

А. С. Штанько, В. Н. Шкура

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

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОЛИВНЫХ НОРМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ФОРМИРОВАНИЕ ЗАДАННЫХ ПАРАМЕТРОВ УВЛАЖНЕНИЯ ПОЧВ ПРИ КАПЕЛЬНОМ ПОЛИВЕ

Цель исследования – разработка методики определения поливных норм для капельного орошения растений, обеспечивающих формирование в подкапельном почвенном пространстве локальных (единичных) контуров увлажнения с определенной (заданной) глубиной промачивания различных видов почв. Известные предложения, методики расчета и способы определения поливных норм для капельного полива базируются на подходе (формуле), сформулированном и предложенном А. Н. Костяковым, и предусматривают использование различных коррективов, учитывающих специфические особенности увлажнения почвенного пространства при покапельной подаче воды на поверхность почвы. Предлагаемые корректирующие параметры получены только для узко определенных почвенных и технологических условий капельного полива, что ограничивает их применение. На исключение вышеуказанного недостатка направлено проведенное исследование, основные результаты которого приведены в статье. Предложенная методика позволяет определить поливную норму одной капельницы, обеспечивающей формирование первичного контура увлажнения в подкапельном почвенном пространстве, для широкого спектра почвенных и технологических условий капельного полива с заданной глубиной увлажнения (промачивания) при определенной доливной влажности (определенном уровне (пороге) предполивной влажности) и заданном уровне постполивной влажности. Опытная проверка адекватности предложенной методики показала, что значение поливной нормы на одну капельницу, полученное в результате определения по предложенной нами методике, равно 5,2 л/кап. и соответствует опытному значению, зафиксированному в патенте RU № 2204241 и равному 5,62 л/кап., с допустимой точностью 7,5 %, что свидетельствует о приемлемости предлагаемой методики расчета поливных норм для различных почвенных и технологических условий капельного орошения растений.

Ключевые слова: капельное орошение, капельный полив, контур увлажнения, параметры контура, почвенные характеристики, поливная норма.

A. S. Shtanko, V. N. Shkura

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

THE METHODOLOGY FOR CALCULATING IRRIGATION RATES PROVIDING THE FORMATION OF THE GIVEN SOIL MOISTURE PARAMETERS UNDER DRIP IRRIGATION

The purpose of the research is the development of methodology for determining irrigation rates for drip irrigation of plants that ensure the formation of local (single) moisture contours in a subdrip soil space with a definite (given) depth of soaking of different soil types.

The known proposals, calculation methods and methods for determining irrigation rates for drip irrigation are based on the approach (formula) formulated and proposed by A. N. Kostyakov and consider the use of various adjustments taking into account the specific features of soil moisture under drip water distribution to soil surface. The proposed adjustment factors were obtained only for narrowly defined soil and technological conditions of drip irrigation, which limits their application. To eliminate the above-mentioned shortcoming, the study was carried out, the main results of which are given in the article. The proposed methodology allows to determine the irrigation rate of a single emitter that provides the formation of a primary moisture contour in a sub drip soil space, for a wide range of soil and technological conditions of drip irrigation with a specified depth of moistening (wetting) at a certain antecedent soil water (a certain level of pre-irrigation humidity) and a predetermined level of post-irrigation humidity. The experimental check of the adequacy of the proposed methodology showed that the value of the irrigation rate per one emitter obtained as a result of the determination by the method proposed by us, is 5.2 l/drop and corresponds to the experimental value, fixed in patent RU no. 2204241 and equal to 5.62 l/drop with an accuracy tolerance of 7.5 %, which indicates the acceptability of the proposed calculation method for irrigation rates for various soil and technological conditions of drip irrigation of plants.

Key words: drip irrigation, drip watering, moisture contour, contour parameters, soil characteristics, irrigation rate.

Введение. Определяющим технологическим параметром капельного орошения является поливная норма, установление которой относится к одной из основных задач проектирования и эксплуатации капельных оросительных систем. Известен ряд предложений по методикам расчета и способам определения поливных норм для капельного полива растений, среди которых разработки и рекомендации А. М. Олейника и М. К. Гаджиева, А. С. Овчинникова, М. П. Мещерякова и В. С. Бочарникова, И. П. Кружилина и А. С. Кружилина, А. И. Голованова и Е. В. Кузнецова, А. Д. Ахмедова и Е. Ю. Галиуллиной, М. Ю. Храброва, Б. Б. Шумакова, О. Е. Ясониди, Е. В. Мелиховой и В. В. Бородычёва, Е. П. Борового, Г. А. Сенчукова и И. В. Новиковой, В. Н. Шкуры, Д. Л. Обумахова и А. Н. Рыжакова, А. О. Жатканбаевой, А. Т. Козыкеевой и Ж. С. Мустафаева и др. При наличии достаточно широкого спектра предложений по методикам расчета и способам определения поливных норм для капельного орошения растений общепризнанный подход отсутствует, а расчетные зависимости и алгоритмы ведения расчетов разрабатываются до настоящего времени [1–5].

Исследователями систем и технологий капельного орошения при определении поливной нормы $N_{\text{пол}}$ за основу для расчета принималась

классическая формула А. Н. Костякова, предложенная для условий сплошного увлажнения орошаемого участка по всей поливаемой площади в виде, $\text{м}^3/\text{га}$:

$$N_{\text{пол}} = 100 \cdot \gamma_{\text{об}} \cdot h_{\text{увл}} \cdot (\beta_{\text{п/п}} - \beta_{\text{д/п}}), \quad (1)$$

где $\gamma_{\text{об}}$ – плотность сложения, или объемная масса, слоя почвы, $\text{т}/\text{м}^3$;

$h_{\text{увл}}$ – глубина увлажнения («промачивания») почвенного слоя, м ;

$\beta_{\text{п/п}}$ – величина постполивной влажности почвы в пределах увлажняемого слоя, задаваемая (измеряемая) в процентах от массы сухой почвы, % МСП;

$\beta_{\text{д/п}}$ – величина дополивной влажности увлажняемой почвы, % МСП.

Приемлемая для условий сплошного (дождевого или чекового) полива зависимость А. Н. Костякова давала завышенные значения поливных норм для технологий локального, и в частности капельного, орошения.

Специфику капельного орошения (в части учета локальности увлажняемой зоны) рядом авторов предлагалось учитывать введением в зависимость (1) корректирующего параметра, который принимает во внимание неполноту увлажняемой площади в виде соотношения площади увлажнения и расчетной площади (1 га по формуле (1)) или площади питания, выделенной растению при посеве или посадке [6]. Выполненные расчеты (по предварительно принятым размерам контуров и (или) соотношениям увлажняемой и неувлажняемой площади) сопоставлялись с фактическими их значениями, и в результате фиксировалось, что глубины контуров капельного увлажнения почвы (зон промачивания почвы при капельном поливе) превышали предварительно принятые к расчету (требуемые по агрономическим показаниям), а диаметры зон промачивания (контуров увлажнения) были меньше ожидаемых, что требовало дополнительной коррекции расчетных зависимостей. В качестве дополнительных корректив в предлагаемые формулы для расчета поливных норм капельного ороше-

ния вводились различные коэффициенты, соответствующие конкретным условиям полива [2, 7]. Как правило, корректирующие расчетные зависимости указанные коэффициенты не имели под собой научно обоснованного физического смысла и соответствующего методологического обеспечения определения их значений, в связи с чем они и не получили широкого признания. В связи с вышеотмеченным целью настоящего исследования была поставлена разработка методики определения поливных норм для капельного орошения растений, обеспечивающих в различных почвенных и влажностных условиях полива формирование в подкапельном почвенном пространстве локальных (единичных) контуров увлажнения с заданной глубиной промачивания различных видов почв и с определенным уровнем постполивной влажности внутриконтурного почвенного пространства.

Отметим, что в большей части известных предложений предусматривалось определение поливных норм в кубических метрах на один гектар ($\text{м}^3/\text{га}$), что, по нашему мнению, не соответствует специфике капельного орошения, предусматривающего формирование в подкапельном почвенном пространстве (под каждым капельным микроводовыпуском) локальных (единичных) контуров увлажнения. Учитывая вышеуказанное обстоятельство, в некоторых работах [1, 8–10] предложили определять поливные нормы на одно растение ($(N_{\text{пол}})_{\text{раст}}$ (поливаемое одной капельницей), а в последующем на один капельный микроводовыпуск ($(N_{\text{пол}})_{\text{кап}}$ по соотношению вида, $\text{м}^3/\text{кап.}$:

$$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = \gamma_{\text{об}} \cdot W_{\text{кон}} \cdot (\beta_{\text{п/п}} - \beta_{\text{д/п}}), \quad (2)$$

где $W_{\text{кон}}$ – объем контура увлажнения, формирующегося в подкапельном почвенном пространстве при капельном поливе определенного типа почвы с доведением ее дополивной влажности до уровня заданной постполивной влажности при выдаче капельницей определенной поливной нормы, м^3 .

Указанная зависимость (2) в большей степени соответствует физике процесса капельного увлажнения подкапельного почвенного пространства,

что и принято за основу при разработке нижеприведенной методики. Она предназначена для определения поливной нормы одной капельницы ($N_{\text{пол}})_{\text{кап}}$ (одного капельного микроводовыпуска), обеспечивающей формирование первичного (исходного или начального) контура увлажнения в подкапельном почвенном пространстве при определенных почвенных и технологических условиях полива с заданной глубиной увлажнения (промачивания) $h_{\text{кон}} = h_{\text{увл}}$ и при определенной дополивной влажности (определенном уровне (пороге) предполивной влажности) $\beta_{\text{д/п}}$ и заданном уровне постполивной влажности в пределах внутриконтурного почвенного пространства $\beta_{\text{п/п}}$.

Материалы и методы. В соответствии с параметрами, входящими в зависимости (1) и (2), величина поливной нормы зависит от ряда природных (почвенных и почвенно-фенологических) условий и параметров капельного полива, в качестве которых при проведении исследований рассмотрены нижеследующие:

- почвенные условия, характеризующиеся нижеприведенными основными (определяющими процесс формирования контура) водно-физическими показателями: $\bar{\gamma}_{\text{об}}$ – плотностью сложения («объемной массой»), т/м³; $\bar{W}_{\text{г/ч}}$ – содержанием глинистых частиц в почве в процентах от массы сухой почвы (% МСП); $\bar{W}_{\text{нв}}$ – наименьшей влагоемкостью подлежащего увлажнению (промачиванию) слоя почвы, % МСП; $(\bar{V}_{\text{вп}})_{\text{1час}}$ – средней скоростью впитывания воды в почву за первый час полива, мм/мин;

- в качестве почвенно-фенологических параметров, влияющих на исследуемый процесс, рассмотрены $h_{\text{увл}}$ – расчетная (заданная) глубина увлажняемого слоя почвы или глубина контура капельного увлажнения почвы $h_{\text{кон}}$, м; $\bar{\beta}_{\text{д/п}}$ – средняя величина дополивной влажности почвенного слоя, % МСП; $\bar{\beta}_{\text{п/п}}$ – среднее значение постполивной влажности почвенного слоя во внутриконтурном пространстве, % МСП.

Отметим, что на величину поливной нормы кроме указанных параметров определенное влияние могут оказывать и другие почвенные и фенологические характеристики капельно увлажняемого пространства (содержание гумуса, химический состав почвенных отдельностей (разностей), структурность, наличие инородных включений, температура среды, состояние корневой системы растений и ряд других факторов). В определенной степени указанные факторы влияния учитываются в принятых к рассмотрению в качестве основных водно-физических и почвенно-фенологических параметрах, что позволяет на данном уровне решения поставленной задачи ограничиться рассмотрением только основных характеристик. Необходимо отметить, что в реальных условиях капельного полива угодий измеренные параметры $\bar{\gamma}_{об}$, $\bar{W}_{НВ}$ и $(\bar{V}_{ВП})_{1час}$ могут изменяться во времени (в процессе вегетации растений – в течение поливного периода). В связи с указанным обстоятельством могут изменяться и параметры контуров капельного увлажнения почвы, а следовательно и поливные нормы, обеспечивающие их формирование в подкапельном почвенном пространстве, что в настоящее время и в настоящей работе не рассматривается.

Определение почвенных и почвенно-фенологических параметров и условий капельного полива (контурообразования) осуществлялось опытным путем – постановкой соответствующих экспериментальных исследований (инструментальных измерений) с последующей обработкой опытных данных и проведением соответствующих анализов опытного материала по общепринятым методикам. Необходимые для их получения измерения проводились на участках с различными типами (видами) почвенного покрова. Глубина исследуемого слоя почвы принята равной 100 см, а необходимые измерения и изъятия почвенных проб в местах (на площадках) предполагаемого капельного полива осуществлялись через каждые 10 см по глубине почвенного слоя не менее чем по трем скважинам («буровым проходам»), расположенным в углах равнобедренного треугольника

со сторонами длиной 1 м. При первичной обработке опытных данных три их равноглубинных значения по $\bar{\gamma}_{об}$, $\bar{W}_{г/ч}$ и $\bar{W}_{НВ}$ осреднялись, и полученные осредненные значения в последующем рассматривались и анализировались по метровой почвогрунтовой толще. Установленные средние равноглубинные значения $\bar{\gamma}_{об}$, $\bar{W}_{г/ч}$, $\bar{W}_{НВ}$ и $\bar{\beta}_{д/п}$ наносились на почвенный профиль с шагом в 10 см. Такой подход позволяет определить средние значения указанных показателей для 30-, 50-, 70-, 100-сантиметрового и любого другого слоя почвы при использовании соотношений:

$$\begin{aligned}(\bar{\gamma}_{об})_{сл} &= [(\gamma_{об})_1 + (\gamma_{об})_2 + \dots + (\gamma_{об})_n] / n, \\(\bar{W}_{г/ч})_{сл} &= [(W_{г/ч})_1 + (W_{г/ч})_2 + \dots + (W_{г/ч})_n] / n, \\(\bar{W}_{НВ})_{сл} &= [(W_{НВ})_1 + (W_{НВ})_2 + \dots + (W_{НВ})_n] / n, \\(\bar{\beta}_{д/п})_{сл} &= [(\beta_{д/п})_1 + (\beta_{д/п})_2 + \dots + (\beta_{д/п})_n] / n,\end{aligned}$$

где $(\bar{\gamma}_{об})_{сл}$, $(\bar{W}_{г/ч})_{сл}$, $(\bar{W}_{НВ})_{сл}$, $(\bar{\beta}_{д/п})_{сл}$ – средние (осредненные по определенной (заданной) глубине увлажняемого (промачиваемого) слоя почвы) значения объемной массы (плотности сложения) почвы, т/м³, содержания глинистых частиц в почве, % МСП, наименьшей влагоемкости, % МСП, и доливной влажности почвы, % МСП, соответственно;

n – количество замеренных 10-сантиметровых слоев в пределах заданной (расчетной) глубины увлажнения почвенной толщи.

При проведении измерений вышеуказанных почвенных характеристик отрывом шурфа пробы изымались как с шагом 10 см, так и по границам выделявшихся генетических горизонтов. В последнем случае осредненные значения измеряемых параметров определялись по соотношению, учитывающему высоту (мощность) слоя генетически однородных почвенных горизонтов:

$$(\bar{\gamma}_{об})_{сл} = [(\gamma_{об})_{\Delta h_1} + (\gamma_{об})_{\Delta h_2} + \dots + (\gamma_{об})_{\Delta h_n}] / (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_n),$$

где $(\gamma_{об})_{\Delta h_n}$ – значение плотности сложения почвы в пределах выделенного

однородного слоя, проба для определения которого бралась в середине каждого генетического слоя, т/м³;

$\Delta h_i - \Delta h_n$ – глубины генетически однородных слоев почвенного профиля (в пределах промачиваемого слоя), м.

Аналогично определялись значения $(\bar{W}_{г/ч})_{сл}$, $(\bar{W}_{НВ})_{сл}$ и $(\bar{\beta}_{д/п})_{сл}$.

Общая глубина почвенного профиля, в пределах которой устанавливались средние (осредненные) значения почвенных характеристик, соответствовала принятой (заданной) по почвенно-фенологическим соображениям (обоснованиям) глубине увлажняемого (промачиваемого) слоя почвы $h_{увл} = \sum \Delta h_i$. При этом глубина промачиваемого слоя почвы, задаваемая гидромелиоратору агрономической службой (определяемая глубиной распространения корневой системы растений), может изменяться во времени. В случае, когда суммарные глубины генетически однородных горизонтов превысят глубину слоя промачивания, во избежание указанного несоответствия учитывается только определенная часть нижнего генетического слоя.

При разработке методики определения величины поливной нормы использовались собственные экспериментальные данные и известные авторам опытные данные ряда исследователей капельного орошения для широкого спектра почвенных и почвенно-фенологических условий капельного полива. Исходные условия и данные контрольных авторских опытов, позволяющих установить вид и оценить качество функциональной связи $(N_{пол})_{кап} = f(\bar{\gamma}_{об}, \bar{W}_{г/ч}, \bar{W}_{НВ}, (\bar{V}_{вп})_{1час}, \bar{\beta}_{д/п})$, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Почвенные и почвенно-фенологические условия капельного полива для метрового увлажняемого слоя почвы

Номер опыта	Значение параметра					
	$\bar{\gamma}_{об}$, т/м ³	$\bar{W}_{г/ч}$, % МСП	$\bar{W}_{НВ}$, % МСП	$(\bar{V}_{вп})_{1час}$, мм/мин	$\bar{\beta}_{д/п}$, в долях от $\beta_{НВ}$	$\bar{\beta}_{п/п}$, в долях от $\beta_{НВ}$
1	2	3	4	5	6	7
1	1,36	20,8	16,9	1,60	0,64 $\beta_{НВ}$	0,90 $\beta_{НВ}$
2	1,39	74,6	32,2	0,51	0,66 $\beta_{НВ}$	0,95 $\beta_{НВ}$
3	1,34	42,8	25,9	0,95	0,63 $\beta_{НВ}$	0,95 $\beta_{НВ}$

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
4	1,28	36,1	23,6	1,10	$0,68\beta_{\text{НВ}}$	$0,90\beta_{\text{НВ}}$
5	1,29	57,1	29,2	0,76	$0,67\beta_{\text{НВ}}$	$0,90\beta_{\text{НВ}}$

Капельный полив осуществлялся капельницами производительностью (расходом) $q_{\text{кап}} = 1,5 \dots 4,0$ л/ч, поливными нормами $(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 2 \dots 90$ л. Отметим, что на геометрические и влажностные параметры контуров увлажнения определенное влияние оказывают такие составляющие поливную норму параметры, как расход капельницы $q_{\text{кап}}$ и продолжительность капельования (капельного полива). Раздельное влияние указанных технологических параметров капельного полива на параметры контура капельного увлажнения, формирующегося в почвенном пространстве, является предметом отдельного исследования и в настоящей работе не рассматривается.

Учитывая принятую рабочую гипотезу в части использования в расчетах зависимости (2), основное внимание уделили определению параметров контура увлажнения, формирующегося в подкапельном почвенном пространстве при подаче в него через капельный микроводовыпуск различных по объему водоподачи поливных норм. Для определения геометрических и влажностных параметров контуров капельного увлажнения почвы по 4–6 радиусам от оси капания буром изымались пробы почвы по сетке 10×10 см. По каждой пробе объемно-весовым способом определялась величина постполивной влажности почвы, составлялись матрицы влажности почвы и строились изоплеты влажности, по которым устанавливались очертания контуров увлажнения и определялось осредненное значение влажности почвы во внутриконтурном пространстве. По аппроксимированным очертаниям контуров определялись значения глубины $h_{\text{кон}}$, м, максимального $\hat{d}_{\text{кон}}$, м, и среднего $\bar{d}_{\text{кон}}$, м, диаметров контуров и устанавливались значения соотношений $\bar{d}_{\text{кон}}/h_{\text{кон}}$ для различных почвенных условий капельного полива. Используя значения $\bar{d}_{\text{кон}}$ и $h_{\text{кон}}$ и приводя сложную

форму контура к форме цилиндра с диаметром $\bar{d}_{\text{кон}}$ и (глубиной) высотой $h_{\text{кон}}$, определяли объем контура $W_{\text{кон}}$, м³, по зависимости вида:

$$W_{\text{кон}} = 0,785 \cdot \bar{d}_{\text{кон}}^2 \cdot h_{\text{кон}}. \quad (3)$$

Результаты и обсуждение. Предлагаемая методика определения поливных норм при капельном орошении растений включает реализацию нижеследующих этапов.

1 Установление исходных условий капельного полива почвенного пространства и параметров контурообразования.

1.1 Назначаются (принимаются) расчетные значения глубины увлажнения (промачивания) почвенной толщи $h_{\text{увл}}$ или глубины контура увлажнения почвы $h_{\text{кон}}$. В зависимости от почвенно-фенологических условий капельного полива могут рассматриваться от одного до трех горизонтов увлажнения почвенного профиля, принимаемых на основе известных зональных рекомендаций или устанавливаемых по данным распространенности (геометрии) корневых систем культивируемых в соответствующих природно-климатических условиях определенных видов растений. В качестве критерия для определения расчетной (задаваемой агрономом) глубины увлажнения почвы принимается глубина распространения основной массы корней растений, планируемых к возделыванию на определенном участке земли (уголье) при капельном орошении. При этом могут рассматриваться 2–3 значения $h_{\text{увл}}$ в зависимости от пофазового (эволюционного во времени) роста и развития корневой системы растения.

1.2 Инструментальными измерениями с использованием общепринятых методик на 3–5 типичных площадках капельно орошаемого участка для принятых в п. 1.1 глубин увлажнения почвенного профиля $h_{\text{увл}}$ с учетом вышеприведенных рекомендаций устанавливаются средние значения почвенных характеристик $\bar{W}_{\text{г/ч}}$, $\bar{W}_{\text{НВ}}$, $(\bar{V}_{\text{вл}})_{1\text{час}}$ и $\bar{\gamma}_{\text{об}}$.

1.3 С учетом почвенных и фенологических условий капельно ороша-

емого участка принимаются (назначаются) уровни дополивной (предполивной) и постполивной (послеполивной) влажности почвы – $\beta_{д/п}$ и $\beta_{п/п}$ соответственно, % МСП. Нижний уровень (порог) влажности (величина дополивной влажности) может быть задан(а) в соответствии с величиной влажности завядания определенных видов растений, культивируемых в определенных почвенных условиях, – $\beta_{зав}$, % МСП. При таком подходе величина поливной нормы будет превышать ее значения при иных (меньших) диапазонах изменения уровней влажности почвенного пространства при капельном поливе. Величина $\beta_{д/п}$ может быть задана в долях или в процентах от влажности, соответствующей уровню наименьшей влагоемкости почвы $\beta_{НВ}$, % МСП, и соответствовать значениям $\beta_{д/п} = 0,6...0,7 \beta_{НВ}$ или $\beta_{д/п} = 60...70 \% \beta_{НВ}$, учитывающим степень засухоустойчивости растений. Конкретное значение доли (процента) в указанном диапазоне значений принимается с учетом данных экспериментальных исследований, полученных в сходных с рассматриваемыми почвенных, климатических и фенологических условиях. При расчете поливных норм возможно использование реально измеренных значений дополивной влажности по слоям увлажняемого почвенного профиля с соответствующим их осреднением по расчетной глубине промачивания почвы. Верхний уровень влажности почвы (постполивная влажность) – $\beta_{п/п}$, достигаемый в результате капельного полива, чаще всего принимается равным влажности, соответствующей наименьшей влагоемкости $\beta_{НВ}$, а при наличии научно обоснованных рекомендаций на уровне $0,8...0,9 \beta_{НВ}$. При этом уровень постполивной влажности $\beta_{п/п}$ может приниматься дифференцированно в течение вегетационного (поливного) периода с учетом влаголюбивости растений.

2 По измеренным и камерально установленным значениям $\bar{W}_{г/ч}$, $\bar{W}_{НВ}$ и $(\bar{V}_{вп})_{1час}$ для соответствующей глубины увлажняемого почвенного слоя

$h_{\text{увл}} = h_{\text{кон}}$ определяется расчетное значение среднего по глубине слоя промачивания диаметра контура капельного увлажнения подкапельного почвенного пространства $\bar{d}_{\text{кон}}$, м, с использованием зависимости:

$$\bar{d}_{\text{кон}} = 0,333 \cdot h_{\text{кон}} \cdot (0,0765 \cdot W_{\text{г/ч}}^{0,6} + 0,0292 \cdot W_{\text{НВ}} + 0,6795 \cdot (\bar{V}_{\text{вп}})_{1\text{час}}^{-0,767}). \quad (4)$$

3 С использованием установленного значения $\bar{d}_{\text{кон}}$ и принятой глубины увлажнения $h_{\text{кон}}$ определяется объем контура увлажнения $W_{\text{кон}}$, м³, формирующегося в подкапельном почвенном пространстве, с использованием вышеприведенного соотношения (3).

4 С учетом зависимостей (2)–(4), установленных значений $\bar{\gamma}_{\text{об}}$ и $\bar{\beta}_{\text{д/п}}$ для принятого уровня постполивной влажности $\bar{\beta}_{\text{п/п}}$ определяется величина поливной нормы $(N_{\text{пол}})_{\text{кап}}$, м³/кап., по соотношению вида:

$$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 0,01 \cdot \gamma_{\text{об}} \cdot 0,785 \cdot [0,333 \cdot h_{\text{кон}} \cdot (0,0765 \cdot W_{\text{г/ч}}^{0,6} + 0,0292 \cdot W_{\text{НВ}} + 0,6795 \cdot (\bar{V}_{\text{вп}})_{1\text{час}}^{-0,767})^2 \cdot h_{\text{кон}} \cdot (\beta_{\text{п/п}} - \beta_{\text{д/п}}),$$

которое после простых математических преобразований приобретает вид:

$$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 0,00086 \gamma_{\text{об}} \cdot h_{\text{кон}}^3 \cdot [0,0765 \cdot W_{\text{г/ч}}^{0,6} + 0,0292 \cdot W_{\text{НВ}} + 0,6795 \cdot (\bar{V}_{\text{вп}})_{1\text{час}}^{-0,767}]^2 \cdot (\beta_{\text{п/п}} - \beta_{\text{д/п}}). \quad (5)$$

Приведенная выше методика и расчетная зависимость (5) приемлемы для широкого спектра почвенных, почвенно-фенологических и технологических условий капельного полива и нижеприведенных диапазонов изменения входящих в нее параметров: $\bar{\gamma}_{\text{об}} = 0,9 \dots 1,4$ т/м³; $\bar{W}_{\text{г/ч}} = 6 \dots 75$ % МСП; $\bar{W}_{\text{НВ}} = 8 \dots 33$ % МСП; $(\bar{V}_{\text{вп}})_{1\text{час}} = 0,3 \dots 3,0$ мм/мин; $\bar{\beta}_{\text{д/п}} = 0,60 \dots 0,75 \beta_{\text{НВ}}$, % МСП; $\bar{\beta}_{\text{п/п}} = 0,8 \dots 1,0 \beta_{\text{НВ}}$, % МСП; $q_{\text{кап}} = 1,5 \dots 4,0$ л/ч; $(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 4 \dots 90$ л. Предлагаемую методику отличает учет всех основных факторов влияния и широкий диапазон условий ее применения.

Оценка адекватности предлагаемой методики проведена для почвенных и технологических условий, приведенных в патенте «Способ опреде-

ления поливных норм при капельном орошении томатов» (RU № 2204241).
 Поливная норма для формирования контура капельного увлажнения почвенного слоя глубиной $h_{\text{увл}} = h_{\text{кон}} = 0,5$ м с постполивной влажностью $\bar{\beta}_{\text{п/п}} = 1,0 \cdot \bar{\beta}_{\text{НВ}}$, дополивной влажностью $\bar{\beta}_{\text{д/п}} = 0,7 \cdot \bar{\beta}_{\text{НВ}}$ была определена для условий светло-каштановых однородных сильно уплотненных тяжелосуглинистых почв, параметры которых составили: средняя по глубине увлажняемого слоя плотность сложения почвы $\bar{\gamma}_{\text{об}} = 1,29$ т/м³; наименьшая влагоемкость увлажняемого слоя почвы $\bar{W}_{\text{НВ}} = \bar{\beta}_{\text{НВ}} = 24,2$ % МСП; содержание в промачиваемом слое почвы глинистых частиц $\bar{W}_{\text{г/ч}} = 52,5$ % МСП и средняя скорость впитывания воды в почву за первый час полива $(\bar{V}_{\text{вп}})_{\text{1час}} = 0,9$ мм/мин.

Для вышеуказанных почвенных и фенологических условий капельного полива поливная норма в соответствии с зависимостью (5) составит:

$$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 0,00086 \cdot 1,29 \cdot 0,5^3 \cdot [0,0765 \cdot 52,5^{0,6} + 0,0292 \cdot 24,2 + 0,6795 \cdot 0,9^{-0,767}]^2 \cdot (24,2 - 0,7 \cdot 24,2) = 0,0052 \text{ м}^3 / \text{кап.} = 5,2 \text{ л/кап.}$$

В патенте RU № 2204241 объем водоподдачи или поливная норма на одну капельницу для вышеуказанных условий капельного полива определена по зависимости, которая в наших обозначениях имеет вид:

$$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}} = 0,01 \cdot \gamma_{\text{об}} \cdot l_{\text{м/к}} \cdot b_{\text{кап}} \cdot h_{\text{кон}} \cdot k_{\text{н}} \cdot (\beta_{\text{п/п}} - \beta_{\text{д/п}}) = \\ = 0,01 \cdot 1,29 \cdot 0,4 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot (24,2 - 0,7 \cdot 24,2) = 0,00562 \text{ м}^3 / \text{кап.},$$

где $l_{\text{м/к}} = 0,4$ м – межкапельное расстояние (расстояние между рядом расположенными (соседствующими) капельницами на капельной линии);

$b_{\text{кап}} = 0,6$ м – ширина полосы капельного увлажнения почвы;

$k_{\text{н}} = 0,5$ – коэффициент, учитывающий степень порозности почвы и водопроницаемости на всей площади орошаемого участка при капельном способе полива (не имеющий рекомендаций по его определению для других почвенных и почвенно-фенологических условий капельного полива).

Полученные (сопоставляемые) значения поливных норм отличаются на 7,5 %, что соответствует необходимой точности практических расчетов и свидетельствует о приемлемости предложенной зависимости для определения $(N_{\text{пол}})_{\text{кап}}$ в рассмотренных условиях капельного полива.

О приемлемости предлагаемой методики можно судить по результатам сопоставления рассчитанных по предлагаемым зависимостям и опытных значений параметров контуров капельного увлажнения почвы ($h_{\text{кон}}$, $\bar{d}_{\text{кон}}$ и $W_{\text{кон}}$) и поливных норм $(N_{\text{пол}})_{\text{кап}}$ (таблица 2), которые получены для приведенных в таблице 1 почвенных и почвенно-фенологических условий проведения капельных поливов.

Таблица 2 – Опытные и расчетные значения параметров контуров для различных почвенных и технологических условий капельного полива

Номер опыта	$h_{\text{кон}}$, м		$\bar{d}_{\text{кон}}$, м		$W_{\text{кон}}$, м ³		$(N_{\text{пол}})_{\text{кап}}$, л	
	расчет	опыт	расчет	опыт	расчет	опыт	расчет	опыт
1	1,0	0,97	0,48	0,52	0,18	0,20	10,6	12,0
2	1,0	0,95	1,03	1,05	0,814	0,76	107,3	96,0
3	1,0	0,96	0,73	0,70	0,42	0,39	46,5	44,0
4	1,0	1,05	0,66	0,70	0,34	0,38	22,4	24,0
5	1,0	1,06	0,85	0,89	0,57	0,62	48,4	48,0

Статистическая оценка расчетных и опытных значений сопоставляемых параметров показала, что расхождения в величинах не превышают 12 %, что вполне приемлемо для практики капельных поливов.

Выводы

1 Величина поливной нормы воды или поливного раствора, подаваемой(го) в подкапельное почвенное пространство одним капельным микро-водоотпуском (одной капельницей) при капельном орошении растений, является определяющим технологическим параметром при проектировании и эксплуатации капельных оросительных систем. Несмотря на важность и необходимость определения величины поливной нормы, отработанная, апробированная и общепризнанная методика расчета ее значений

для различных условий капельного полива отсутствует, и разработка соответствующих методик продолжается до настоящего времени.

2 Подавляющее количество ранее предложенных методик и зависимостей базируется на формуле А. Н. Костякова для определения поливной нормы для случая сплошного (площадного) увлажнения почвенного массива сельскохозяйственного угодья с введением исследователями в нее различных корректирующих параметров (коэффициентов), значения которых соответствовали только условиям их получения (установления).

3 Предложенная методика и расчетные зависимости предусматривают определение величины поливной нормы, приходящейся на одну капельницу, для широкого спектра почвенных и влажностных условий капельного полива, что существенно отличает ее от ранее предложенных.

4 Проверка адекватности предложенной методики показала, что значение поливной нормы на одну капельницу, полученное в результате определения по предложенной нами методике, равно 5,2 л/кап. и соответствует опытному значению, зафиксированному в патенте RU № 2204241 и равному 5,62 л/кап., с допустимой точностью 7,5 %, что свидетельствует о приемлемости предлагаемой методики.

Список использованных источников

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

2 Пат. 2204241 Российская Федерация, МПК А 01 G 25/02. Способ определения поливных норм при капельном орошении томатов / Кружилин И. П., Салдаев А. М., Кружилин Ю. И., Ходяков Е. А., Галда А. В.; заявитель и патентообладатель Всерос. науч.-исслед. ин-т орошаемого земледелия. – № 2001128337/13; заявл. 18.10.01; опубл. 20.05.03, Бюл. № 14. – 5 с.

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 Ovchinnikov, A. S. Methodology of calculation and justification of the wetting parameters in the open field and greenhouse / A. S. Ovchinnikov, V. S. Bocharnikov, M. P. Meshcheryakov // Environmental Engineering. – 2012. – № 4. – P. 29.

5 Жатканбаева, А. О. Математическое моделирование линейного параметра контуров увлажнения при капельном орошении / А. О. Жатканбаева, А. Т. Козыкеева, Ж. С. Мустафаев // Исследования и результаты. – 2016. – № 2. – С. 120–127.

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

7 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.

8 Голованов, А. И. Основы капельного орошения / А. И. Голованов, Е. И. Кузнецов. – Краснодар: КГАУ, 1996. – 96 с.

9 Сенчуков, Г. А. Капельное орошение / Г. А. Сенчуков, И. В. Новикова; Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. – Новочеркасск, 2013. – 59 с.

10 Храбров, М. Ю. Расчет распространения влаги в почве при капельном орошении / М. Ю. Храбров // Мелиорация и водное хозяйство. – 1999. – № 4. – С. 34–35.

References

1 Shkura V.N., Obumakhov D.L., Ryzhakov A.N., 2014. *Kapel'noe oroshenie yabloni* [Drip Irrigation of Apple Trees]. Novochoerkassk, Lick Publ., 310 p. (In Russian).

2 Kruzhilin I.P., Saldaev A.M., Kruzhilin Yu.I., Khodyakov E.A., Galda A.V., 2001. *Sposob opredeleniya polivnykh norm pri kapel'nom oroshenii tomatov* [Method for Determining the Irrigation Rates for Drip Irrigation of Tomatoes]. Patent RF no. 2204241 (In Russian).

3 Akhmedov A.D., Galiullina E.Yu., 2012. *Kontury uvlazhneniya pochvy pri kapel'nom oroshenii* [Soil moistening contours under drip irrigation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Bulletin of Nizhnevolzhskiy AgroUniversity Complex: Science and Higher Vocational Education], no. 3, pp. 183-188. (In Russian).

4 Ovchinnikov A.S., Bocharnikov V.S., Meshcheryakov M.P., 2012. Methodology of calculation and justification of the wetting parameters in the open field and greenhouse. *Environmental Engineering*, no. 4, pp. 29. (In English).

5 Zhatkanbaeva A.O., Kozykeeva A.T., Mustafaev Zh.S., 2016. *Matematicheskoe modelirovanie lineynogo parametra konturov uvlazhneniya pri kapel'nom oroshenii* [Mathematical modeling of the linear parameter of moisture contours under drip irrigation]. *Issledovaniya i rezul'taty* [Research and Results], no. 2, pp. 120-127. (In Russian).

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

7 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: sb. nauch. tr.* [Irrigation Regimes and Water Consumption of Crops in the North Caucasus: Proceed.]. Novochoerkassk, YuzhNIIGiM Publ., pp. 129-133. (In Russian).

8 Golovanov A.I., Kuznetsov E.I., 1996. *Osnovy kapel'nogo orosheniya* [Fundamentals of Drip Irrigation]. Krasnodar, KSAU Publ., 96 p. (In Russian).

9 Senchukov G.A., Novikova I.V., 2013. *Kapel'noe oroshenie* [Drip irrigation]. Novochoerkassk State Land Reclamation Academy. Novochoerkassk, 59 p. (In Russian).

10 Khrabrov M.Yu., 1999. *Raschet rasprostraneniya vlagi v pochve pri kapel'nom oroshenii* [Calculation of moisture distribution in soil under drip irrigation]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Irrigation and Water Management], no. 4, pp. 34-35. (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