

УДК 631.674.6

В. Н. Шкура, А. С. Штанько

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

ОБ УЧЕТЕ ПОЧВЕННЫХ ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ КОНТУРОВ КАПЕЛЬНОГО УВЛАЖНЕНИЯ ПОЧВЫ

Целью исследования является разработка физико-математических моделей расчета геометрических параметров локальных контуров капельного увлажнения, которые учитывают основные водно-физические почвенные характеристики. В ходе исследования установлено, что при разработке физико-математических моделей расчета как геометрических, так и влажностных параметров контуров увлажнения необходимо учитывать несколько (две, три и более) независимых почвенных характеристик. Проведенный анализ опытных данных позволил выявить следующие основные почвенные характеристики, оказывающие наибольшее влияние на процессы формирования контуров капельного орошения: содержание в почве физической глины (частиц размером менее 0,01 мм), наименьшая влагоемкость почвы, скорость впитывания воды почвой за первый час. В числе предположений о геометрических размерах контуров увлажнения, количественно учитывающих почвенные характеристики, известны зависимости В. Н. Шкуры и Д. Л. Обумахова. В указанных зависимостях почвенные условия учитываются величиной содержания в почве физической глины. В процессе исследований была проведена дополнительная обработка полученного В. Н. Шкурой и Д. Л. Обумаховым экспериментального материала, в результате которой предложены модели определения геометрических параметров локальных контуров увлажнения, учитывающие наименьшую влагоемкость почвы и скорость впитывания воды почвой за первый час. Глубину и диаметр локальных контуров капельного орошения предлагается определять с помощью моделей, учитывающих каждый из рассмотренных почвенных параметров, а окончательное значение принимать как среднее по трем рассматриваемым параметрам. Проверка приемлемости предложенных моделей и зависимостей осуществлена сопоставлением результатов расчета по ним с опытными данными. В результате исследований установлено, что предложенные модели позволяют определить линейные размеры локальных контуров капельного увлажнения с приемлемой для практики точностью (при погрешности, не превышающей $\pm 12\%$) в рассмотренных пределах изменения факторов влияния.

Ключевые слова: капельное орошение, локальный контур увлажнения, геометрические параметры локального контура, содержание в почве физической глины, наименьшая влагоемкость почвы, скорость впитывания воды почвой.

V. N. Shkura, A. S. Shtanko

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

CONSIDERATION OF SOIL HYDROPHYSICAL CHARACTERISTICS IN DETERMINING THE CONTOUR PARAMETERS OF DRIP IRRIGATION

The aim of research is the development of physico-mathematical models for calculating geometrical parameters of local contours of drip irrigation that consider the main hydro-

physical soil characteristics. During research it was found that several (two, three or more) independent soil characteristics must be considered when developing physico-mathematical models for calculating both the geometrical and moisture parameters of moisture contours. The analysis of experimental data made it possible to identify the following basic soil characteristics that have the greatest impact on the formation of drip irrigation contours: the physical clay (particles smaller than 0.01 mm) in soil, the lowest soil moisture capacity, and the rate of soil water absorption for the first hour. The dependencies by V. N. Shkura and D. L. Obumakhov are known among the assumptions on geometric dimensions of moisture contours, considering soil characteristics quantitatively. In these dependencies soil conditions are considered by the amount of physical clay in soil. In the course of investigation a further processing of the experimental material obtained by V. N. Shkura and D. L. Obumakhov was carried out, as a result of which models for determining the geometric parameters of local moisture contours, taking into account the lowest moisture capacity of soil and absorption rate of soil for the first hour. The depth and diameter of local drip irrigation contours are proposed to be determined using the models that take into account each of the soil parameters examined, and the final value is taken as the average of the three parameters considered. Verification of the acceptability of the proposed models and dependencies is carried out by comparing the results of calculations on them with experimental data. As a result of research it was found that the proposed models allow to determine the linear dimensions of local contours of drip irrigation with an accuracy acceptable for practice (with an error not exceeding $\pm 12\%$) within the considered limits of the change in impact factors.

Key words: drip irrigation, local moisture contour, geometrical parameters of local contour, physical clay content in soil, the least moisture capacity of soil, water absorption rate by soil.

Введение. Капельные системы орошения относятся к высокотехнологичным способам орошения четвертого поколения и требуют точного исполнения технологических операций [1]. Необходимость учета почвенных характеристик при определении параметров локальных контуров капельного увлажнения отмечена в публикациях Б. Б. Шумакова [2], И. П. Айдарова [3], А. Д. Ахмедова [4], В. В. Бородычёва [5], В. С. Бочарникова [6], М. Ю. Храброва [7], М. К. Гаджиева [8, 9], А. И. Голованова [10], А. С. Овчинникова [11], О. Е. Ясониди [12] и других специалистов в области капельного орошения. И при этом в большей части известных работ почвенные показатели условий проведения капельных поливов только фиксировались, а их влияние в обобщениях и зависимостях не оценивалось. Сложившееся положение объясняется широким разнообразием почвенных условий формирования локальных контуров капельного увлажнения почвогрунтового пространства, широким спектром сочетания значений почвенных характеристик в пределах увлажняемого при капельном поливе

почвенного профиля и ограниченностью объемов, условий и участков экспериментальных исследований, проведенных отдельными учеными.

Одними из основных факторов влияния, определяющих геометрические параметры локальных контуров капельного увлажнения, являются почвенные условия проведения капельного полива, характеризующиеся водно-физическими константами увлажняемого почвенного пространства. В качестве таких характеристик почв рассматриваются:

- показатели гранулометрического состава почвы, и в частности содержание в ней физической глины (частиц размером менее 0,01 мм) $W_{г/ч}$, определяемое в процентах от массы абсолютно сухой почвы (% МСП);

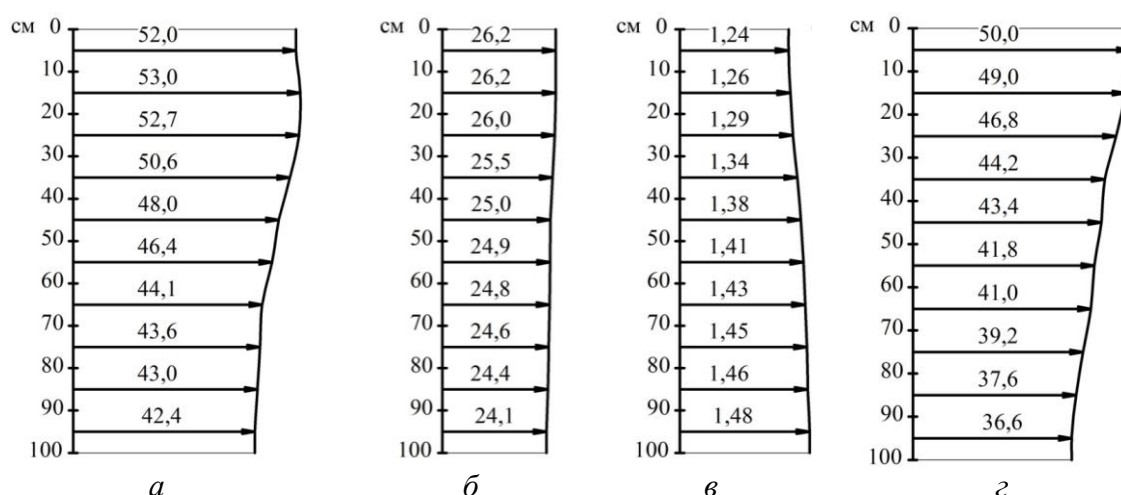
- плотность сложения почвы (объемная масса почвенного образца в ненарушенном состоянии) $\gamma_{об}$, г/см³;

- наименьшая влагоемкость почвы $W_{НВ}$, % МСП;

- скорость впитывания воды почвой за определенный период времени (чаще всего за первый час: $t_{в/п} = 1$ ч) $V_{вп/1ч}$, мм/мин, и др.

В реальной практике рядом специалистов в области капельного орошения сельскохозяйственных культур исследовались локальные контуры капельного увлажнения в почвенных условиях с разными гранулометрическими показателями и типами почв в пределах метрового увлажняемого слоя при относительно равномерном распределении значений водно-физических констант по глубине почвенного слоя. Пример данных по такому почвенному профилю (с отклонением значений почвенных констант от средней величины ± 12 %) приведен на рисунке 1.

Также отметим, что в реальных условиях проведение капельного полива может планироваться на слоистых почвах с разными (пестрыми по водно-физическим параметрам) морфологическими горизонтами и разным гранулометрическим составом в пределах увлажняемого почвенного профиля (таблица 1).



a – содержание физической глины $W_{гч}$, % МСП; *б* – наименьшая влагоемкость W_{HB} , % МСП; *в* – плотность сложения $\gamma_{об}$, г/см³; *г* – порозность S_k , % от объема

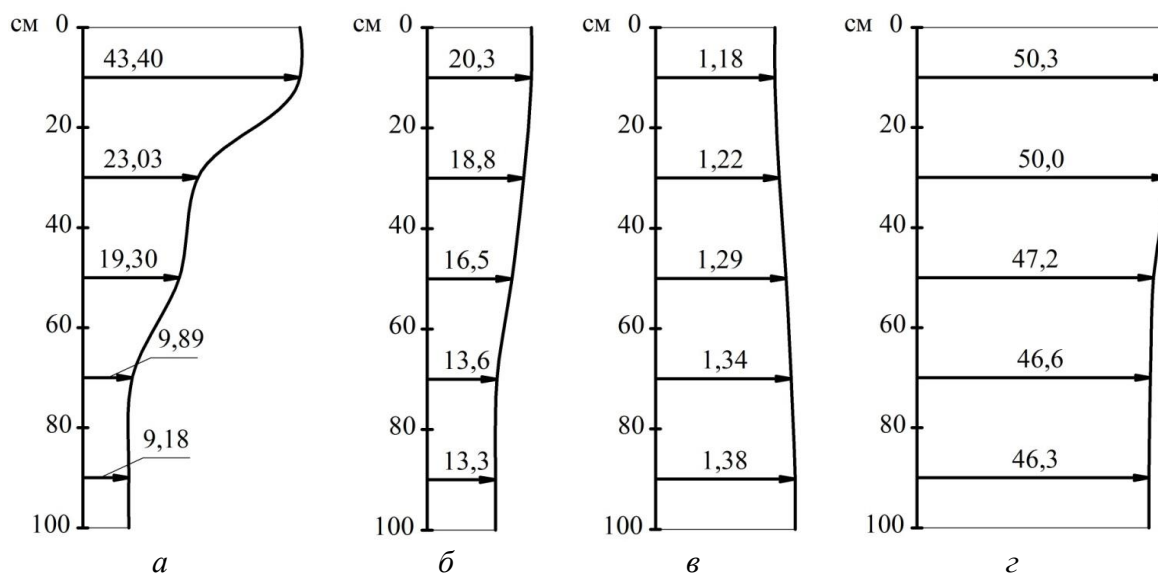
Рисунок 1 – Данные об изменении водно-физических показателей почвы по глубине почвенного профиля

Таблица 1 – Водно-физические характеристики многослойного поливидового (политипового) почвенного профиля

Толщина почвенных слоев, см	Содержание физической глины, % МСП	Наименьшая влагоемкость, % МСП	Скважность (пористость), % от объема	Плотность сложения, г/см ³	Тип почвы по гранулометрическому составу
0–20	43,40	20,3	50,3	1,18	Среднесуглинистая
20–40	23,03	18,8	50,0	1,22	Легкосуглинистая
40–60	19,30	16,5	47,2	1,29	Супесчаная тяжелая
60–80	9,89	13,6	46,6	1,34	Супесчаная легкая
80–100	9,18	13,3	46,3	1,38	Песчаная

Пестрота значений показателей водно-физических почвенных констант (в частности, по содержанию физической глины) не позволяет получить приемлемо точных данных о формируемых в почвогрунтовой среде локальных контурах увлажнения при использовании не только средних, но и осредненных (средневзвешенных) по профилю показателей. Приведенные в таблице 1 данные проиллюстрированы рисунком 2.

Судя по приведенному примеру морфометрических показателей почвенного профиля, наибольшие отклонения от средних значений имеют данные о гранулометрии и показателе наименьшей влагоемкости, тогда как данные о плотности сложения и пористости почвы характеризуются относительной стабильностью по увлажняемому слою почвы.



a – содержание физической глины $W_{г/ч}$, % МСП;

б – наименьшая влагоемкость $W_{НВ}$, % МСП;

в – плотность сложения $\gamma_{об}$, г/см³; *г* – порозность S_k , % от объема

Рисунок 2 – Графическое представление водно-физических характеристик почвы

Отмечая широкое разнообразие почвенных условий, в которых протекает процесс формирования контуров капельного увлажнения, отметим как их сугубую индивидуальность, так и возможности для типизации и осреднения водно-физических показателей даже при наличии определенных почвенных разностей. И именно это обстоятельство диктует целесообразность использования при разработке физико-математических моделей расчета как геометрических, так и влажностных параметров контуров увлажнения нескольких (двух, трех и более) независимых почвенных характеристик. В связи с этим цель настоящего исследования – разработка физико-математических моделей расчета геометрических параметров локальных контуров капельного увлажнения, которые учитывают основные почвенные характеристики.

Материалы и методы. Как уже было отмечено, в процессе формирования контура увлажнения в пределах метрового почвенного профиля им пересекаются различные по водно-физическим свойствам и показателям

слои почвы. Указанное обстоятельство имеет место даже в случаях относительного постоянства фракционного состава почвы по содержанию в ней физической глины $W_{г/ч}$ (с отклонением значений в пределах 3–12 %) по глубине увлажняемого слоя. Так, в исследованиях авторов для относительно стабильных по почвенным горизонтам значений $W_{г/ч}$ при искусственном уплотнении был зафиксирован значительный разброс значений наименьшей влагоемкости $W_{НВ}$. К примеру: для глинистой почвы при $W_{г/ч} = (71,7 \pm 3,8) \% \text{ МСП}$ значения $W_{НВ}$ в зависимости от плотности сложения $\gamma_{об}$ изменялись от 33,7 до 27,8 % МСП (т. е. на 19 % по отношению к среднему значению); для тяжелосуглинистой почвы с $W_{г/ч} = (57,6 \pm 2,0) \% \text{ МСП}$ значения $W_{НВ}$ составили 29,9–23,7 % МСП, что весьма значимо даже в отношении среднего уровня $W_{НВ}$. При этом зафиксировано проиллюстрированное рисунками 3 и 4 непосредственное влияние плотности сложения почвы $\gamma_{об}$ на величину $W_{НВ}$.

Судя по приведенным на рисунках 3 и 4 данным, между почвенными параметрами $W_{НВ}$ и $\gamma_{об}$ имеет место достаточно тесная корреляционная связь, при которой с увеличением значений плотности сложения почвы ее наименьшая влагоемкость линейно уменьшается.

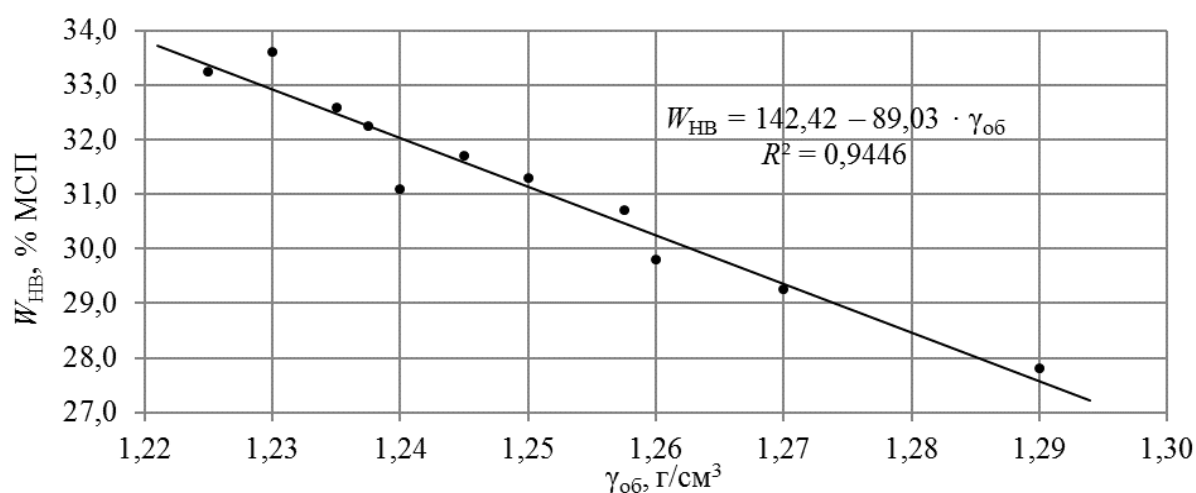


Рисунок 3 – Графическая интерпретация функциональной связи $W_{НВ} = f(\gamma_{об})$ (при $W_{г/ч} = (71,7 \pm 3,9) \% \text{ МСП}$ в слое 0–100 см) при искусственном уплотнении почвы

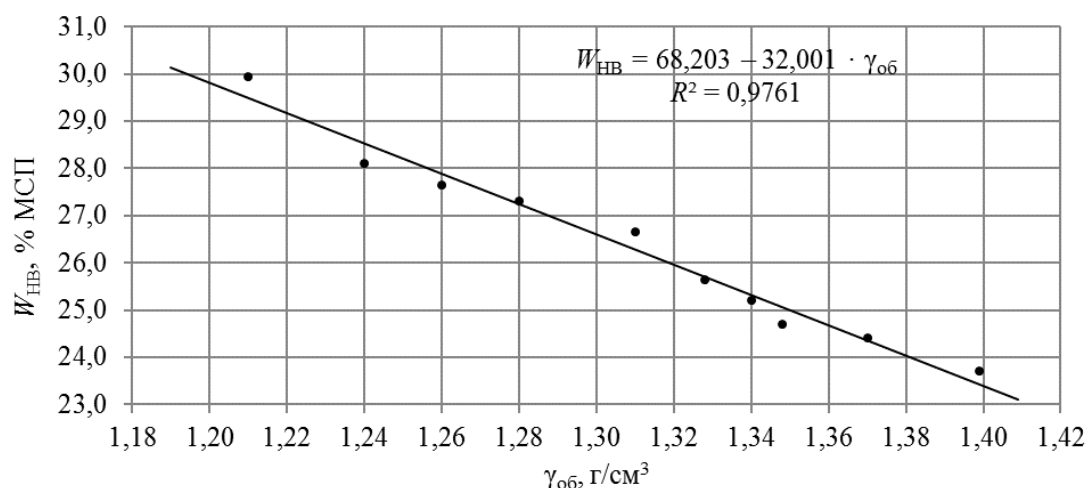


Рисунок 4 – Графическая интерпретация функциональной связи $W_{нв} = f(\gamma_{об})$ (при $W_{г/ч} = (57,6 \pm 2,0)$ % МСП в слое 0–100 см) при искусственном уплотнении почвы

Сходная с вышеотмеченной функциональная связь между наименьшей влагемкостью и плотностью сложения почвы при стабильном фракционном составе (в частности, содержании в почве физической глины) наблюдается и в естественно сложившихся почвенных профилях. Примером тому служат опытные данные, которые были получены на участке бывшего опытно-производственного хозяйства «Ростовская областная опытно-мелиоративная станция» (ОПХ РООМС), сложенном в пределах метровой толщи тяжелосуглинистым черноземом с относительно равномерным содержанием глинистых частиц по метровому почвенному профилю при $W_{г/ч} = (60,5 \pm 2,0)$ % МСП. Замеры наименьшей влагемкости $W_{нв}$ и плотности сложения $\gamma_{об}$ проводились по отбираемым пробам послойно (через каждые 10 см) в трехкратной повторности (по трем пробуренным на опытном участке скважинам) (таблицы 2, 3 и рисунки 5, 6).

Таблица 2 – Значения $W_{нв}$ и $\gamma_{об}$ при $W_{г/ч} = (60,5 \pm 2,0)$ % МСП в естественно сформировавшемся почвенном профиле

Параметр	Значение параметра								
	$W_{нв}$, % МСП	30,5	29,6	29,2	28,6	26,7	28,1	27,3	27,5
$\gamma_{об}$, г/см ³	1,08	1,13	1,14	1,17	1,22	1,25	1,27	1,30	

Продолжение таблицы 2

$W_{нв}$, % МСП	26,6	26,4	26,4	25,8	25,5	25,7	26,2	25,2	24,5
$\gamma_{об}$, г/см ³	1,31	1,32	1,34	1,37	1,39	1,42	1,44	1,47	1,52

Таблица 3 – Значения $W_{\text{НВ}}$ и $\gamma_{\text{об}}$ при $W_{\text{г/ч}} = (70,0 \pm 2,0) \% \text{ МСП}$ в естественно сформировавшемся почвенном профиле

Параметр	Значение параметра												
	$W_{\text{НВ}}, \% \text{ МСП}$	29,7	28,8	28,5	28,6	27,8	27,4	26,0	25,0	23,9	23,5	23,7	22,5
$\gamma_{\text{об}}, \text{г/см}^3$	1,34	1,36	1,38	1,39	1,42	1,43	1,45	1,47	1,48	1,49	1,52	1,54	1,57

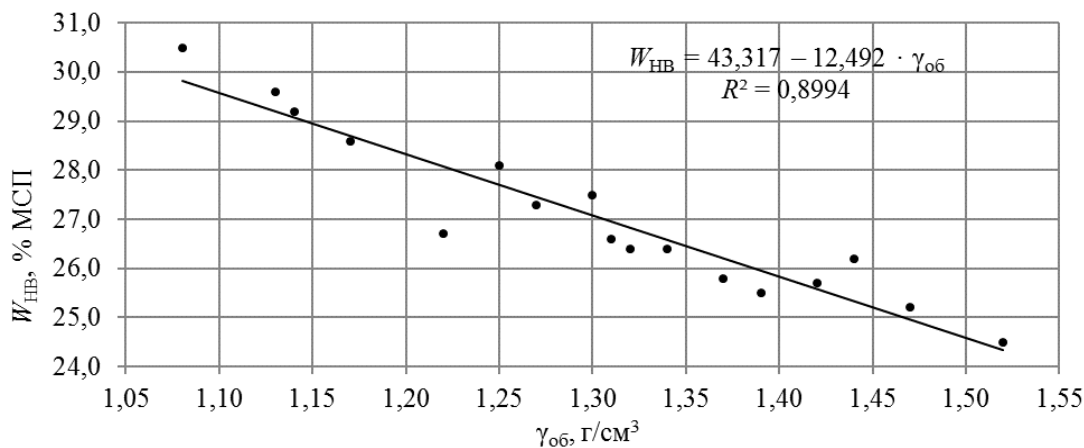


Рисунок 5 – Графическая интерпретация функциональной связи $W_{\text{НВ}} = f(\gamma_{\text{об}})$ (при $W_{\text{г/ч}} = (60,5 \pm 2,0) \% \text{ МСП}$ в слое 0–100 см) в естественно сформировавшемся почвенном профиле

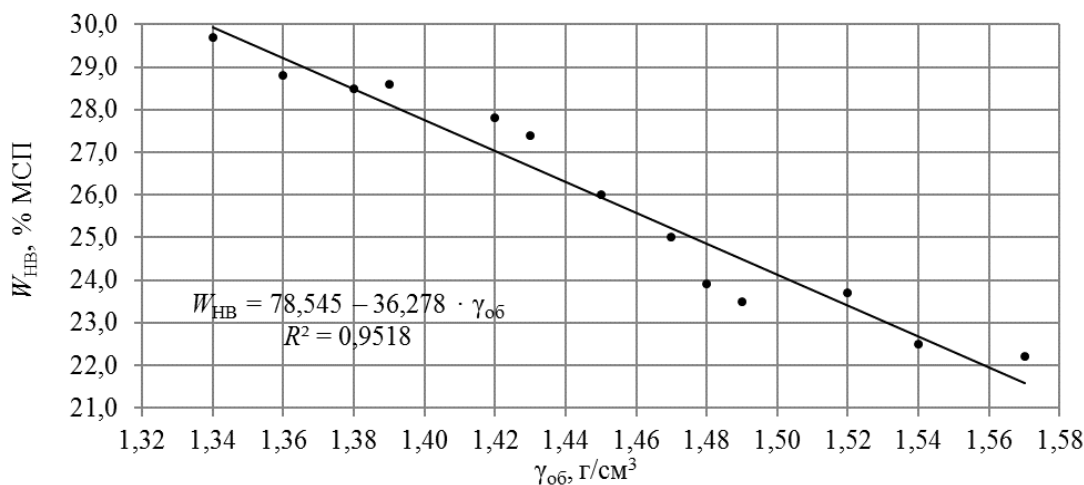


Рисунок 6 – Графическая интерпретация функциональной связи $W_{\text{НВ}} = f(\gamma_{\text{об}})$ (при $W_{\text{г/ч}} = (70,0 \pm 2,0) \% \text{ МСП}$ в слое 0–100 см) в естественно сформировавшемся почвенном профиле

Наличие тесной корреляционной связи между $W_{\text{НВ}}$ и $\gamma_{\text{об}}$ позволяет не рассматривать параметр плотности сложения почвы в качестве отдельного независимого фактора влияния, так как он может быть учтен через установленную функциональную связь $W_{\text{НВ}} = f(\gamma_{\text{об}})$. Проведенный анализ опытных данных позволяет в последующем исследовании в качестве поч-

венных параметров, характеризующих почвенные условия формирования локальных контуров капельного увлажнения и их геометрические размеры, использовать значения $W_{\text{НВ}}$, $W_{\text{г/ч}}$ и $V_{\text{вп/лч}}$.

В числе предположений о геометрических размерах контуров увлажнения (глубине контура $h_{\text{кон}}$ и диаметре контура $d_{\text{кон}}$), количественно учитывающих почвенные характеристики, известны зависимости В. Н. Шкуры и Д. Л. Обумахова [13] в виде:

$$(h_{\text{кон}})_{W_{\text{г/ч}}} = 0,651 \cdot q_{\text{кап}}^{0,62} \cdot t_{\text{кап}}^{0,33} \cdot W_{\text{г/ч}}^{0,32} \cdot \left(\frac{1}{\beta_{\text{из/п}}} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{1,21 - \beta_{\text{из/п}}}{\beta_{\text{из/п}} - \beta_{\text{н}}} \right)^{0,1}, \quad (1)$$

$$(d_{\text{кон}})_{W_{\text{г/ч}}} = 0,078 \cdot q_{\text{кап}}^{0,25} \cdot t_{\text{кап}}^{0,24} \cdot W_{\text{г/ч}}^{0,32} \cdot \left(\frac{1}{\beta_{\text{из/п}}} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{1,21 - \beta_{\text{из/п}}}{\beta_{\text{из/п}} - \beta_{\text{н}}} \right)^{0,09}, \quad (2)$$

где $(h_{\text{кон}})_{W_{\text{г/ч}}}$ – глубина локального контура капельного увлажнения почвы, м;

$q_{\text{кап}}$ – расход отдельной капельницы, формирующей контур, л/ч;

$t_{\text{кап}}$ – продолжительность капания (капельного полива), ч;

$\beta_{\text{из/п}}$ – влажность ограничивающей контур изоплеты, в долях от $\beta_{\text{НВ}}$;

$\beta_{\text{н}}$ – дополивная (начальная) влажность почвы, в долях от $\beta_{\text{НВ}}$;

$(d_{\text{кон}})_{W_{\text{г/ч}}}$ – максимальный диаметр локального контура капельного увлажнения, м.

В указанных зависимостях почвенные условия непосредственно учитываются величиной $W_{\text{г/ч}}$ и опосредованно (через $\beta_{\text{н}}$ и $\beta_{\text{из/п}}$, определяемые в долях от $\beta_{\text{НВ}}$) – величиной $W_{\text{НВ}}$. О приемлемости моделей (1) и (2) можно судить по результатам сопоставления расчетных и опытных значений $h_{\text{кон}}$ и $d_{\text{кон}}$. Примеры проведенного нами сопоставления результатов расчета с опытными данными В. С. Бочарникова [6] приведены ниже.

Пример 1. Условия проведения капельного полива: $W_{\text{г/ч}} = 21,2$ % МСП; $W_{\text{НВ}} = 16,5$ % МСП; $\beta_{\text{н}} = 0,7 \beta_{\text{НВ}}$; влажность почвы, соответствующая граничной изоплете, $\beta_{\text{гп}} = \beta_{\text{из/п}} = 0,75 \beta_{\text{НВ}}$; $q_{\text{кап}} = 2,0$ л/ч (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты сопоставления рассчитанных по моделям (1) и (2) и опытных (по В. С. Бочарникову) значений $h_{\text{кон}}$ и $d_{\text{кон}}$

Поливная норма	Значение параметра контура					
	$(h_{\text{кон}})_{\text{расч}}$, м	$(h_{\text{кон}})_{\text{опыт}}$, м	Отклоне- ние, %	$(d_{\text{кон}})_{\text{расч}}$, м	$(d_{\text{кон}})_{\text{опыт}}$, м	Отклоне- ние, %
$N_{\text{пол}} = 8,6$ л/кап. ($q_{\text{кап}} \times t_{\text{кап}} = 2 \times 4,3$)	0,81	0,82	+1,22	0,52	0,54	+3,70
$N_{\text{пол}} = 19,2$ л/кап. ($q_{\text{кап}} \times t_{\text{кап}} = 2 \times 9,6$)	1,05	1,06	+0,94	0,63	0,66	+4,55
$N_{\text{пол}} = 25,8$ л/кап. ($q_{\text{кап}} \times t_{\text{кап}} = 2 \times 12,9$)	1,16	1,32	+12,12	0,68	0,73	+6,85

Сопоставление приведенных расчетных и измеренных (опытных) значений $h_{\text{кон}}$ и $d_{\text{кон}}$ позволяет сделать заключение о высокой степени точности и приемлемости моделей (1) и (2) для прогнозирования глубины и диаметра локальных контуров увлажнения почвы для рассмотренных условий полива.

Пример 2. Условия проведения капельного полива: $W_{\text{г/ч}} = 48,4$ % МСП; $\beta_{\text{н}} = 0,7 \beta_{\text{НВ}}$; влажность почвы, соответствующая граничной изо-плете, $\beta_{\text{гр}} = \beta_{\text{из/п}} = 0,75 \beta_{\text{НВ}}$; $q_{\text{кап}} = 1,3$ л/ч (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты сопоставления рассчитанных по моделям (1) и (2) и опытных (по В. С. Бочарникову) значений $h_{\text{кон}}$ и $d_{\text{кон}}$

Поливная норма	Значение параметра контура					
	$(h_{\text{кон}})_{\text{расч}}$, м	$(h_{\text{кон}})_{\text{опыт}}$, м	Отклоне- ние, %	$(d_{\text{кон}})_{\text{расч}}$, м	$(d_{\text{кон}})_{\text{опыт}}$, м	Отклоне- ние, %
$N_{\text{пол}} = 2,86$ л/кап. ($q_{\text{кап}} \times t_{\text{кап}} = 1,3 \times 2,2$)	0,38	0,60	+36,67	0,52	0,47	-10,64
$N_{\text{пол}} = 5,72$ л/кап. ($q_{\text{кап}} \times t_{\text{кап}} = 1,3 \times 4,4$)	0,48	0,78	+38,46	0,61	0,62	+1,61
$N_{\text{пол}} = 8,45$ л/кап. ($q_{\text{кап}} \times t_{\text{кап}} = 1,3 \times 6,5$)	0,54	0,94	+42,55	0,68	0,74	+8,11

Проведенные в исследовании В. Н. Шкуры, Д. Л. Обумахова, А. Н. Рыжакова [13] и представленные выше расчеты показали приемлемость указанных зависимостей (1) и (2) для рассмотренных в данной работе [13] диапазонов изменения значений $W_{\text{г/ч}}$ и других условий проведения исследований авторов этих зависимостей. И при этом в ряде случаев указанные модели дают значительные (превышающие 12 %) расхождения между рас-

четными и опытными значениями (таблица 5). Причинами указанного обстоятельства являются допущения, принятые авторами при разработке модели, и недоучет в моделях (1) и (2) таких значимых почвенных параметров, как $W_{\text{НВ}}$ и $V_{\text{вп/1ч}}$.

Результаты и обсуждение. Для учета указанных факторов влияния была проведена дополнительная обработка полученного В. Н. Шкурой и Д. Л. Обумаховым экспериментального материала, в результате которой в дополнение к ранее включенному в модели (1) и (2) почвенному параметру $(\Pi_{\text{поч}})_{W_{\text{г/ч}}} = W_{\text{г/ч}}^{0,32}$ получены его интерпретации, учитывающие такие почвенные константы, как $W_{\text{НВ}}$ и $V_{\text{вп/1ч}}$:

$$(\Pi_{\text{поч}})_{W_{\text{НВ}}} = (0,133 \cdot W_{\text{НВ}})^{1+(0,1 \cdot W_{\text{НВ}})^{-2}},$$

$$(\Pi_{\text{поч}})_{V_{\text{вп/1ч}}} = 4,42 - 0,824 \cdot V_{\text{вп/1ч}}.$$

Графические образы изменения указанных почвенных параметров в зависимости от $W_{\text{г/ч}}$, $W_{\text{НВ}}$ и $V_{\text{вп/1ч}}$ приведены на рисунках 7–9.

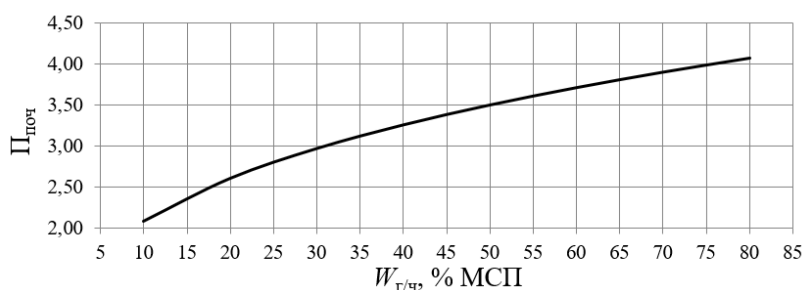


Рисунок 7 – Графическая интерпретация функциональной связи

$$(\Pi_{\text{поч}})_{W_{\text{г/ч}}} = W_{\text{г/ч}}^{0,32}$$

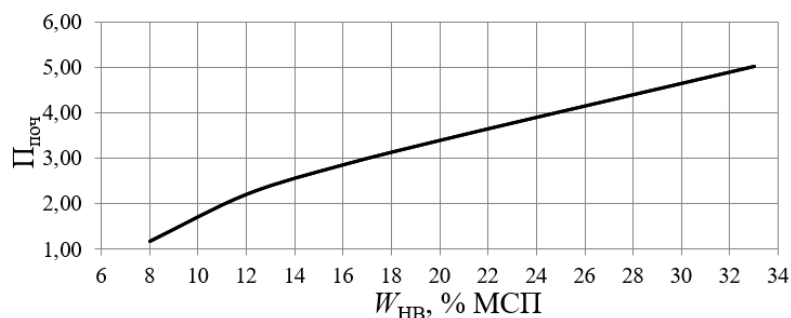


Рисунок 8 – Графическая интерпретация функциональной связи

$$(\Pi_{\text{поч}})_{W_{\text{НВ}}} = (0,133 \cdot W_{\text{НВ}})^{1+(0,1 \cdot W_{\text{НВ}})^{-2}}$$

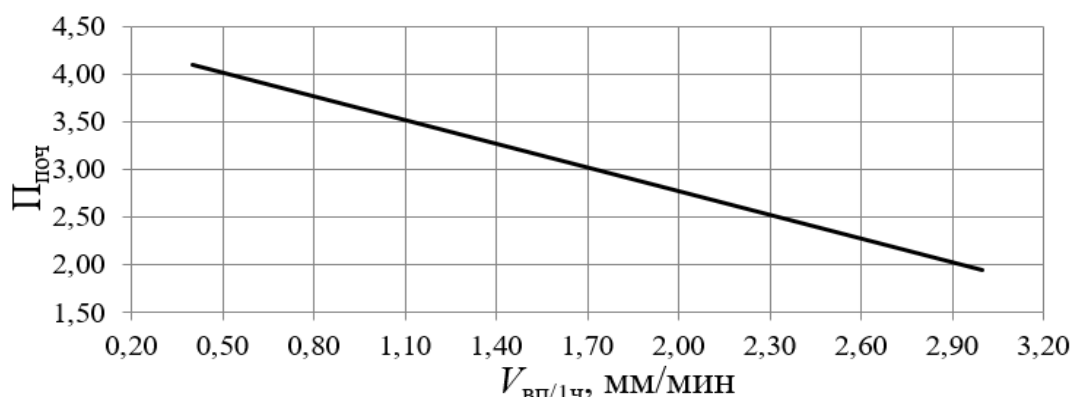


Рисунок 9 – Графическая интерпретация функциональной связи

$$(\Pi_{\text{поч}})_{V_{\text{вп/1ч}}} = 4,42 - 0,824 \cdot V_{\text{вп/1ч}}$$

С учетом указанных параметров модели (1) и (2) приобретают вид:

$$(h_{\text{кон}})_{W_{\text{НВ}}} = 0,651 \cdot q_{\text{кап}}^{0,62} \cdot \frac{t_{\text{кап}}^{0,33}}{(0,133 \cdot W_{\text{НВ}})^{1+(0,1 \cdot W_{\text{НВ}})^{-2}}} \cdot \left(\frac{1}{\beta_{\text{из/п}}}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{1,21 - \beta_{\text{из/п}}}{\beta_{\text{из/п}} - \beta_{\text{н}}}\right)^{0,1}, \quad (3)$$

$$(d_{\text{кон}})_{W_{\text{НВ}}} = 0,078 \cdot q_{\text{кап}}^{0,25} \cdot t_{\text{кап}}^{0,24} \cdot \left[(0,133 \cdot W_{\text{НВ}})^{1+(0,1 \cdot W_{\text{НВ}})^{-2}}\right] \cdot \left(\frac{1}{\beta_{\text{из/п}}}\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{1,21 - \beta_{\text{из/п}}}{\beta_{\text{из/п}} - \beta_{\text{н}}}\right)^{0,09}, \quad (4)$$

$$(h_{\text{кон}})_{W_{\text{вп/1ч}}} = 0,651 \cdot q_{\text{кап}}^{0,62} \cdot \frac{t_{\text{кап}}^{0,33}}{4,42 - 0,824 \cdot V_{\text{вп/1ч}}} \cdot \left(\frac{1}{\beta_{\text{из/п}}}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{1,21 - \beta_{\text{из/п}}}{\beta_{\text{из/п}} - \beta_{\text{н}}}\right)^{0,1}, \quad (5)$$

$$(d_{\text{кон}})_{W_{\text{вп/1ч}}} = 0,078 \cdot q_{\text{кап}}^{0,25} \cdot t_{\text{кап}}^{0,24} \cdot [4,42 - 0,824 \cdot V_{\text{вп/1ч}}] \cdot \left(\frac{1}{\beta_{\text{из/п}}}\right)^{0,7} \cdot \left(\frac{1,21 - \beta_{\text{из/п}}}{\beta_{\text{из/п}} - \beta_{\text{н}}}\right)^{0,09}. \quad (6)$$

С учетом моделей (1)–(6) и для повышения точности расчетов полученные с их помощью значения $h_{\text{кон}}$ и $d_{\text{кон}}$ предлагается определять по соотношениям вида:

$$h_{\text{кон}} = 0,333 \cdot [(h_{\text{кон}})_{W_{\text{НВ}}} + (h_{\text{кон}})_{W_{\text{г/ч}}} + (h_{\text{кон}})_{W_{\text{вп/1ч}}}], \quad (7)$$

$$d_{\text{кон}} = 0,333 \cdot [(d_{\text{кон}})_{W_{\text{НВ}}} + (d_{\text{кон}})_{W_{\text{г/ч}}} + (d_{\text{кон}})_{W_{\text{вп/1ч}}}], \quad (8)$$

Проверка приемлемости предложенных моделей и зависимостей осуществлена сопоставлением (таблица 6) результатов расчета с опытом, проведенным в следующих условиях: тяжелосуглинистая почва, полив капельницей с расходом $q_{\text{кап}} = 3,2$ л/ч, продолжительность капельвания $t_{\text{кап}} = 5$ ч (поливная норма $N_{\text{пол}} = 16$ л/кап.), почвенное пространство с доливной

влажностью $\beta_n = 0,7 \beta_{HB}$. Размеры контуров определялись по граничной изоплете с влажностью $\beta_{гр} = 0,75 \beta_{HB}$.

Таблица 6 – Результаты сопоставления расчетных и опытных параметров локальных контуров капельного орошения почвы по ее различным водно-физическим характеристикам

В см

Почвенная характеристика	Расчетное значение параметра контура					
	$(h_{кон})_{W_{г/ч}}$	$(h_{кон})_{W_{HB}}$	$(h_{кон})_{V_{вп/1ч}}$	$(d_{кон})_{W_{г/ч}}$	$(d_{кон})_{W_{HB}}$	$(d_{кон})_{V_{вп/1ч}}$
$W_{г/ч} = 52,5 \%$ МСП; $W_{HB} = 27,0 \%$ МСП; $V_{вп/1ч} = 1,1$ мм/мин	0,85	0,70	0,86	0,82	0,98	0,81
$W_{г/ч} = 52,5 \%$ МСП; $W_{HB} = 23,0 \%$ МСП; $V_{вп/1ч} = 0,8$ мм/мин	0,85	0,80	0,80	0,82	0,87	0,86

Продолжение таблицы 6

Почвенная характеристика	Осредненное расчетное и опытное значение параметра контура			
	$(h_{кон})_{расч}$	$(h_{кон})_{опыт}$	$(d_{кон})_{расч}$	$(d_{кон})_{опыт}$
$W_{г/ч} = 52,5 \%$ МСП; $W_{HB} = 27,0 \%$ МСП; $V_{вп/1ч} = 1,1$ мм/мин	0,80	0,84	0,87	0,89
$W_{г/ч} = 52,5 \%$ МСП; $W_{HB} = 23,0 \%$ МСП; $V_{вп/1ч} = 0,8$ мм/мин	0,81	0,83	0,85	0,81

В таблице 6 имеются примеры сопоставления между собой рассчитанных по зависимостям (1)–(6) значений геометрических параметров контуров, отклонения при этом в части случаев вполне приемлемы (< 12 %), а в отдельных случаях превышают 20 %. Однако сопоставление осредненных расчетных и опытных значений глубины и диаметра контуров капельного увлажнения дает высокую сходимость результатов расчета по полученным моделям с опытными данными (отклонения осредненных расчетных данных от опытных не превышают 3,6 %). Данное обстоятельство подтверждает необходимость и целесообразность расчета параметров контура капельного увлажнения ($h_{кон}$ и $d_{кон}$) с учетом нескольких независи-

мых почвенных характеристик. В данном случае учет трех характеристик почвы ($W_{\text{НВ}}$, $W_{\text{г/ч}}$ и $V_{\text{вп/1ч}}$) позволяет рассчитать глубину и диаметр локального контура капельного орошения с достаточной для практического применения точностью (при погрешности, не превышающей $\pm 12\%$).

Выводы

1 Точность расчетных зависимостей для определения линейных размеров локальных контуров капельного полива зависит от полноты учета факторов влияния на процесс образования контуров, и в частности водно-физических характеристик увлажняемого почвогрунтового пространства.

2 В качестве определяющих размеры контуров увлажнения почвенных параметров предложено рассматривать содержание в почве физической глины ($W_{\text{г/ч}}$, % МСП), наименьшую влагоемкость почвы ($W_{\text{НВ}}$, % МСП) и скорость впитывания воды почвой ($V_{\text{вп/1ч}}$, мм/мин).

3 Глубину и диаметр локальных контуров капельного орошения предлагается определять с помощью моделей (1)–(8), учитывающих каждый из рассмотренных почвенных параметров, а окончательное значение принимать как среднее по трем рассматриваемым параметрам.

4 Предложенные модели позволяют определить линейные размеры локальных контуров капельного увлажнения с приемлемой для практики точностью (при погрешности, не превышающей $\pm 12\%$) в рассмотренных пределах изменения факторов влияния ($W_{\text{г/ч}} = 10...80\%$ МСП; $W_{\text{НВ}} = 8...33\%$ МСП; $V_{\text{вп/1ч}} = 0,4...3,0$ мм/мин).

5 При дальнейшем совершенствовании предложенной методики расчета основных геометрических параметров локальных контуров капельного увлажнения почвы целесообразно учесть установленную связь между параметрами $W_{\text{НВ}}$ и $\gamma_{\text{об}}$ и более точно установить влияние на значения $h_{\text{кон}}$ и $d_{\text{кон}}$ технологических параметров полива.

Список использованных источников

- 1 Оросительные системы России: от поколения к поколению: монография: в 2 ч. / В. Н. Щедрин, А. В. Колганов, С. М. Васильев, А. А. Чураев. – Новочеркасск: Геликон, 2013. – 590 с.
- 2 Шумаков, Б. Б. Теоретические и экспериментальные исследования капельного орошения / Б. Б. Шумаков, А. А. Алексашенко, Н. И. Вдовин // Вестник сельскохозяйственной науки. – М., 1978. – № 7. – С. 82–92.
- 3 Айдаров, И. П. Расчеты контуров увлажнения при капельном орошении / И. П. Айдаров, А. А. Алексашенко, Л. Ф. Пестов // Теория и практика комплексного мелиоративного регулирования. – М., 1983. – С. 15–22.
- 4 Ахмедов, А. Д. Контурные увлажнения почвы при капельном орошении / А. Д. Ахмедов, Е. Ю. Галиуллина // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2012. – № 3(270). – С. 183–188.
- 5 Капельное орошение сои на тяжелосуглинистых почвах / А. В. Шуравилин, В. В. Бородычѳ, М. Н. Лытов, О. А. Белик // Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство. – 2009. – № 3. – С. 21–25.
- 6 Бочарников, В. С. Научно-экспериментальное обоснование повышения эффективности технологических средств локального орошения в овощеводстве открытого и закрытого грунта: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 06.01.02 / Бочарников Виктор Сергеевич. – Волгоград, 2016. – 39 с.
- 7 Храбров, М. Ю. Технология малообъемного орошения / М. Ю. Храбров // Мелиорация и водное хозяйство. – 2000. – № 4. – С. 30–32.
- 8 Гаджиев, М. К. Особенности капельного орошения виноградников в условиях Дагестанской АССР: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.02 / Гаджиев Магомед Кебедович. – Новочеркасск, 1984. – 24 с.
- 9 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. – Новочеркасск, 1984. – С. 129–133.
- 10 Голованов, А. И. Основы капельного орошения / А. И. Голованов, Е. В. Кузнецов. – Краснодар: КГАУ, 1996. – 96 с.
- 11 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.
- 12 Ясониди, О. Е. Водосбережение при орошении / О. Е. Ясониди; Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. – Новочеркасск: УПЦ «Набла» ЮРГТУ (НПИ), 2004. – 473 с.
- 13 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.

References

- 1 Shchedrin V.N., Kolganov A.V., Vasilyev S.M., Churaev A.A., 2013. *Orositelnyye sistemy Rossii: ot pokoleniya k pokoleniyu: monografiya: v 2 chastyah* [Irrigation systems in Russia: from generation to generation: monograph: in 2 parts]. Novocherkassk, Helikon Publ., 590 p. (In Russian).
- 2 Shumakov B. B., Aleksashenko A.A., Vdovin N.I., 1978. *Teoreticheskiye i eksperimentalnyye issledovaniya kapelnogo orosheniya* [Theoretical and experimental studies of drip irrigation]. *Vestnik selskokhozyaystvennoy nauki* [Bulletin of Agricultural Science]. Moscow, no. 7, pp. 82-92. (In Russian).

3 Aydarov I.P., Pestov L.F., 1983. *Raschety konturov uvlazhneniya pri kapelnom oroshenii* [Calculations of moisture contours by drip irrigation]. *Teoriya i praktika kompleksnogo meliorativnogo regulirovaniya* [Theory and practice of complex meliorative regulation]. Moscow, pp. 15-22. (In Russian).

4 Akhmedov A.D., Galiullina Ye.Yu., 2012. *Kontury uvlazhneniya pochvy pri kapelnom oroshenii* [Contours of soil moistening during drip irrigation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vyssheye professional'noye obrazovaniye* [Bulletin of Nizhnevolzhsk agrouniversity complex: Science and Higher Vocational Education], no. 3(270), pp. 183-188. (In Russian).

5 Shuravilin A.V., Borodychev V.V., Lytov M.N, Belik O.A., 2009. *Kapelnoye orosheniye soi na tyazhelosuglinistykh pochvakh* [Drip irrigation of soybean on heavy loamy soils]. *Vestnik RUDN. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo* [Bulletin of Peoples' Friendship University. Series: Agronomy and livestock], no. 3, pp. 21-25. (In Russian).

6 Bocharnikov V.S., 2016. *Nauchno-eksperimentalnoye obosnovaniye povysheniya effektivnosti tekhnologicheskikh sredstv lokalnogo orosheniya v ovoshchevodstve otkrytogo i zakrytogo grunta. Avtoreferat diss. d-ra tekhn. nauk* [Scientific-experimental basis for increasing the efficiency of local irrigation technology in vegetable growing of open and closed soil. Abstract of dr. techn. sci. diss.]. Volgograd, 39 p. (In Russian).

7 Khrabrov M.Yu., 2000. *Tekhnologiya maloobyemnogo orosheniya* [Technology of Low-Volume Irrigation]. *Melioratsiya i vodnoye khozyaystvo* [Irrigation and Water Management], no. 4, pp. 30-32. (In Russian).

8 Gadzhiev M.K., 1984. *Osobennosti kapelnogo orosheniya vinogradnikov v usloviyakh Dagestanskoj ASSR. Avtoreferat diss. kand. s.-kh. nauk* [Features of a drip irrigation of vineyards under the conditions of the Dagestan ASSR. Abstract of cand. agr. sci. diss.]. Novochoerkassk, 24 p. (In Russian).

9 Oleynik A.M., Gadzhiev M.K., 1984. *Kharakter formirovaniya konturov uvlazhneniya pochvy pri kapelnom oroshenii* [The nature of formation of contours of soil moistening during cap irrigation]. *Rezhimy orosheniya i vodopotrebleniye selskokhozyaystvennykh kultur na Severnom Kavkaze* [Irrigation regimes and water consumption of crops in the North Caucasus]. Novochoerkassk, pp. 129-133. (In Russian).

10 Golovanov A.I., Kuznetsov Ye.V., 1996. *Osnovy kapelnogo orosheniya* [Fundamentals of drip irrigation]. Krasnodar, KSAU Publ., 96 p. (In Russian).

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

12 Yasonidi O.Ye., 2004. *Vodosberezheniye pri oroshenii* [Water saving by irrigation]. Novochoerkassk State Land Reclamation Academy. Novochoerkassk, Nabla Production-training centre YURSTU (NPI), 473 p. (In Russian).

13 Shkura V.N., Obumakhov D.L., Ryzhakov A.N., 2014. *Kapelnoye orosheniye yabloni: monografiya* [Drip irrigation of the apple tree: monograph]. Novochoerkassk, Lick Publ., 310 p. (In Russian).

Шкура Виктор Николаевич

Ученая степень: кандидат технических наук

Ученое звание: профессор

Должность: начальник отдела рыбоводных мелиораций и аквакультур

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: Head of Department

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

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: пр. Баклановский, 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