

УДК 631.674.6

**В. Н. Шкура, А. С. Штанько**

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

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ В КОНТУРАХ КАПЕЛЬНОГО УВЛАЖНЕНИЯ**

*Цель исследования – получение экспериментальных данных и зависимости, позволяющей прогнозировать распределение влажности почвы в локальных контурах увлажнения, которые формируются в подкапельном почвенном пространстве при капельном орошении. Объект исследования – локальные контуры капельного увлажнения почв. Предмет исследования – распределение разновлажностных зон в капельно увлажняемом внутриконтурном пространстве при капельных поливах. Результат исследования – экспериментальная зависимость, позволяющая с приемлемой для практического использования точностью рассчитать распределение уровней увлажненности почвы в единичных контурах капельного увлажнения по глубине ее промачивания.*

*Ключевые слова: капельное орошение, капельный полив, локальный контур увлажнения, влажность почвы, изолинии влажности.*

\*\*\*\*\*

**V. N. Shkura, A. S. Shtanko**

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

### **STUDY OF SOIL MOISTURE DISTRIBUTION IN DRIP IRRIGATION CONTOURS**

*The purpose of the study is to obtain experimental data and dependencies, which make it possible to predict the soil moisture distribution in local moisture contours, which are formed in the subsurface soil space during drop irrigation. The object of the study is the local contours of soil drip moistening. The subject of the study is the distribution of different moisture zones in drip-watered internal contour space at drip irrigation. The result of the study is the experimental dependence that allows calculating the distribution of soil moisture levels in single drip moisture contours according to the depth of wetting with acceptable accuracy for practical use.*

*Key words: drip irrigation, drip watering, local irrigation contour, soil moisture, moisture isolines.*

**Введение.** При капельном орошении растений в подкапельном почвенном пространстве формируются контуры увлажнения почвы. При этом имеет место значительная неравномерность распределения влажности почвы в пределах единичных контуров увлажнения – от уровня, соответствующего полной влагоемкости, до влажности почвы, достигающей ее естественного состояния. Отметим, что состояние увлажненности почвы влияет на протекание почвенных процессов и на условия роста и развития корневых систем растений. При этом в разновлажностных зонах контуров капельного увлажнения могут проявляться как позитивные, так и негативные процессы в почвообразовании, а также формироваться как благоприятные, так и неприемлемые для функционирования корней растений области. Влажностные показатели почвы в пределах единичных контуров увлажнения в значительной степени определяют продуктивность растений, а также конструктивные решения систем капельного орошения [1]. В связи с указанными обстоятельствами при разработке способа и технологии капельного полива изучению указанного явления уделялось определенное внимание.

В разные периоды становления и развития капельной технологии орошения с разным уровнем и глубиной вопросы исследования контуров и внутриконтурного распределения влажности почвы рассматривались в публикациях ряда отечественных специалистов в области капельного орошения [2–6]. Аналитический обзор известных разработок в этой области [7, 8] позволил заключить, что общепринятая зависимость для определения глубинного распределения влажности почвы по локальному контуру капельного увлажнения отсутствует при все возрастающей потребности в ней. Отсутствие такой зависимости сдерживает разработку методики расчета внутриконтурного распределения уровней влажности почвы и прогнозирования распределения линий влажности в пределах локальных контуров капельного увлажнения почвенной толщи, что в свою очередь сдерживает разработку методологии оптимального управления капельными поливами растений. На ликвидацию дефицита информации и рекомендаций по этому вопросу направлено настоящее исследование, целью которого поставлено получение экспериментально обоснованной зависимости для описания функциональной связи  $(h_{из/п})_{\beta_i} = f(\beta_i)$ , где  $(h_{из/п})_{\beta_i}$  – заглубленность под поверхность земли изоплеты с определенным уровнем влажности почвы  $\beta_i$ , % массы сухой почвы (% МСП), во внутриконтурном капельно увлажняемом почвенном пространстве, м.

**Материалы и методы.** Первооснову для получения расчетной зависимости составляют единичные капельные контуры, для получения которых было запланировано проведение натурных исследований на четырех экспериментальных площадках, отличающихся почвенными условиями формирования контуров увлажнения. Характеристики почв на опытных площадках капельного полива приведены в таблице 1.

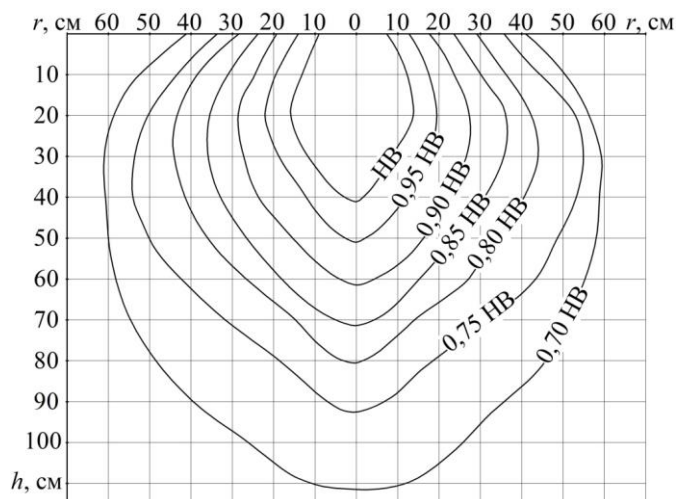
**Таблица 1 – Данные о почвенных параметрах экспериментальных площадок**

Почвенная характеристика	Значение характеристики по площадкам			
	1	2	3	4
Средняя плотность сложения метрового слоя почвы $\bar{\gamma}_{об}$ , т/м <sup>3</sup>	1,29 ± 0,08	1,26 ± 0,06	1,28 ± 0,07	1,32 ± 0,08
Среднее содержание глинистых частиц в метровом почвенном слое $\bar{W}_{г/ч}$ , % МСП	29,8 ± 1,9	44,8 ± 2,2	56,0 ± 1,8	71,3 ± 2,8
Средняя по метровому слою наименьшая влагоемкость (НВ) почвы $\bar{W}_{НВ}$ , % МСП	21,9 ± 2,0	25,8 ± 2,1	26,4 ± 1,8	31,1 ± 2,4

Полив осуществлялся капельницами производительностью  $q_{кап} = (2,50 \pm 0,09)$  л/ч.

Почвенные параметры ( $\bar{W}_{г/ч}$ ,  $\bar{W}_{НВ}$  и  $\bar{\gamma}_{об}$ ) определялись по общепринятым методикам, а отбор проб почвы на влажность в соответствии с методическими рекомендациями [6, 7]. В процессе камеральной обработки проб и измерений контуров определялась влажность образцов, строилась матрица влажностных показателей почвы в абсолютных значениях –  $\beta_i$ , % МСП. На последующем этапе обработки матрицы устанавливались относительные характеристики  $\beta_i/\beta_{НВ}$  (где  $\beta_{НВ}$  – влажность почвы, соответствующая НВ, % МСП) и составлялась матрица влажности почвенного пространства в относительных ее значениях. Данная матрица использовалась для построения изоплет в подкапельном почвенном профиле. Пример контура, зафиксированного на площадке № 3, приведен на рисунке 1.

Геометрические образы сечений контуров вертикальной плоскостью, проходящей через вертикаль капания, построенных для различных почвенных условий их формирования, использовались для определения значений заглубленности разновлажностных изоплет  $(h_{из/п})_{\beta_i}$  и последующего дисперсионно-корреляционного анализа.



Подписи на изоплетах – их влажность в долях от НВ

**Рисунок 1 – Вертикальный профиль капельного увлажнения почвы**

**Результаты и обсуждение.** При анализе рассматривались различные варианты функциональной связи между величиной заглубленности изоплет с разным уровнем их влажности и факторами влияния  $(h_{из/п})_{\beta_i} = f(\bar{W}_{г/ч}, \bar{W}_{НВ}, \bar{\gamma}_{об}, \beta_i, \beta_{НВ})$ . В результате анализа установлено наличие корреляционной связи в функциональных зависимостях:

$$\begin{aligned} (h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}} &= f_1(\bar{W}_{г/ч}, \beta_i / \beta_{0,7НВ}), \\ (h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}} &= f_2(\bar{W}_{НВ}, \beta_i / \beta_{0,7НВ}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $(h_{из/п})_{\beta_i}$  – заглубленность изоплеты, м, с определенным уровнем влажности  $\beta_i$ ;

$\beta_i$  – влажность изоплеты в долях от  $\beta_{НВ}$  (от 0,6 до 1,0  $\beta_{НВ}$ ), % МСП;

$(h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$  – заглубленность изоплеты с влажностью  $\beta_i = 0,7\beta_{НВ}$ , м;

$\beta_{НВ}$  – влажность, соответствующая уровню НВ, % МСП;

$\beta_{0,7НВ}$  – величина влажности изоплеты, соответствующей  $0,7\beta_{НВ}$ , % МСП.

Значения соотношений  $(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$  для соответствующих значений  $\beta_i / \beta_{0,7НВ}$  по исследованным контурам приведены в таблице 2.

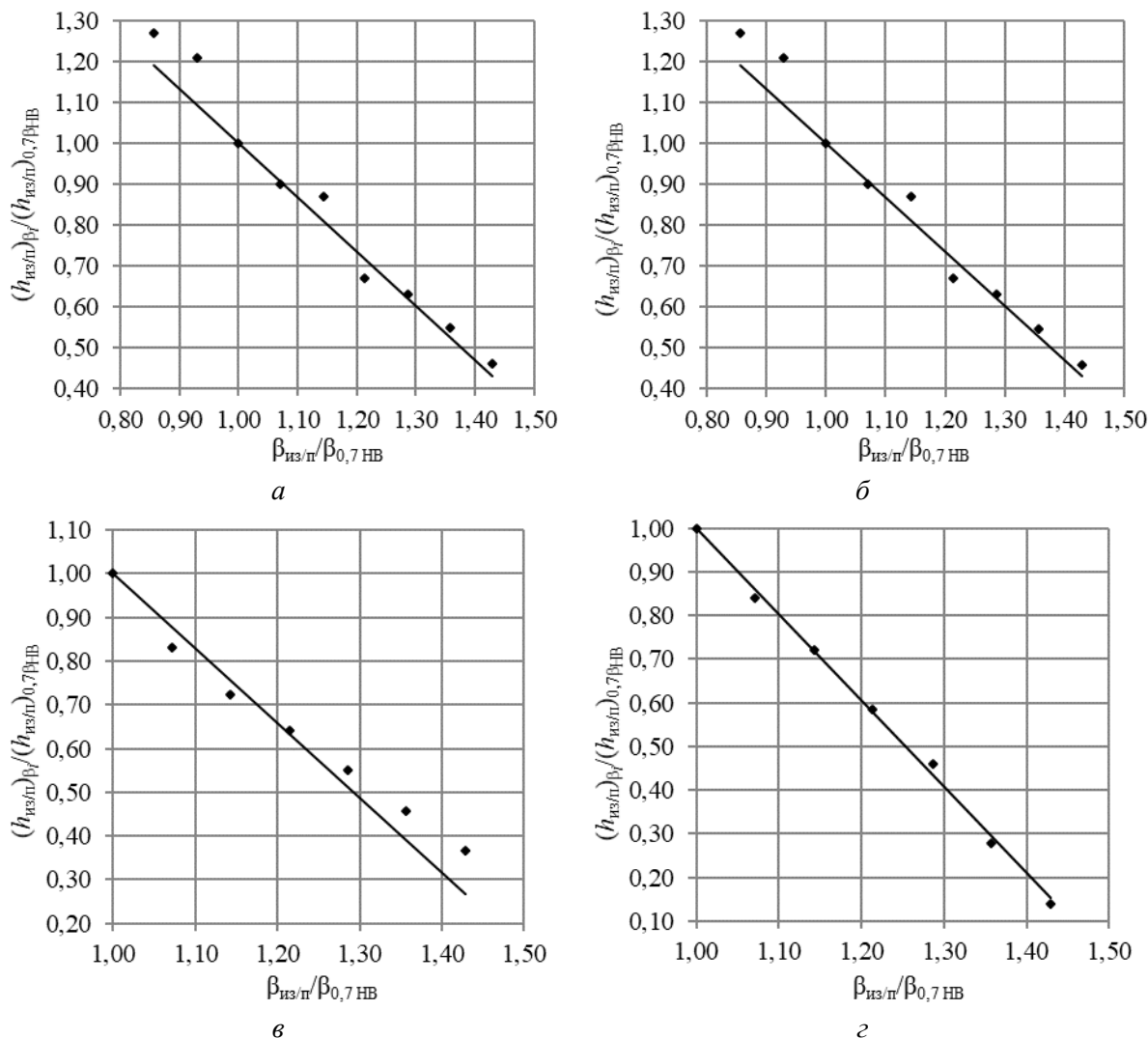
**Таблица 2 – Опытные данные об относительных значениях заглубленности изоплет**

Параметр	Значение параметра								
	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
Влажность изоплеты $\beta_i$ , в долях от НВ	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\beta_i / \beta_{0,7НВ}$	0,857	0,929	1,000	1,071	1,143	1,214	1,286	1,357	1,429
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ для контура № 1	1,270	1,210	1,000	0,900	0,870	0,670	0,630	0,548	0,460
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ для контура № 2	–	1,100	1,000	0,880	0,780	0,660	0,514	0,423	0,296
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ для контура № 3	–	–	1,000	0,832	0,723	0,642	0,551	0,456	0,365
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ для контура № 4	–	–	1,000	0,840	0,720	0,586	0,460	0,278	0,190

Приведенные в таблице 2 данные аппроксимируются зависимостью:

$$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}} = 1,0 - 1,1^{0,1 \cdot W_{г/ч}} \cdot (\beta_i / \beta_{0,7НВ} - 1). \quad (2)$$

Соответствие опытных и расчетных значений проиллюстрировано рисунком 2.



*a* – при  $\bar{W}_{г/ч} = 29,8$  % МСП; *б* – при  $\bar{W}_{г/ч} = 44,8$  % МСП;

*в* – при  $\bar{W}_{г/ч} = 56,0$  % МСП; *г* – при  $\bar{W}_{г/ч} = 71,3$  % МСП

**Рисунок 2 – Графическое представление опытных и расчетных значений функциональной связи  $(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}} = f_1(\bar{W}_{г/ч}, \beta_i / \beta_{0,7НВ})$**

Функциональная связь (1) описывается экспериментальной зависимостью:

$$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}} = 1,0 - 1,2^{0,1 \cdot W_{НВ}} \cdot (\beta_i / \beta_{0,7НВ} - 1). \quad (3)$$

Расчетные и опытные значения  $(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$  приведены в таблице 3.

Учитывая имеющиеся место разнознаковые и разновеликие отличия в отношениях опытных и расчетных значений  $(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , определенных по зависимостям (2) и (3), предлагаем окончательное их значение принимать по зависимости вида:

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

**Таблица 3 – Расчетные по зависимости (2) и опытные значения параметра  $(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$**

Параметр	Значение параметра								
	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
Влажность изоплеты $\beta_i$ , в долях от НВ	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\beta_i / \beta_{0,7\beta_{НВ}}$	0,857	0,929	1,000	1,071	1,143	1,214	1,286	1,357	1,429
По контуру № 1 (при $\bar{W}_{НВ} = 21,9\%$ МСП)									
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , опыт	1,270	1,210	1,000	0,900	0,870	0,670	0,630	0,548	0,460
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , расчет	1,213	1,106	1,000	0,894	0,787	0,681	0,574	0,468	0,350
Отклонение, %	4,5	8,6	0,0	0,7	9,5	1,6	8,9	14,6	23,9
По контуру № 2 (при $\bar{W}_{НВ} = 25,8\%$ МСП)									
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , опыт	–	1,100	1,000	0,880	0,780	0,660	0,514	0,423	0,296
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , расчет	–	1,106	1,000	0,894	0,787	0,681	0,574	0,468	0,350
Отклонение, %	–	0,5	0,0	1,6	0,9	3,2	11,7	10,6	18,2
По контуру № 3 (при $\bar{W}_{НВ} = 26,4\%$ МСП)									
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , опыт	–	–	1,000	0,832	0,723	0,642	0,551	0,456	0,365
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , расчет	–	–	1,000	0,885	0,769	0,654	0,537	0,422	0,306
Отклонение, %	–	–	0,0	6,2	6,4	1,9	2,5	7,5	16,2
По контуру № 4 (при $\bar{W}_{НВ} = 31,1\%$ МСП)									
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , опыт	–	–	1,000	0,840	0,720	0,586	0,460	0,278	0,190
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , расчет	–	–	1,000	0,875	0,748	0,623	0,496	0,371	0,244
Отклонение, %	–	–	0,0	4,2	3,9	6,3	7,8	33,4	28,4

Апробация полученной экспериментальной зависимости проведена сопоставлением расчетных значений  $(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$  при соответствующих значениях  $\beta_i / \beta_{0,7\beta_{НВ}}$  с опытными значениями этого параметра, которые рассчитаны по локальным контурам капельного увлажнения почвы, зафиксированным в различных условиях капельного полива В. С. Бочарниковым, М. К. Гаджиевым, А. М. Олейником, И. К. Кулиничем и Ю. С. Уржумовой. Результат авторской обработки первичных опытных данных контуров [5, 9–12] в сопоставлении их с расчетными значениями приведен в таблице 4.

Судя по приведенным в таблице данным, результаты расчета с приемлемой для практических расчетов точностью согласуются с известными опытными данными.

**Таблица 4 – Сопоставление расчетных значений  $(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$  с опытными**

Параметр	Значение параметра								
	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
Влажность изоплеты $\beta_i$ , в долях от НВ	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\beta_i / \beta_{0,7НВ}$	0,857	0,929	1,000	1,071	1,143	1,214	1,286	1,357	1,429
По данным М. К. Гаджиева (при $\bar{W}_{г/ч} = 48,3$ % МСП, $\bar{W}_{НВ} = 22,5$ % МСП)									
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , опыт	–	1,100	1,000	0,934	0,823	0,720	0,573	0,485	0,404
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , расчет	1,220	1,110	1,000	0,891	0,778	0,670	0,558	0,448	0,332
Отклонение, %	–	0,9	0,0	4,6	5,5	6,9	2,6	7,6	17,8
По данным А. М. Олейника (при $\bar{W}_{г/ч} = 47,5$ % МСП, $\bar{W}_{НВ} = 25,0$ % МСП)									
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , опыт	–	–	1,000	0,890	0,790	0,690	0,590	0,480	0,370
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , расчет	1,125	1,111	1,000	0,889	0,775	0,663	0,551	0,438	0,324
Отклонение, %	–	–	0,0	0,1	1,9	5,4	8,3	8,8	12,4
По данным И. К. Кулинича (при $\bar{W}_{г/ч} = 51,2$ % МСП, $\bar{W}_{НВ} = 27,0$ % МСП)									
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , опыт	–	–	1,000	0,880	0,760	0,640	0,525	0,396	0,300
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , расчет	1,233	1,116	1,000	0,884	0,766	0,650	0,533	0,417	0,299
Отклонение, %	–	–	0,0	0,4	0,8	1,6	1,5	5,6	0,3
По данным В. С. Бочарникова (при $\bar{W}_{г/ч} = 21,2$ % МСП, $\bar{W}_{НВ} = 16,5$ % МСП)									
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , опыт	–	–	1,000	0,905	0,804	0,740	0,650	0,550	0,460
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , расчет	–	–	1,000	0,908	0,816	0,724	0,632	0,541	0,442
Отклонение, %	–	–	0,0	0,3	1,5	2,2	2,8	1,6	3,9
По данным Ю. С. Уржумовой (при $\bar{W}_{г/ч} = 58,0$ % МСП, $\bar{W}_{НВ} = 25,8$ % МСП)									
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , опыт	1,170	1,080	1,000	0,830	0,792	0,633	0,467	0,360	0,248
$(h_{из/п})_{\beta_i} / (h_{из/п})_{0,7\beta_{НВ}}$ , расчет	1,240	1,190	1,000	0,882	0,762	0,640	0,481	0,404	0,282
Отклонение, %	6,0	10,2	0,0	6,3	3,8	1,1	3,0	12,2	14,5

**Вывод.** В результате проведенных экспериментальных и аналитических исследований получена зависимость, позволяющая с приемлемой для практических расчетов точностью прогнозировать величину заглубленности разновлажностных изоплет в почвогрунтовую толщу в контурах капельного увлажнения 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 Алексашенко, А. А. Теоретические вопросы капельного орошения / А. А. Алексашенко, Н. И. Вдовин // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1977. – № 8. – С. 10–14.

3 Ахмедов, А. Д. Контуры увлажнения почвы при капельном орошении / А. Д. Ахмедов, Е. Ю. Галиуллина // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2012. – № 3. – С. 183–188.

4 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.

5 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.

6 Ясониди, О. Е. Капельное орошение: монография / О. Е. Ясониди; НГМА. – Новочеркасск: Лик, 2011. – 322 с.

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

8 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.

9 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.

10 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.

11 Кулинич, И. К. Капельное орошение виноградников на горных склонах в условиях Краснодарского края: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.02 / Кулинич Иван Константинович. – Волгоград, 1982. – 22 с.

12 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.