moisture parameters of soil moisture contours were carried out in accordance with the generally accepted research procedures. As a result of research, the experimental dependencies for determining and developing a method for predicting the soil drip moisture contours parameters were obtained which has been brought to the level of a computer software and allows to predict the outline, geometric and moisture parameters of drip humidification zones of the subsoil soil space with acceptable accuracy.

Keywords: drip irrigation, moisture contour, humidity isopleths, soil moisture, contour outline, contour volume, humidity zones.

Введение. Одним из определяющих показателей качества капельного полива являются геометрические и влажностные параметры формируемого в подкапельном почвенном пространстве контура увлажнения почвы. Размеры контуров увлажнения и характеристики распределения зон с разным уровнем влажности во внутриконтурном пространстве определяют параметры и эффективность функционирования корневой системы растений, интенсивность развития их надземной части, а также конструктивные решения технических средств капельного орошения [1]. Указанное обстоятельство предопределяет актуальность и востребованность разработки методики определения средней влажности почвы в зоне ее капельного увлажнения и прогнозирования распределения влажности почвы во внутриконтурном капельно увлажняемом почвенном пространстве.

В процессе развития технологии капельного полива растений ее разработчики и исследователи обращали внимание на высокую степень неравномерности увлажненности почвы в пределах контуров влажности. Установлено, что в процессе капельного полива в подкапельном почвенном пространстве формируются области (зоны или «очаги») высокого насыщения почвы водой до уровня влажности, соответствующей полной

влажностности (зоны избыточной влажности), и последующего по мере удаления почвенного пространства от места капания уменьшения влажности до уровня наименьшей влагоемкости почвы $\beta_{\text{НВ}}$ (верхнего предела увлажнения), до значений влажности, равной $(0,9-0,7) \beta_{\text{НВ}}$ (оптимальной увлажненности ризосферы растений), и далее до уровня дополивной влажности почвы, достигающей влажности завядания.

Характерные особенности распределения уровней влажности в пределах капельно увлажняемой почвенной толщи приведены в работах ряда исследователей технологии капельного орошения [2–5 и др.]. Так, в работах А. С. Овчинникова, М. К. Гаджиева и др. [6, 7] отмечено, что характер и показатели распределения различных зон влажности (увлажненности) почвы изменяются как в процессе капельного полива, так и в постполивной период. В публикации А. В. Шуравилина, В. В. Бородычева и др. [8] в пределах контуров капельного увлажнения почвы выделены зоны с разным уровнем благоприятности влажности почвенного корнеобитаемого пространства для функционирования корневой системы растений. Известен ряд экспериментальных исследований внутриконтурного распределения уровней влажности почвы в контурах увлажнения, формируемых в определенных почвенных, фитопочвенных и технологических условиях капельного полива [9, 10 и др.].

Обстоятельный аналитический обзор публикаций в этой области приведен в работе В. Н. Шкуры, Д. Л. Обумахова, А. Н. Рыжакова [11], в которой, в частности, отмечено, что, несмотря на все большее внимание исследователей и пользователей систем капельного орошения к вопросам формирования контуров увлажнения почвы и управления влажностным режимом в пределах капельно увлажняемого почвенного пространства, методика количественной оценки распределения разновлажностных зон в пределах локальных (единичных) контуров до настоящего времени не разработана. На восполнение указанного дефицита научного обоснова-

ния (для дальнейшей оптимизации технологии капельного полива растений) направлено настоящее исследование, основной задачей которого поставлена разработка графоаналитического метода (методики) определения средней влажности почвы в контурах ее капельного увлажнения и прогнозирования распределения разноувлажненных (разновлажностных) зон во внутриконтурном почвенном пространстве.

Материалы и методы. Основой для разработки метода являются данные авторских экспериментальных (натурных и лабораторных) исследований контуров капельного увлажнения почвы, выполненных для широкого спектра почвенных условий проведения капельных поливов (таблица 1).

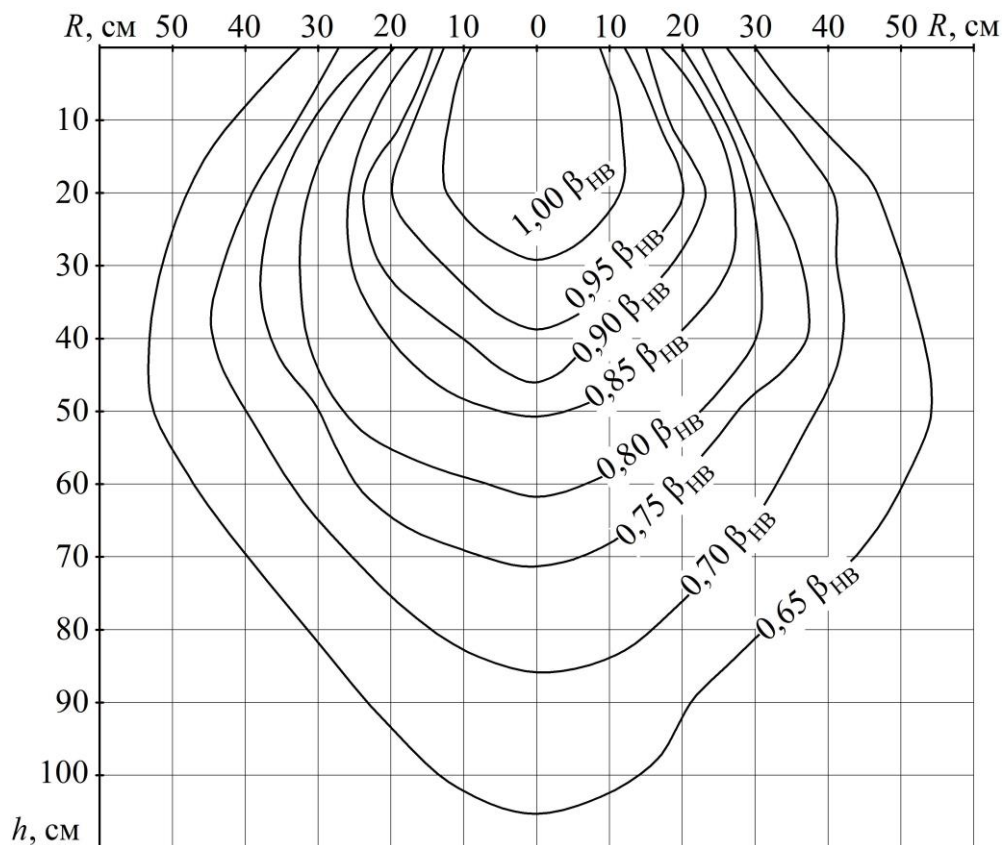
Таблица 1 – Данные о почвенных условиях капельных поливов

Характеристика почвы	Значение характеристики по опытным поливам			
	1	2	3	4
Содержание глинистых частиц в почве $\bar{W}_{г/ч}$, % МСП	29,8	44,8	54,3	71,3
Плотность сложения $\bar{\gamma}_{об}$, т/м ³	1,29	1,26	1,27	1,32
Наименьшая влагоемкость почвы $\bar{W}_{нв}$, % МСП	21,9	25,8	27,1	31,1
% МСП – % от массы сухой почвы.				

Измерения и фиксация геометрических и влажностных параметров контуров увлажнения почвы осуществлялись в соответствии с общепринятой методикой проведения исследований [11, 12 и др.]. В результате обработки опытных данных по измерениям влажности почвы в подкапельном почвенном пространстве строились матрицы влажности, а по ним изоплеты с разными уровнями увлажненности почвы и контуры капельного увлажнения. Пример одного из контуров увлажнения приведен на рисунке 1.

Приведенный на рисунке 1 пример единичного контура увлажнения зафиксирован в почвенных условиях, которые характеризуются нижеследующими осредненными параметрами почвы в пределах увлажняемого при капельном поливе слоя: среднее по глубине увлажняемого почвенного слоя содержание физической глины $\bar{W}_{г/ч} = 54,3$ % МСП, наименьшая вла-

гоемкость почвы $\bar{W}_{\text{нв}} = 27,1\%$ МСП, средняя по увлажняемому слою плотность сложения почвы $\bar{\gamma}_{\text{об}} = 1,27 \text{ т/м}^3$ при среднем значении допозитивной влажности в метровом слое почвенной толщи $\beta_{\text{д/п}} = 17,6\%$ МСП.



Подписи на изоэпетах – влажность почвы в долях от влажности, соответствующей наименьшей влагоемкости $\beta_{\text{нв}}$

Рисунок 1 – Контур капельного увлажнения почвы с внутриконтурным расположением изоэпета (№ 3 по таблице 1)

Геометрические образы вертикальных профилей контуров капельного увлажнения почвы являлись первоосновой для получения экспериментальных зависимостей для определения их геометрических и влажностных параметров и последующей разработки методики их прогнозирования.

Результаты и обсуждение. Предлагаемая методика определения средней влажности почвы в пределах локальных (единичных) контуров увлажнения и распределения зон с различной степенью увлажненности подкапельного почвенного пространства предусматривает последовательное выполнение ряда нижеприведенных расчетно-графических операций.

1 Установление количественных значений показателей, характеризующих условия капельного полива и формирования контуров увлажнения подкапельного почвенного пространства: $\bar{W}_{г/ч}$, % МСП; $\bar{\gamma}_{об}$, т/м³; $\bar{W}_{НВ}$, % МСП; $\beta_{д/п}$ – величина дополивной влажности почвы, в долях от $\beta_{НВ}$ (или $\bar{W}_{НВ}$); $h_{увл}$ – глубина промачивания почвы, которая должна быть равна $(h_{из/п})_{\beta_{д/п}}$ – глубине контура увлажнения, очерченной по изоплете с принятым или наблюдаемым уровнем дополивной влажности почвы, м.

2 Оценка соответствия расчетного значения глубины промачивания почвы $(h_{из/п})_{\beta_{д/п}}$, м, заданной агрономом глубине увлажнения подкапельного почвенного пространства $h_{увл}$ для соответствующих условиям капельного полива почвенных и технологических параметров по зависимости:

$$(h_{из/п})_{\beta_{д/п}} = \left(\frac{N_{пол}}{0,00196 \bar{\gamma}_{об} \cdot (0,0765 \cdot \bar{W}_{г/ч}^{0,6} + 0,0292 \cdot \bar{W}_{НВ})^2 \cdot (\beta_{п/п} - \beta_{д/п})} \right)^{0,333},$$

где $N_{пол}$ – поливная норма, рассчитанная на капельный микрородовыпуск (капельницу), обеспечивающая необходимое увлажнение почвы, м³/кап.;

$\beta_{п/п}$ – величина заданного послеполивного уровня влажности почвы, % МСП, которая чаще всего принимается на уровне $(0,9-1,0) \beta_{НВ}$;

$\beta_{НВ}$ – влажность почвы в капельно увлажняемом почвенном пространстве, соответствующая уровню наименьшей влагоемкости, % МСП.

При несоответствии расчетной глубины промачиваемого почвенного слоя, достигающей заглубленности почвенной толщи с влажностью $\beta_i = \beta_{д/п}$, заданной величине ее увлажнения $h_{увл}$ изменяют принятое значение поливной нормы, добиваясь равенства параметров $(h_{из/п})_{\beta_{д/п}} = h_{увл}$.

3 Определение величины максимальной заглубленности изоплеты с уровнем влажности почвы, соответствующим $0,7\beta_{НВ}$, по зависимости вида:

$$(h_{\text{из/п}})_{0,7\beta_{\text{НВ}}} = \frac{(h_{\text{из/п}})_{\beta_{\text{д/п}}}}{0,5 \cdot \left[1,0 - 1,1^{0,1\bar{W}_{\text{г/ч}}} \cdot \left(\frac{\beta_{\text{д/п}}}{\beta_{0,7\beta_{\text{НВ}}}} - 1,0 \right) + 1,0 - 1,2^{0,1\bar{W}_{\text{НВ}}} \cdot \left(\frac{\beta_{\text{д/п}}}{\beta_{0,7\beta_{\text{НВ}}}} - 1,0 \right) \right]}. \quad (1)$$

4 Расчет значений максимальной заглубленности внутриконтурных изоплет $(h_{\text{из/п}})_{\beta_i}$, м, с уровнем влажности $\beta_i = 0,75; 0,80; 0,85; 0,90; 0,95$ и $1,0 \beta_{\text{НВ}}$ по нижеприведенной экспериментальной зависимости:

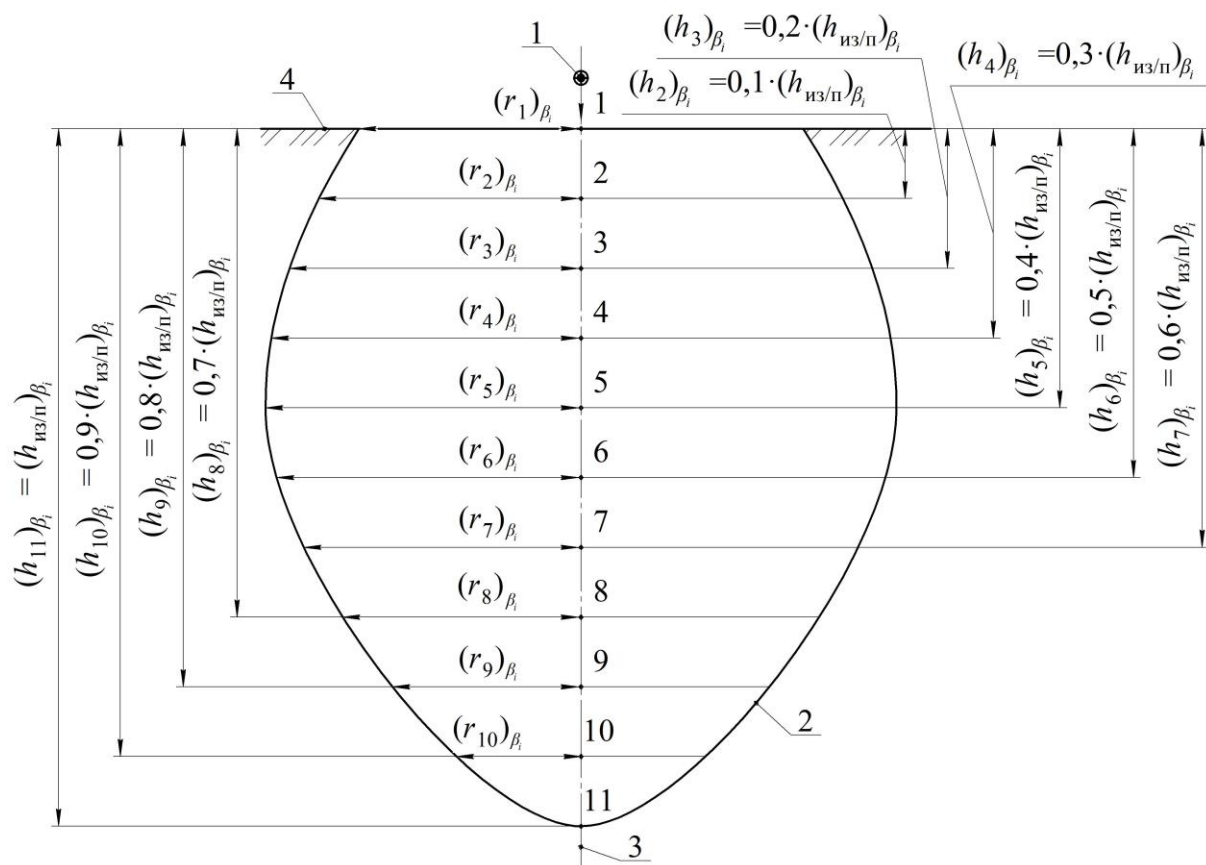
$$(h_{\text{из/п}})_{\beta_i} = 0,5 \cdot (h_{\text{из/п}})_{0,7\beta_{\text{НВ}}} \cdot \left[1,0 - 1,1^{0,1W_{\text{г/ч}}} \cdot \left(\frac{\beta_i}{\beta_{0,7\beta_{\text{НВ}}}} - 1,0 \right) + 1,0 - 1,2^{0,1W_{\text{НВ}}} \cdot \left(\frac{\beta_i}{\beta_{0,7\beta_{\text{НВ}}}} - 1,0 \right) \right]. \quad (2)$$

5 Определение максимального значения радиуса контура увлажнения $r_{\text{кон}} = (r_{\text{из/п}})_{\beta_{\text{д/п}}}$, м, и «изоплетных» контуров $(r_{\text{из/п}})_{\beta_i}$, м, по зависимости:

$$(r_{\text{из/п}})_{\beta_i} = 0,25 \cdot (h_{\text{из/п}})_{\beta_i} \cdot \left[(0,51 + 0,009 \cdot \bar{W}_{\text{г/ч}}) + (0,073 + 0,038 \cdot \bar{W}_{\text{НВ}}) \right]. \quad (3)$$

6 Для расчета вертикальных и горизонтальных координат ограничивающей контур линии (изоплеты с уровнем влажности $\beta_i = \beta_{\text{д/п}}$) величину глубины контура $h_{\text{кон}} = (h_{\text{из/п}})_{\beta_{\text{д/п}}}$ разбивают на 10 равных частей и получают 11 сечений контура со значениями их заглубленности $(h_1)_{\beta_{\text{д/п}}} = 0,0$ м; $(h_2)_{\beta_{\text{д/п}}} = 0,1 \cdot (h_{\text{из/п}})_{\beta_{\text{д/п}}}$; $(h_3)_{\beta_{\text{д/п}}} = 0,2 \cdot (h_{\text{из/п}})_{\beta_{\text{д/п}}}$; ...; $(h_{11})_{\beta_{\text{д/п}}} = (h_{\text{из/п}})_{\beta_{\text{д/п}}}$, м (рисунок 2). При этом относительные значения вертикальных координат ограничивающих контур линий $(h_j)_{\beta_{\text{д/п}}} / (h_{\text{из/п}})_{\beta_{\text{д/п}}} = 0,0; 0,1; 0,2; \dots; 1,0$ (где j – номер сечения). По аналогии с контуром увлажнения производится разбивка глубины (заглубленности под поверхность земли) разновлажностных «изоплетных» контуров, выделяемых в пределах капельно увлажняемого почвенного пространства (см. рисунок 1), и получают соответствующие им значения соотношений $(h_j)_{\beta_{\text{из/п}}} / (h_{\text{из/п}})_{\beta_{\text{из/п}}}$ или $(h_j)_{\beta_i} / (h_{\text{из/п}})_{\beta_i}$ (где i – влажность изоплеты, в долях от $\beta_{\text{НВ}}$), являющиеся относительными верти-

кальными координатами границ контуров и внутриконтурных линий влажности.



1 – капельница; 2 – ооконтуривающая линия; 3 – ось капания; 4 – поверхность земли;
 $(h_1)_{\beta_i} - (h_{11})_{\beta_i}$ – расстояния от поверхности земли до характерных сечений,
 разделяющих контур с влажностью ограничивающей изоплеты β_i по вертикали
 на 10 равных расчетных слоев; $(r_1)_{\beta_i} - (r_{10})_{\beta_i}$ – радиусы контура, соответствующие
 характерным сечениям «изоплетного» контура; 1 – 11 – точки на оси капания,
 соответствующие характерным сечениям контура увлажнения почвы

Рисунок 2 – Расчетная схема для определения вертикальных и горизонтальных координат ограничивающей контур капельного увлажнения почвы линии

7 Для всех значений относительных вертикальных координат определяются соответствующие им (см. рисунок 2) относительные горизонтальные координаты ограничивающей контур линии и внутриконтурных линий влажности с использованием полиномиальной зависимости [13]:

$$\frac{(r_j)_{\beta_i}}{(r_{из/п})_{\beta_i}} = k_0 + k_1 \cdot \left[\frac{(h_j)_{\beta_i}}{(h_{из/п})_{\beta_i}} \right] - k_2 \cdot \left[\frac{(h_j)_{\beta_i}}{(h_{из/п})_{\beta_i}} \right]^2 +$$

$$+ k_3 \cdot \left[\frac{(h_j)_{\beta_i}}{(h_{\text{из/п}})_{\beta_i}} \right]^3 - k_4 \cdot \left[\frac{(h_j)_{\beta_i}}{(h_{\text{из/п}})_{\beta_i}} \right]^{30}, \quad (4)$$

где $(r_j)_{\beta_i}$ – радиус ограничивающей изоплетный контур линии (изоплеты), соответствующий горизонтальному сечению j «изоплетного» контура i , м;

$(r_{\text{из/п}})_{\beta_i}$ – максимальный радиус «изоплетного» контура с определенной влажностью граничной линии β_i , определяемый по соотношению (3);

k_0 – экспериментально установленный свободный член полинома:

$$k_0 = 0,5 \cdot \left((1 - 0,005 \cdot \bar{W}_{\text{г/ч}} \cdot \bar{\gamma}_{\text{об}}) + (1 - 0,001 \cdot \bar{W}_{\text{НВ}}^{1,84} - 0,002 \cdot \bar{W}_{\text{НВ}}^{0,45}) \right); \quad (5)$$

k_1 – коэффициент при переменном члене полинома $\left[\frac{(h_j)_{\beta_i}}{(h_{\text{из/п}})_{\beta_i}} \right]$:

$$k_1 = 1,03 / k_0^{1,2}; \quad (6)$$

k_2 – коэффициент при переменном члене полинома $\left[\frac{(h_j)_{\beta_i}}{(h_{\text{из/п}})_{\beta_i}} \right]^2$:

$$k_2 = k_0 + k_1; \quad (7)$$

k_3, k_4 – постоянные коэффициенты при переменных членах полинома

со значениями соотношений $\left[\frac{(h_j)_{\beta_i}}{(h_{\text{из/п}})_{\beta_i}} \right]^3$ и $\left[\frac{(h_j)_{\beta_i}}{(h_{\text{из/п}})_{\beta_i}} \right]^{30}$ соответственно:

$$k_3 = k_4 = 0,255 \cdot k_0^{0,01}. \quad (8)$$

8 Определяются абсолютные значения вертикальных $(h_j)_{\beta_i}$ и горизонтальных $(r_j)_{\beta_i}$ координат граничных линий для каждого сечения контура увлажнения и «изоплетных» контуров из их соотношений $(h_j)_{\beta_i} / (h_{\text{из/п}})_{\beta_i}$ и $(r_j)_{\beta_i} / (r_{\text{из/п}})_{\beta_i}$ для соответствующих значений $(h_{\text{из/п}})_{\beta_i}$ и $(r_{\text{из/п}})_{\beta_i}$, и по их значениям строятся очертания контуров и внутриконтурных линий разного уровня влажности почвы во внутриконтурном пространстве [14].

9 Рассчитываются объемы почвенного пространства $(W_{\text{кон}})_i$, м³, очер-

чиваемого граничной и внутриконтурными изоплетами, по зависимости:

$$(W_{\text{кон}})_i = \pi \cdot r_{\text{кон}}^2 \cdot h_{\text{кон}} \cdot (k_0^2 + k_0 \cdot k_1 + \frac{k_1^2}{3} - \frac{2 \cdot k_0 \cdot k_2}{3} - \frac{k_1 \cdot k_2}{2} + \frac{k_2^2}{5} + \frac{k_0 \cdot k_3}{2} + \frac{2 \cdot k_1 \cdot k_3}{5} - \frac{k_2 \cdot k_3}{3} + \frac{k_3^2}{7} - \frac{2 \cdot k_0 \cdot k_4}{31} - \frac{k_1 \cdot k_4}{16} + \frac{2 \cdot k_2 \cdot k_4}{33} - \frac{k_3 \cdot k_4}{17} + \frac{k_4^2}{61}). \quad (9)$$

10 Определяется объем почвенного пространства между двумя соседствующими изоплетами с разным уровнем влажности по зависимости:

$$(\Delta W_{\text{кон}})_{1 \div 2} = (W_{\text{кон}})_1 - (W_{\text{кон}})_2; \dots; (\Delta W_{\text{кон}})_{(z-1) \div z} = (W_{\text{кон}})_{z-1} - (W_{\text{кон}})_z, \quad (10)$$

где 1, 2, ..., z – порядковые номера изоплет контура капельного увлажнения, которые последовательно присваиваются им, начиная с ограничивающей контур капельного увлажнения изоплеть (№ 1) и заканчивая наиболее близкой к точке внесения поливной воды изоплетой с номером z;

$(\Delta W_{\text{кон}})_{1 \div 2} - (\Delta W_{\text{кон}})_{(z-1) \div z}$ – объемы внутриконтурного пространства, заключенного между двумя соседними («соседствующими») изоплетами, м³;

$(W_{\text{кон}})_1 - (W_{\text{кон}})_z$ – объемы «изоплетных» контуров увлажнения почвы, ограниченных линиями влажности с порядковыми номерами 1 – z, м³.

11 Для каждого межизоплетного пространства (почвенного пространства контра увлажнения, заключенного между соседними изоплетьми) устанавливается величина средней влажности почвы:

$$(\bar{\beta})_{1 \div 2} = 0,5 \cdot (\beta_1 + \beta_2); \dots; (\bar{\beta})_{(z-1) \div z} = 0,5 \cdot (\beta_{(z-1)} + \beta_z),$$

где $(\bar{\beta})_{1 \div 2} - (\bar{\beta})_{(z-1) \div z}$ – средняя влажность межизоплетного почвенного пространства с соответствующими объемами $(\Delta W_{\text{кон}})_{1 \div 2} - (\Delta W_{\text{кон}})_{(z-1) \div z}$, % МСП;

$\beta_1 - \beta_z$ – влажность изоплет с порядковыми номерами 1 – z, % МСП.

12 Осредненная влажность в пределах капельно увлажняемого почвенного пространства $(\bar{\beta}_{\text{кон}})_i$, % МСП, определяется из соотношения:

$$(\bar{\beta}_{\text{кон}})_i = \frac{(\Delta W_{\text{кон}})_{1 \div 2} \cdot (\bar{\beta})_{1 \div 2} + \dots + (\Delta W_{\text{кон}})_{(z-1) \div z} \cdot (\bar{\beta})_{(z-1) \div z} + (W_{\text{кон}})_z \cdot (\bar{\beta})_z}{(W_{\text{кон}})_i}, \quad (11)$$

где $(W_{\text{кон}})_z$ – объем «изоплетного» контура, ограниченного линией с определенным уровнем влажности с порядковым номером z , м³;

$(\beta)_z$ – влажность изоплеты с порядковым номером z , % МСП.

Предлагаемая методика проведения расчетов, доведенная до уровня программы для ЭВМ, позволяет определить основные параметры контуров капельного увлажнения, включая осредненные по «изоплетным» контурам значения влажности в пределах каждого «изоплетного» контура и в зоне увлажнения всего подкапельного почвенного пространства. Результаты расчета, проведенного по контуру № 3 с почвенными характеристиками: $\bar{W}_{\text{г/ч}} = 54,3$ % МСП, $\bar{W}_{\text{НВ}} = 27,1$ % МСП, $\bar{\gamma}_{\text{об}} = 1,27$ т/м³; доливной и постполивной влажностью почвы $\beta_{\text{д/п}} = 17,6$ % МСП и $\beta_{\text{п/п}} = 25,7$ % МСП; глубиной промачивания слоя почвы $(h_{\text{из/п}})_{\beta_{\text{д/п}}} = 1,05$ м, приведены ниже.

1 Требование по обеспечению заданной глубины увлажнения почвы $(h_{\text{из/п}})_{\beta_{\text{д/п}}} = 1,05$ м соблюдается при поливной норме $N_{\text{пол}} = 0,0624$ м³/кап.

2 Заглубленность (глубина) изоплеты с уровнем влажности $\beta_i = 0,7 \cdot \beta_{\text{НВ}}$, определенная по зависимости (1), составляет 0,939 м.

3 Результаты определения заглубленности и максимальных радиусов оконтуривающих линий разновлажностных «изоплетных» контуров увлажнения, рассчитанных по зависимостям (2) и (3), приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные значения глубин и радиусов разновлажностных «изоплетных» контуров

Параметр «изоплетного» контура	Значение параметра «изоплетного» контура при различных уровнях влажности изоплет, в долях от $\beta_{\text{НВ}}$							
	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
Заглубленность изо-плеты под поверхность земли $(h_{\text{из/п}})_{\beta_i}$	1,05	0,939	0,828	0,716	0,605	0,494	0,383	0,272
Максимальный радиус «изоплетных» контуров $(r_{\text{из/п}})_{\beta_i}$	0,552	0,493	0,435	0,376	0,318	0,260	0,201	0,143

В м

4 Очертание контура (для $\beta_{изпл} = 0,65 \cdot \beta_{нв}$) и расположение внутриконтурных изоплет с различным уровнем влажности получены по зависимости (4) при значениях $k_0 = 0,607$; $k_1 = 1,877$; $k_2 = 2,483$; $k_3 = k_4 = 0,254$, определенных по экспериментальным зависимостям (5)–(8). Результаты расчета и последующего построения прогнозируемого очертания контура увлажнения и внутриконтурных изоплет (по условиям капельного полива, соответствующим контуру № 3) проиллюстрированы рисунком 3.

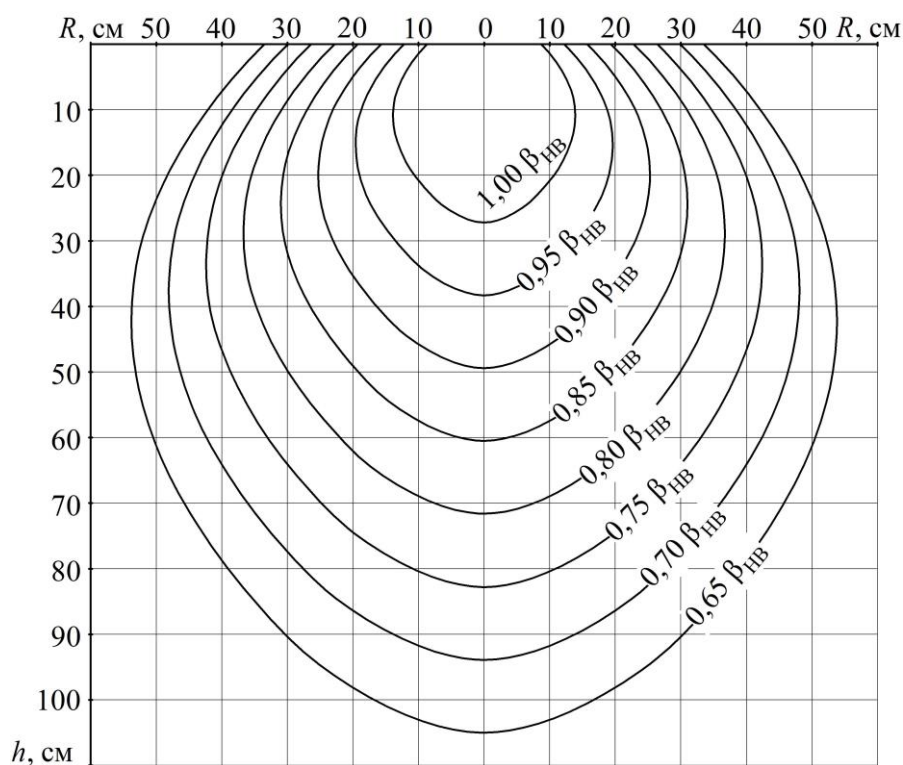


Рисунок 3 – Прогнозируемый контур капельного увлажнения почвы

Сопоставление опытного (по рисунку 1) и расчетного (прогнозного) (по рисунку 3) контуров увлажнения (их взаимным наложением) позволяет отметить качественное подобие их форм и подобие очертаний внутриконтурных линий с разным уровнем влажности почвы. О соответствии размеров опытных и прогнозируемых изоплетных контуров можно судить по результатам их взаимного совмещения, проиллюстрированного рисунком 4.

Качественное подобие опытного и расчетного контуров капельного увлажнения почвы и высокий уровень соответствия их линейных парамет-

ров (диаметров и глубин) позволяют сделать предположение о приемлемости прогнозного контура для определения влажностных показателей в пределах всего промачиваемого почвенного пространства.

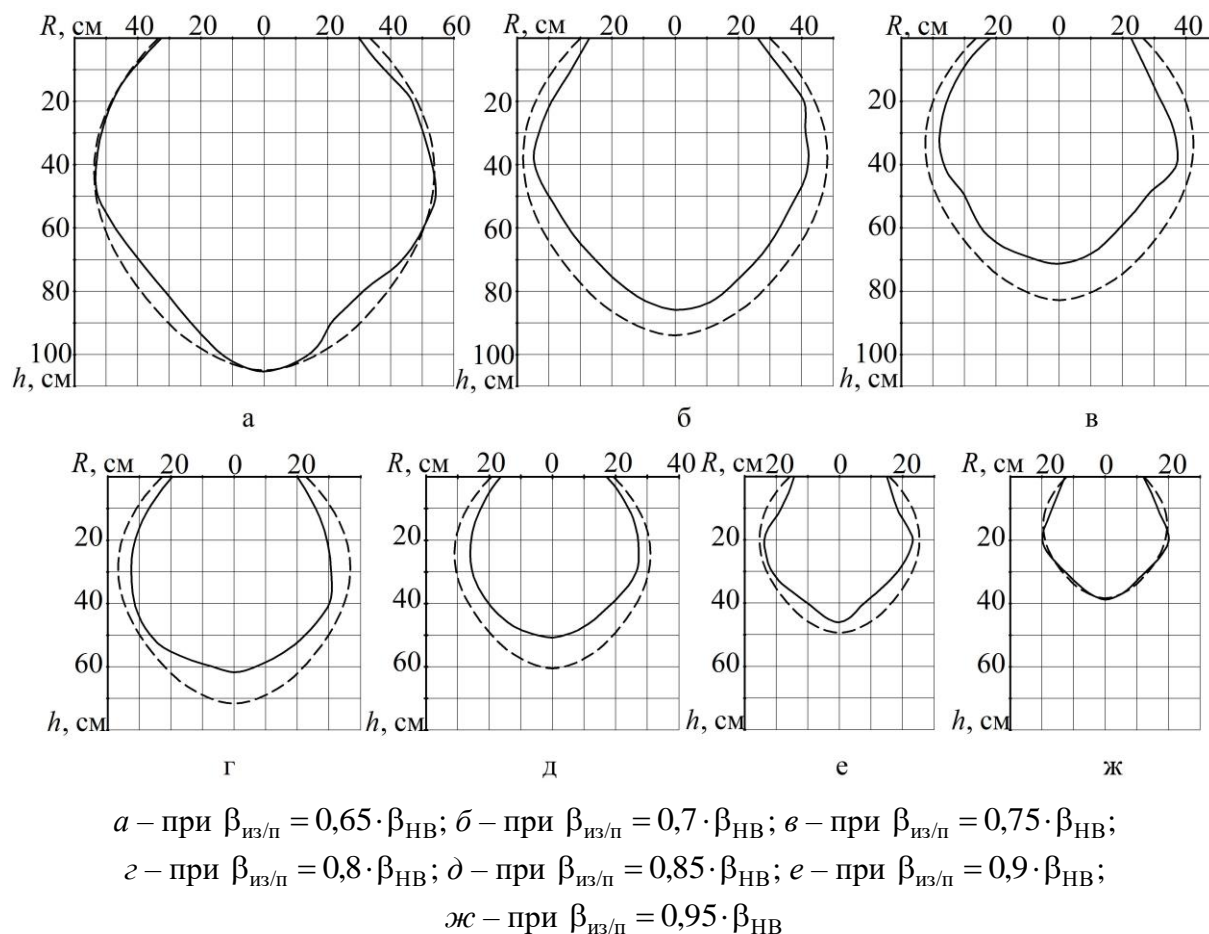


Рисунок 4 – Фактически измеренные и расчетные очертания разновлажностных «изоплетных» контуров капельного увлажнения почвы

5 Принимая за основу прогнозный контур увлажнения почвы, определяют значения объемов изоплетных контуров (по зависимости (9)) и объемов межизоплетного почвенного пространства (по зависимости (10)) (таблица 3).

6 С учетом данных таблицы 3 по зависимости (11) определяются осредненные значения влажности почвы в пределах заданных «изоплетных» контуров для различных уровней доливной влажности (таблица 4).

Приведенные в таблице 4 данные позволяют оценить уровень влажности почвы во внутриконтурных («внутриизоплетных») увлажняемых зо-

нах по ее осредненному значению в развитых контурах, сформированных в подкапельном почвенном пространстве при капельном поливе.

Таблица 3 – Результаты расчета объемов «изоплетных» контуров и межизоплетного увлажняемого почвенного пространства

В м³

Параметр «изоплетного» контура	Значение параметра «изоплетного» контура при различных уровнях влажности изоплет, в долях от $\beta_{НВ}$							
	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
Объем «изоплетных» контуров ($W_{кон}^i$)	0,644	0,460	0,315	0,204	0,123	0,067	0,031	0,011
Объем межизоплетного пространства $\Delta W_{кон}$	0,184	0,145	0,111	0,081	0,056	0,036	0,020	

Таблица 4 – Осредненные значения влажности почвы в пределах разновлажностных «изоплетных» контуров увлажнения почвы

Параметр «изоплетного» контура	Значение параметра при различных уровнях влажности оконтуривающей изоплеты, в долях от $\beta_{НВ}$			
	0,65	0,70	0,75	0,80
Осредненная влажность почвы ($\overline{\beta}_{кон}^i$), в долях от $\beta_{НВ}$	0,77	0,81	0,84	0,88
Осредненная влажность почвы ($\overline{\beta}_{кон}^i$), % МСП	20,83	21,85	22,86	23,86

Выводы. Предложена методика расчета средневзвешенной влажности почвы внутриконтурного капельно поливаемого почвенного пространства с различными уровнями влажности ограничивающих контуры изоплет. Методика доведена до уровня программы для ЭВМ и позволяет с приемлемой для практического использования точностью ($\pm 12\%$) прогнозировать очертание, геометрические и влажностные параметры зон капельного увлажнения подкапельного почвенного пространства.

Список использованных источников

- 1 Васильев, С. М. Технические средства капельного орошения: учеб. пособие / С. М. Васильев, Т. В. Коржова, В. Н. Шкура. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. – 197 с.
- 2 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.
- 3 Ахмедов, А. Д. Расчет основных параметров влагопереноса при капельном орошении / А. Д. Ахмедов, А. Н. Темерев, Е. Ю. Галиуллина // Социально-

экологические проблемы сельского и водного хозяйства. Ч. 1. Комплексное обустройство ландшафта: материалы междунар. науч.-практ. конф. – М.: МГУП, 2010. – С. 11–22.

4 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.

5 Системы капельного орошения: учеб. пособие / М. Л. Ромащенко [и др.]; под ред. М. Л. Ромащенко. – Днепропетровск: Оксамит-текст, 2007. – 175 с.

6 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.

7 Гаджиев, М. К. Особенности капельного орошения виноградников в условиях Дагестанской АССР: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.02 / Гаджиев Магомед Кебедович. – Новочеркасск, 1985. – 24 с.

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

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

10 Карпенко, О. Н. Капельное орошение роз в теплицах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / Карпенко Ольга Николаевна. – Новочеркасск, 1989. – 22 с.

11 Шкура, В. Н. Капельное орошение яблони: монография / В. Н. Шкура, Д. Л. Обумахов, А. Н. Рыжаков; под ред. В. Н. Шкуры. – Новочеркасск: Лик, 2014. – 310 с.

12 Ясониди, О. Е. Капельное орошение / О. Е. Ясониди. – Новочеркасск: Лик, 2011. – 322 с.

13 Рыжаков, А. Н. О форме локального контура капельного орошения / А. Н. Рыжаков, В. Н. Шкура, А. С. Штанько // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2017. – № 2(66). – С. 94–100.

14 Штанько, А. С. Способ графоаналитического построения очертания контуров капельного увлажнения почв / А. С. Штанько, В. Н. Шкура // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2018. – № 1(29). – С. 67–85. – Режим доступа: <http://rosniipm-sm.ru/archive?n=526&id=531>.

References

1 Vasiliev S.M., Korzhova T.V., Shkura V.N., 2016. *Tekhnicheskie sredstva kapel'nogo orosheniya: ucheb. posobie* [Technical Means of Drip Irrigation: Textbook]. Novocherkassk, RosNIIPM Publ., 197 p. (In Russian).

2 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 sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na Severnom Kavkaze: sb. nauch. tr. YuzhNIIGiM* [Irrigation Regimes and Crops Water Consumption in the North Caucasus: Proceed. YuzhNIIGiM]. Novocherkassk, pp. 129-133. (In Russian).

3 Akhmedov A.D., Temerev A.N., Galiullina E.Yu., 2010. *Raschet osnovnykh parametrov vlagoperenosa pri kapel'nom oroshenii* [Calculation of the basic parameters of moisture transfer under drip irrigation]. *Sotsial'no-ekologicheskie problemy sel'skogo i vodnogo khozyaystva. Ch. 1. Kompleksnoe obustroystvo landshafta: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Social-ecological problems of agriculture and water management. Part 1. Integrated landscape arrangement: materials of the International Scientific-Practical Conference]. Moscow, MGUP Publ., pp. 11-22. (In Russian).

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

5 Romashchenko M.L. [et al.], 2007. *Sistemy kapel'nogo orosheniya: ucheb. posobie* [Drip Irrigation Systems: Textbook]. Dnepropetrovsk, Oksamit-text Publ., 175 p. (In Russian).

6 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 soil moisture parameters under the conditions of open and closed ground]. *Prirodoobustroystvo* [Nature Engineering], no. 4, pp. 10-14. (In Russian).

7 Gadzhiev M.K., 1985. *Osobennosti kapel'nogo orosheniya vinogradnikov v usloviyakh Dagestanskoj ASSR. Avtoreferat diss. s-kh. nauk* [Features of drip irrigation of vineyards in the Dagestan Autonomous Soviet Socialist Republic. Abstract of cand. agri. sci. diss.]. Novocherkassk, 24 p. (In Russian).

8 Shuravilin A.V., Borodychev V.V., Lytov M.N., Belin O.A., 2009. *Kapel'noe oroshenie soi na tyazhelosuglinistykh pochvakh* [Drip irrigation of soybean on heavy loamy soils]. *Vestnik RUDN, ser. Agronomiya i zhivotnovodstvo* [Bull. RUDN, part of Agronomy and Animal Industries], no. 3, pp. 21-26. (In Russian).

9 Torbovskiy V.I., 1992. *Rezhim i tekhnika kapel'nogo orosheniya maliny. Avtoreferat diss. kand. techn. nauk* [Regime and Technique of Raspberry Drip Irrigation. Abstract of cand. tech. sci. diss.]. Novocherkassk, 24 p. (In Russian).

10 Karpenko O.N., 1989. *Kapel'noye orosheniye roz v teplitsakh. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Drip irrigation of roses in greenhouses. Abstract of cand. tech. sci. diss.]. Novocherkassk, 22 p. (In Russian).

11 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).

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

13 Ryzhakov A.N., Shkura V.N., Shtan'ko 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).

14 Shtan'ko A.S., 2018. *Sposob grafoanaliticheskogo postroeniya ochertaniya konturov kapel'nogo uvlazhneniya pochv* [The way of graphoanalytical design of noisture contour at drip irrigation], no. 1(29), pp. 67-85, available: <http://rosniipm-sm.ru/archive?n=526&id=531>. (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