

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫХ НОРМ ВОДОПОТРЕБНОСТИ ПРИ ДОЖДЕВАНИИ И КАПЕЛЬНОМ ОРОШЕНИИ ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОГО ГРУНТА

**А.П. Лихацевич, доктор технических наук, член-корр. НАН Беларуси,
Г.В. Латушкина, кандидат технических наук,**

**РУП «Институт мелиорации»,
г. Минск, Беларусь**

Аннотация

Исследована связь норм орошения сельскохозяйственных культур с их поливными нормами. Проведен анализ результатов водобалансовых расчетов за многолетний период (1980–2015 гг.) с привлечением данных 42-х метеостанций, расположенных в разных гидролого-климатических зонах Беларуси. Он показал, что технико-экономически обоснованные нормы водопотребности в проектах капельного полива и дождевания можно рассчитывать по максимумам орошения с использованием линейной зависимости с одним эмпирическим коэффициентом, постоянным для всех овощных культур, но изменяющимся по почвам. Установлено, что при повышении поливных норм оросительные нормы интенсивно снижаются, следуя от суглинистых к супесчаным и далее к песчаным почвам. Данная закономерность справедлива в диапазоне поливных норм, который охватывает весь спектр экономически обоснованного и экологически безопасного капельного орошения и дождевания на всей территории Беларуси.

Ключевые слова: нормы полива, водобалансовый расчет, нормы орошения, нормы водопотребности, максимумы орошения, технико-экономическое обоснование

Abstract

**A.P. Likhachevich, G.V. Latushkina
DETERMINATION OF TECHNICAL AND ECONOMICALLY JUSTIFIED NORMS OF WATER REQUIREMENTS FOR SPRINKLER AND DRIP IRRIGATION OF VEGETABLE CULTURES IN THE OPEN GROUND**

The relationship of agricultural irrigation norms with their watering rates has been studied. The analysis of the results of water balance calculations for a long-term period (1980–2015) was carried out. The data from 42 meteorological stations located in different hydrological and climatic zones of Belarus have been used. It was shown that technically and economically feasible norms of water demand in projects of drip and sprinkler irrigation can be calculated from the maximum irrigation using a linear relationship with a single empirical coefficient constant for all vegetable crops, but varying in soils. It was established that with an increase in watering rates, irrigation norms intensively decrease, following from loamy to sandy loam and further to sandy soil.

This pattern is valid in the range of watering rates, which covers the whole range of economically sound and environmentally safe drip and sprinkler irrigation throughout Belarus.

Keywords: watering rates, water balance calculation, irrigation norms, water requirements, irrigation maximums, feasibility study

Введение

Наблюдаемая за последние десятилетия тенденция роста дефицита водного баланса сельскохозяйственных культур заметно актуализировала развитие орошаемого земледелия в Республике Беларусь, что получило отражение в действующих программах по производству плодоовощной продукции. К настоящему времени в Беларуси накоплен немалый опыт проектирования, строительства и эксплуатации оросительных систем, но фактическая эффективность орошения еще не высока. Для ее повышения необходимо снизить капиталоемкость оросительных систем и затраты на их эксплуатацию. Исследования показали, что эти данные в значитель-

ной мере зависят от поливных норм, определяющих размер расчетных норм водопотребности орошаемых культур.

Согласно действующей методике проектирования систем орошения нормы водопотребности определяются для каждой культуры только по одной норме полива, зависящей лишь от водно-физических свойств орошаемых почв. Вместе с тем исследования последних лет показали, что для обеспечения максимального экономического эффекта от орошения нормы полива, задаваемые при расчете, помимо почв, должны увязываться с экономикой производства, а конкретно – с закупочными ценами на растениеводческую продукцию и себестоимостью ее про-

изводства, включая затраты на орошение, а это не учитывается в действующих рекомендациях [1].

Материалы и методы исследований

Исходным материалом для работы послужили многолетние (за 1980–2015 гг.) метеорологические данные 42-х метеостанций Республики Беларусь. В расчетах были использованы: 1) метеорологическая информация, полученная за последние 36 лет и учитывающая тенденции в изменении климата; 2) усовершенствованные методики определения оросительных норм, учитывающие влияние величины нормы полива на оросительную норму и обеспечивающие возможность технико-экономической оптимизации норм водопотребности в целях рационального использования ресурсов [2].

Для установления технико-экономически обоснованных проектных норм водопотребности при дож-

девании и капельном орошении овощных культур в условиях открытого грунта с использованием стандартной методики расчета водного баланса почвы по многолетним рядам метеонаблюдений для каждой метеостанции рассчитывались годовые оросительные нормы при разных поливных нормах. Их вариация допускалась в пределах от 0,1 мм до максимальных экологически обоснованных норм полива, рекомендуемых действующим нормативным документом [3]:

$$0,1 \text{ мм} \leq m \leq m_{\max}, \quad (1)$$

где m – заданная норма полива; m_{\max} – максимальная экологически обоснованная норма полива, рекомендуемая для данной почвы.

Максимальные экологически обоснованные поливные нормы устанавливались по типам почв согласно действующему нормативу [3]:

- для песчаных почв $m_{\max} = 20$ мм;

Таблица 1 – Максимумы орошения для капусты среднепоздней, возделываемой в районе метеостанции Марьина Горка

№ п/п	Годы	M _{max} , мм			№ п/п	Годы	M _{max} , мм		
		песок	супесь	суглинок			песок	супесь	суглинок
1	1980	140	111	94	19	1998	155	135	123
2	1981	211	179	159	20	1999	345	303	279
3	1982	213	180	161	21	2000	244	209	189
4	1983	296	254	231	22	2001	194	159	140
5	1984	187	159	143	23	2002	388	340	311
6	1985	219	190	174	24	2003	283	245	221
7	1986	252	220	200	25	2004	184	149	130
8	1987	148	117	99	26	2005	269	233	212
9	1988	159	136	122	27	2006	318	283	262
10	1989	176	149	135	28	2007	285	241	215
11	1990	179	150	134	29	2008	237	200	180
12	1991	242	208	189	30	2009	153	134	122
13	1992	422	375	349	31	2010	189	153	134
14	1993	202	166	145	32	2011	177	147	130
15	1994	337	297	274	33	2012	260	223	202
16	1995	274	232	207	34	2013	285	245	221
17	1996	260	223	204	35	2014	289	248	226
18	1997	194	168	153	36	2015	403	357	329

- для супесчаных почв $m_{max} = 25$ мм;
- для суглинистых почв $m_{max} = 30$ мм.

С целью разработки единой методики расчета норм водопотребности при любом способе орошения (дождевании, капельном поливе и др.) в теорию орошения нами введен новый показатель – максимальная оросительная норма (максинорма орошения). Ее численное значение для орошаемых культур в многолетнем ряду определялось для каждого года по норме полива, равной 0,1 мм. В качестве примера в табл. 1 приведены значения вычисленных за 1980–2015 гг. максинорм орошения для капусты среднепоздней, возделываемой на различающихся по гранулометрическому составу дерново-подзолистых почвах в центре Беларуси (в районе метеостанции Марьина Горка).

Полученные годовые максинормы орошения (см. табл. 1) далее ранжировались в убывающем

порядке, и в полученных рядах для каждого значения максинормы вычислялась обеспеченность (P, %) где m – порядковый номер члена убывающего ряда максинорм орошения; n – общее число членов ряда.

$$P = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} 100 \%, \quad (2)$$

В табл. 2 в качестве примера приведены рассчитанные указанным образом по данным табл. 1 обеспеченности максинорм орошения для капусты среднепоздней, возделываемой в районе метеостанции Марьина Горка.

По полученному многолетнему ряду максимальных оросительных норм (M_{max}) по стандартной методике строились кривые обеспеченности, по которым путем визуального съема с графиков устанавливались значения заданных проектных максинорм i -й обеспеченности.

Таблица 2 – Ранжированные максинормы орошения для капусты среднепоздней, возделываемой в районе метеостанции Марьина Горка

P, %	M _{max} , мм			P, %	M _{max} , мм		
	песок	супесь	суглинок		песок	супесь	суглинок
1,92	422	375	349	51,37	237	200	180
4,67	403	357	329	54,12	219	190	174
7,42	388	340	311	56,87	213	180	161
10,16	345	303	279	59,62	211	179	159
12,91	337	297	274	62,36	202	168	153
15,66	318	283	262	65,11	194	166	145
18,41	296	254	231	67,86	194	159	143
21,15	289	248	226	70,60	189	159	140
23,90	285	245	221	73,35	187	153	135
26,65	285	245	221	76,10	184	150	134
29,40	283	241	215	78,85	179	149	134
32,14	274	233	212	81,59	177	149	130
34,89	269	232	207	84,34	176	147	130
37,64	260	223	204	87,09	159	136	123
40,38	260	223	202	89,84	155	135	122
43,13	252	220	200	92,58	153	134	122
45,88	244	209	189	95,33	148	117	99
48,63	242	208	189	98,08	140	111	94

Поскольку в соответствии с ТКП [3] при проектировании оросительных систем расчет водопотребности орошаемой культуры ведется по проектной норме орошения обеспеченности 25 % (по убывающему ряду годовых оросительных норм), с полученных кривых обеспеченности (рис. 1) снимались значения максинорм орошения заданной обеспеченности. Например, для капусты среднепоздней, возделываемой в районе метеостанции Марьина Горка, они составили:

- на песчаных почвах $M_{\max 25\%} = 285$ мм;
- на супесчаных почвах $M_{\max 25\%} = 245$ мм;
- на суглинистых почвах $M_{\max 25\%} = 221$ мм.

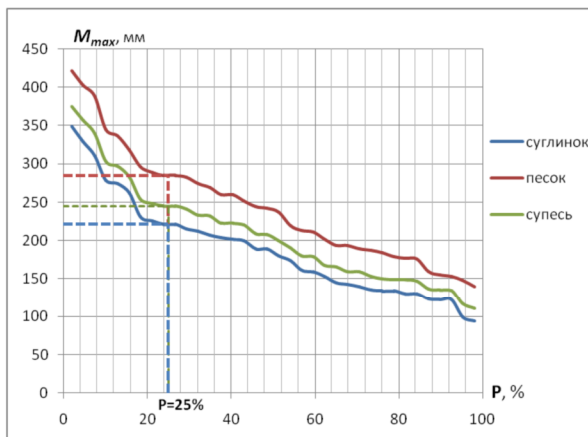


Рисунок 1 – Кривые обеспеченности максинорм орошения для капусты среднепоздней, возделываемой в центре Беларуси в районе метеостанции Марьина Горка

Определение технико-экономически обоснованной проектной нормы водопотребности заданной обеспеченности осуществлялось по максинорме орошения:

где $M_{пр.i}$ – технико-экономически обоснованная проектная норма водопотребности i -й обеспеченности,

$$M_{пр.i} = M_{maxi} \left(1 - a \frac{m_o}{m_{max}} \right), \quad (3)$$

вычисленная для орошаемой культуры по технико-экономически обоснованной норме полива; M_{maxi} – максимальная оросительная норма (максинорма) i -й обеспеченности для орошаемой культуры; a – коэффициент пропорциональности (безразмерная величина); m_o – технико-экономически обоснованная норма полива.

Значение коэффициента пропорциональности (a) для орошаемой культуры устанавливалось для каждого года из соотношения:

$$a = b \frac{m_{max}}{M_{max}}, \quad (4)$$

где b – эмпирический коэффициент (с размерностью «полив») в линейной функции, аппроксимирующей в электронных таблицах «Excel» график зависимости $M = f(m)$ для каждого календарного года в пределах от $M_{max} = f(m = 0,1\text{мм})$ до $M_{min} = f(m_{max})$ с привлечением линейной функции

$$M_{выч.} = M_{max} - bm, \quad (5)$$

где $M_{выч.}$ – оросительные нормы, вычисленные по поливным нормам, задаваемым в пределах от 0,1 мм до максимальной экологически допустимой нормы полива для данной почвы; M_{max} – максимальная оросительная норма (максинорма); m – последовательно задаваемые поливные нормы: $m = 0,1$ мм, $m = 2$ мм, $m = 5$ мм, $m = 10$ мм и далее через 5 мм до m_{max} .

Точность расчета по формуле (5) значений оросительных норм устанавливалась путем их сравнения с результатами водобалансового расчета с привлечением среднеквадратичного отклонения:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{выч.} - M_{в/б})^2}{n-1}}, \quad (6)$$

где δ – среднеквадратическое отклонение, мм; $M_{в/б}$ – сезонная оросительная норма, полученная водобалансовым расчетом при заданной норме полива, мм; $M_{выч.}$ – сезонная оросительная норма, вычисленная по формуле (5) при заданной норме полива, мм; n – число полученных расчетом по формуле (5) значений сезонных оросительных норм в оцениваемом ряду.

Значение эмпирического коэффициента (b) в каждом расчетном году уточнялось путем подбора (при незначительных изменениях коэффициента в сторону уменьшения и увеличения) до достижения по данным расчета по формуле (5) минимальной величины среднеквадратического отклонения, т.е. при $\delta \rightarrow \min$.

Из полученных в многолетнем ряду значений коэффициента вычислялась его среднеарифметическая величина ($b_{ср.}$), которая и являлась расчетной.

В результате установлено, что оросительную норму заданной обеспеченности можно определить с привлечением линейной функции (3), которая с учетом формулы (4) принимает окончательный вид:

$$M_{пр.i} = M_{maxi} - b_{ср} \cdot m_o, \quad (7)$$

где $M_{пр.i}$ – оросительная норма i -й обеспеченности; $M_{пр max i}$ – проектная максинорма i -й обеспеченности; $b_{ср}$ – уточненное среднеарифметическое значение эмпирического коэффициента за все годы, участвующие в расчете; m_o – поливная норма для орошаемой культуры, обоснованная технико-экономически с учетом экологических ограничений.

Результаты и обсуждение

При орошении разных культур доход от полива будет различным. Задача состоит в том, чтобы установить не только наиболее выгодный способ, но и тот режим орошения, при котором получаемый экономический эффект будет максимальным. Основным критерием экономической оценки обычно является размер полученного дохода (чистой прибыли).

Известно, что прибыль от орошения соответствует разности выручки от реализации прибавки урожая и себестоимости ее получения. В свою очередь, себестоимость дополнительной продукции растениеводства, получаемой благодаря орошению, состоит из двух групп производственных затрат: 1) затраты на уборку, доработку, транспортировку, хранение и реализацию прибавки урожая от орошения; 2) затраты на эксплуатацию оросительной системы и проведение поливов.

Затраты на уборку, доработку, транспортировку, хранение и реализацию дополнительной продукции растениеводства устанавливаются при определении плановой либо проектной экономической эффективности – на основе нормативных материалов, содержащихся в типовых технологических картах по возделыванию культур, а при определении фактической эффективности – на основе соответствующих средних затрат, фактически складывающихся в хозяйстве. Причем известно, что затраты на производство дополнительной продукции в расчете на единицу орошаемой площади изменяются прямо пропорционально величине прибавки урожая от орошения.

Выполненные нами экономические расчеты показали, что наиболее выгодное соотношение между прибавкой урожая от полива и суммарными затратами на ее получение (орошение, уборка, доработка,

транспортировка, хранение и реализация прибавки урожая), при которых достигается максимальная прибыль (дополнительный чистый доход), обеспечивается при проведении полива технико-экономически обоснованной нормой, которая определяется по формуле [1]:

$$m_o = \frac{k(W_{HB} - W_{B3})^2}{\eta(c-s)U_{пл}} \left(c_w + \frac{c_{п}}{Q} \right), \quad (8)$$

где m_o – оптимальная для данной культуры поливная норма, обеспечивающая максимальный дополнительный чистый доход (максимальную прибыль) на рассматриваемой оросительной системе, м³/га-полив; k – коэффициент, учитывающий гранулометрический состав орошаемых почв (для овощных культур, возделываемых на песчаных почвах, $k = 1,60$; на супесчаных почвах $k = 1,25$; на суглинистых почвах $k = 1,15$); W_{HB} – влагозапасы в корнеобитаемом слое орошаемой культуры (в среднем принимается слой 0–50 см), соответствующие наименьшей влагоемкости, м³/га; W_{B3} – влагозапасы завядания в расчетном (корнеобитаемом) слое почвы, м³/га; η – коэффициент полезного действия оросительной системы, учитывающий потери поливной воды при проведении орошения (от водоисточника до поля), зависит от способа орошения и конструкции оросительной системы; c – цена реализации продукции, руб./т; s – сельскохозяйственные издержки, связанные с получением прибавки урожая от орошения (на уборку, транспортировку, доработку, хранение и реализацию прибавки), руб./т; $U_{пл}$ – планируемая урожайность орошаемой культуры, которую можно получить при оптимальном водном режиме почвы в средний по погодным условиям год, т/га; c_w – стоимость воды, забираемой из водоисточника для проведения орошения, руб./м³; $c_{п}$ – суммарные затраты средств на 1 час работы всей оросительной системы (электроэнергия, топливно-смазочные материалы, заработная плата обслуживающему персоналу, включая насосная станция и оросительная техника, затраты на ремонты, техническое обслуживание оросительной системы во время полива, со всеми налогами), руб./ч; Q – расход воды, подаваемый в оросительную систему из водоисточника, м³/ч.

Для подтверждения соответствия полученной по формуле (8) норме полива своему оптимуму в табл. 3 приведены результаты расчета чистой при-

были, получаемой при орошении моркови разными поливными нормами [4]. Расчет наглядно демонстрирует получение максимальной чистой прибыли при проведении орошения моркови именно оптимальной (экономически обоснованной) поливной нормой как на системе дождевания с дождевальными машинами «Reinke», так и на системе капельного орошения многолетними трубками, уложенными на глубине 30–35 см. Как видим, несмотря на растущую прибавку урожая при ужесточении режима орошения путем снижения поливных норм и увеличения частоты поливов, сельхозиздержки и затраты на проведение орошения повышаются более быстрыми темпами.

В результате анализа водобалансовых расчетов с привлечением метеоданных 42-х метеостанций Беларуси за период 1980–2015 гг. установлено, что численные коэффициенты ($b_{ср.}$) изменяются по почвам. При этом с повышением водоудерживающей способности почвы величина данного коэффициента уменьшается. Например, для овощных культур, возделываемых на песчаных почвах, $b_{ср.} = 3,2$; на супесчаных – $b_{ср.} = 2,5$; на суглинистых – $b_{ср.} = 2,3$. Закономерность (7) справедлива для овощных культур в диапазоне поливных норм (1), который охватывает весь спектр норм экономически обоснованного и экологически безопасного орошения.

На рис. 2 в качестве примера приведены графики изменения экономических показателей возде-

лывания моркови на системе капельного орошения многолетними трубками, уложенными на глубине 30–35 см.

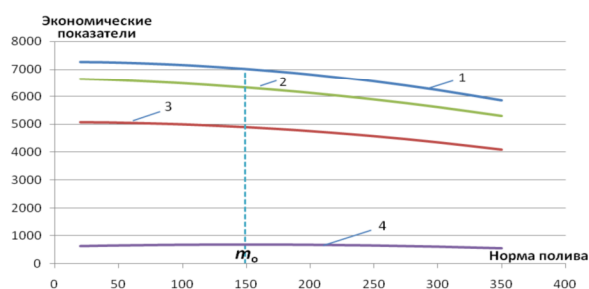


Рис. 2 – Зависимость от нормы полива ($m^3/га$) экономических показателей возделывания моркови на системе капельного орошения многолетними трубками, уложенными на глубину 30–35 см:

1 – выручка от реализации прибавки урожая от орошения, долл./га; 2 – суммарные затраты на получение прибавки урожая (сельхозиздержки на прибавку урожая и затраты на орошение), долл./га; 3 – сельскохозяйственные издержки на получение прибавки урожая, долл./га; 4 – чистая прибыль, долл./га.

Апробация формулы (7) выполнялась по данным метеостанций, расположенных в северной, центральной и южной гидролого-климатической зонах Беларуси. Ее результаты, полученные в рамках экологически безопасных норм полива, показали достаточно высокую точность вычислений оросительных норм как для орошения дождеванием, так и для капельного полива. В среднем за 1980–2015 гг. среднеквадратические отклонения (δ , мм), вычисленные по зависимости (7) и рассчитанные по водному балансу

Таблица 3 – Расчет чистой прибыли, получаемой при разных режимах орошения моркови, долл./га

Способ орошения	Норма полива, $m^3/га$	Выручка от реализации прибавки урожая от орошения	Сельскохозяйственные издержки на получение прибавки урожая	Затраты на орошение	Чистый доход
Дождевание	100	4180	2926	1089	165
	150	4061	2843	1040	178
	170	4000	2800	1021	179
	200	3894	2726	992	176
	250	3680	2576	943	161
Капельное орошение с трубками на глубине	50	7239	5067	1515	657
	100	7152	5006	1463	683
	149	7011	4907	1413	691
	200	6804	4763	1360	681
	250	6543	4580	1308	655

оросительных норм, составили для капусты 5,8... 9,5 мм, для моркови – 6,0...7,9 мм, для свеклы столовой – 6,4...7,0 мм, что не превышает 5 % от максинорм орошения для данных культур.

Таким образом, в соответствии с результатами исследований для овощных культур (капуста, морковь, свекла столовая), возделываемых в Беларуси, в качестве расчетных для определения технико-экономически обоснованных норм водопотребности при дождевании можно утвердить следующие зависимости:

$$- \text{ для песчаных почв } M_D = M_{max} - 3,2 m_o, \quad (9)$$

$$- \text{ для супесчаных почв } M_D = M_{max} - 2,5 m_o, \quad (10)$$

$$- \text{ для суглинистых почв } M_D = M_{max} - 2,3 m_o, \quad (11)$$

где M_D – технико-экономически обоснованные проектные нормы водопотребности заданной обеспеченности при дождевании; M_{max} – максимальные оросительные нормы (максинормы) заданной обеспеченности; m_o – поливные нормы для орошаемых культур, обоснованные технико-экономически (8) с учетом экологических ограничений (1).

При капельном поливе в качестве расчетных для определения технико-экономически обоснованных норм водопотребности будут следующие зависимости:

$$- \text{ для песчаных почв } M_K = K_o(M_{max} - 3,2 m_o), \quad (12)$$

$$- \text{ для супесчаных почв } M_K = K_o(M_{max} - 2,5 m_o), \quad (13)$$

$$- \text{ для суглинистых почв } M_K = K_o(M_{max} - 2,3 m_o), \quad (14)$$

где M_K – технико-экономически обоснованные проектные нормы водопотребности заданной обеспеченности при капельном орошении; K_o – отношение площади, увлажняемой капельным поливом, к площади, занимаемой орошаемой культурой:

где F_o – площадь, увлажняемая капельным поливом; F_c – площадь, занимаемая орошаемой культурой.

Величина коэффициента K_o всегда меньше единицы и зависит от конструкции системы капельного полива: $0 < K_o < 1$.

$$K_o = \frac{F_o}{F_c}, \quad (15)$$

На рис. 3 приведены стандартные графики, демонстрирующие изменение норм орошения при разных нормах полива на примере капусты средне-

поздней, возделываемой в районе метеостанции Марьино Горка.

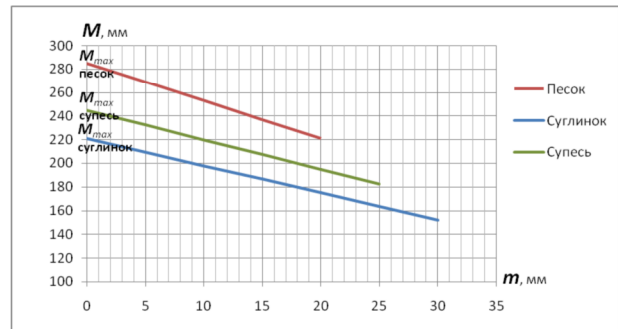


Рисунок 3 – Изменение норм водопотребности при изменении норм полива при капельном орошении и дождевании капусты среднепоздней, возделываемой на разных почвах в районе метеостанции Марьино Горка

Таким образом, в соответствии с результатами исследований можем утверждать, что технико-экономически обоснованные нормы водопотребности в проектах систем капельного полива и дождевания можно рассчитывать по максинормам орошения с использованием линейной зависимости вида (7), в которой численные коэффициенты (b_{cp}) постоянны для всех овощных культур, но изменяются по почвам.

Заключение

Анализ данных водобалансовых расчетов за многолетний период (1980–2015 гг.) с привлечением данных 42-х метеостанций, расположенных в разных гидролого-климатических зонах Беларуси, показал, что при росте поливных норм нормы водопотребности снижаются. Установлено, что технико-экономически обоснованные нормы водопотребности в проектах капельного полива и дождевания можно рассчитывать по максинормам орошения с использованием линейной зависимости вида (7), в которой численные коэффициенты (b_{cp}) постоянны для всех овощных культур, но изменяются по почвам (для песчаных почв $b_{cp} = 3,2$, супесчаных почв $b_{cp} = 2,5$ и для суглинистых почв $b_{cp} = 2,3$). Данная закономерность справедлива в диапазоне поливных норм, который охватывает весь спектр экономически обоснованного и экологически безопасного капельного орошения и дождевания на всей территории Беларуси.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лихацевич, А. П. Оптимизация режима орошения сельскохозяйственных культур / А. П. Лихацевич // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2014. – № 4. – С. 46-51.
2. Лихацевич, А. П. Зависимость норм орошения от поливных норм / А. П. Лихацевич, Г. В. Латушкина, И. В. Бурина // Перспективи інноваційно-інвестиційного розвитку водного господарства : збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції. – Херсон : Херсонський державний аграрний університет, 2017. – С. 13-17.
3. Оросительные системы. Правила проектирования: ТКП 45-3.04.2009 (02250). – Введ. 29.12.2009. – Минск, 2010. – 74 с.
4. Орошаемое плодовоовощеводство : учеб. пособие для студентов высших учебных заведений по специальности «Плодовоовощеводство» / А. П. Лихацевич, М. Г. Голченко ; под ред. А. П. Лихацевича. – Минск : ИВЦ Минфина, 2017. – 287 с.

Поступила 07.12.2018