

• МЕЛИОРАЦИЯ •

УДК 631.67

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫЙ РЕЖИМ ОРОШЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

А. П. Лихацевич, доктор технических наук

Г. В. Латушкина, кандидат технических наук

РУП «Институт мелиорации», г. Минск, Беларусь

Аннотация

Для установления оптимального баланса в «доходах-расходах» при орошении сельскохозяйственных культур разработан алгоритм определения технико-экономически обоснованной поливной нормы, обеспечивающей получение максимальной прибыли с учетом затрат на поливы и стоимости прибавок урожаев от орошения. Техно-экономически обоснованный режим орошения позволяет планировать поливы и проводить их нормой, дающей максимальный экономический эффект.

Ключевые слова: режим орошения, поливная норма, норма орошения, затраты на поливы, прибыль.

Abstract

A. P. Likhatchevich, G. V. Latushkina

TECHNICALLY AND ECONOMICALLY JUSTIFIED REGIME FOR IRRIGATION OF AGRICULTURAL CROPS

To establish the optimal balance in «income-costs» during irrigation of agricultural crops, an algorithm has been developed for determining a techno-economically substantiated irrigation rate that ensures maximum profit, taking into account the cost of irrigation and the cost of crop increases from irrigation. A techno-economically sound irrigation regime allows planning and conducting irrigation at a rate that gives the maximum economic effect.

Keywords: irrigation regime, irrigation norm, irrigation rate, irrigation costs, profit.

Введение

Основным элементом режима орошения является поливная норма. От ее величины зависят частота поливов в конкретном году, общее количество воды, поданной для орошения культуры (оросительная норма), что в конечном итоге определяет затраты на орошение. Многочисленные исследования, проведенные в разных природно-климатических зонах, показали, что с повышением увлажненности почвы пропорционально растет урожайность орошаемой культуры, если при этом отсутствует переувлажнение и обеспечен свободный воздухообмен в корнеобитаемой зоне.

Результаты исследований и их обсуждение

Основным критерием экономической оценки применяемого в конкретном хозяйстве режима орошения является размер чистой

Более высокая влагообеспеченность растений при орошении достигается за счет проведения более частых поливов меньшими нормами. При этом растут затраты на орошение. Для установления оптимального баланса в «доходах-расходах» нами разработан алгоритм определения технико-экономически обоснованных поливных норм, обеспечивающих получение максимальной прибыли с учетом затрат на поливы и стоимости прибавок урожаев от орошения, который позволяет планировать поливы нормой, дающей максимальный эффект.

прибыли от данного мелиоративного мероприятия. Прибыль от орошения соответствует разности выручки от реализации прибавки

урожая от орошения и себестоимости ее получения. В зоне неустойчивого естественного увлажнения, к которой относится территория Беларуси, себестоимость продукции растениеводства, получаемой при орошении, от себестоимости той же продукции, получаемой без орошения, отличается только двумя группами затрат: 1) затраты на уборку, доработку, транспортировку, хранение и реализацию прибавки урожая от орошения; 2) затраты на содержание оросительной системы и на проведение поливов.

В качестве основы аналитической модели получения дополнительного чистого дохода с единицы площади, определяемого режимом орошения, используется равенство [1]:

$$D(\Delta Y_i) = C(\Delta Y_i) - [R(\Delta Y_i) + R(O_i)], \quad (1)$$

где $D(\Delta Y_i)$ – дополнительный чистый доход, полученный при i -м режиме орошения сельскохозяйственной культуры в расчете на единицу орошаемой площади, руб./га; $C(\Delta Y_i)$ – выручка от реализации дополнительной продукции растениеводства, полученной при i -м режиме орошения в расчете на единицу орошаемой площади, руб./га; $R(\Delta Y_i)$ – затраты на уборку, доработку, транспортировку, хранение и реализацию прибавки урожая, полученной при i -м режиме орошения в расчете на единицу орошаемой площади, руб./га; $R(O_i)$ – затраты на эксплуатацию оросительной системы при i -м режиме орошения в расчете на единицу орошаемой площади, руб./га.

Выручка от реализации дополнительной продукции растениеводства от орошения прямо пропорциональна величине прибавки урожайности (ΔY_i)

$$C(\Delta Y_i) = c \Delta Y_i, \quad (2)$$

где c – цена реализации продукции растениеводства, руб./т;

ΔY_i – прибавка урожая, полученная при i -м режиме орошения.

Прибавка урожая от орошения (ΔY_i , т/га) определяется как разность

$$\Delta Y_i = Y_{Mi} - Y, \quad (3)$$

где Y_{Mi} – урожайность культуры при i -м режиме орошения, т/га;

Y – урожайность культуры, полученный при естественной влагообеспеченности (при отсутствии орошения), т/га.

Форма связи урожая с величиной любого регулируемого фактора известна. При орошении

и прочих регламентных урожаеобразующих факторах урожайность сельскохозяйственной культуры зависит только от уровня увлажнения корнеобитаемого слоя почвы [2–4]:

$$Y_{Mi} = Y_m \left[1 - \left(\frac{W_{HB} - W_{Mi}}{W_{HB} - W_{B3}} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где Y_m – планируемая максимальная урожайность культуры при оптимальном водном режиме почвы, т/га; W_{HB} – оптимальные влагозапасы в корнеобитаемом слое почвы, соответствующие наименьшей влагоемкости, м³/га; W_{Mi} – средние за вегетацию влагозапасы почвы при i -м режиме орошения, м³/га; W_{B3} – влагозапасы завядания, м³/га.

Урожайность при отсутствии орошения по аналогии с (4) равна

$$Y = Y_m \left[1 - \left(\frac{W_{HB} - W}{W_{HB} - W_{B3}} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где W – средний за вегетацию уровень влагозапасов в корнеобитаемом слое почвы при отсутствии орошения, м³/га.

Известно, что

$$W_{Mi} = W_{HB} - a m_i, \quad (6)$$

где a – показатель, зависящий от режима и технологии орошения, полив; m_i – норма полива при i -м режиме орошения, м³/(га · полив).

Согласно (3), с учетом (4)–(6), прибавка урожая от орошения составит

$$\Delta Y_i = \frac{Y_m}{(W_{HB} - W_{B3})^2} \left[(W_{HB} - W)^2 - a^2 m_i^2 \right]. \quad (7)$$

Сельскохозяйственные затраты на уборку, доработку, транспортировку, хранение и реализацию прибавки урожая прямо пропорциональны величине этой прибавки [1]:

$$R(\Delta Y_i) = r \Delta Y_i, \quad (8)$$

где r – затраты на уборку, доработку, транспортировку, хранение и реализацию единицы прибавки урожая, полученной при i -м режиме орошения культуры, руб./т; ΔY_i – прибавка урожайности от i -го режима орошения культуры, т/га.

Затраты на эксплуатацию оросительной системы состоят из постоянных ежегодных платежей на содержание оросительной системы, не зависящих от режима орошения (амортизационные расходы, затраты на содержание и техническое обслуживание оросительной

системы – $R(OC)$), и переменных затрат, зависящих от режима орошения – $R(M_i)$:

$$R(O_i) = R(OC) + R(M_i). \quad (9)$$

Затраты на проведение орошения зависят от конструкции оросительной системы, стоимости поливной воды, суммарных затрат на работу всей оросительной системы. Для единицы орошаемой площади эти затраты составят

$$R(M_i) = \frac{M_i}{\eta} \left(c_w + \beta \frac{C_{\Pi}}{Q} \right), \quad (10)$$

где M_i – i -я оросительная норма (нетто), м³/га; C_w – стоимость воды, забираемой из водоисточника для проведения орошения при платном водопользовании, руб./м³; η – коэффициент полезного действия оросительной системы, учитывающий все потери поливной воды при орошении. При поливе дождеванием потери воды в зависимости от условий проведения полива составляют 0,94–0,85 %; C_{Π} – суммарные затраты средств на 1 час работы всей оросительной системы (электроэнергия, топливно-смазочные материалы, заработная плата обслуживающему персоналу, включая насосную станцию и оросительную технику, затраты на ремонты, техническое обслуживание оросительной системы во время полива, со всеми налогами), руб./ч; Q – расход воды, подаваемый насосной станцией в напорный трубопровод из водоисточника, м³/ч; β – норматив превышения суммарного времени, затраченного на полив, техническое обслуживание поливной техники и ремонты, над временем, затраченным только на подачу оросительной воды насосной станцией.

Результаты расчета водного режима почвы с привлечением метеоданных 42 метеостанций Беларуси за период 1980–2015 г. показали, что в диапазоне поливных норм от минимальных технологических (для заданного поливного устройства) до максимальных (m_{max}) справедлива зависимость

$$M_i = M_{max} - b m_i, \quad (11)$$

где M_{max} – максимальная оросительная норма при поддержании почвенных влагозапасов постоянно в течение оросительного периода на уровне наименьшей влагоемкости, м³/га; b – эмпирический коэффициент пропорциональности в линейной функции, аппроксимирующий график зависимости $M = f(m)$ для

каждого календарного года в пределах от M_{min} до $M_{max} = f(m_{max})$. Здесь

$$M_{max} = \lim M \Big|_{m \rightarrow 0}. \quad (12)$$

Эмпирические коэффициенты b изменяются по почвам, причем с повышением вододерживающей способности почвы величина данного коэффициента уменьшается. Например, для овощных культур, возделываемых на песчаных почвах, $b = 3,2$; на супесчаных почвах $b = 2,5$; на суглинистых почвах $b = 2,3$ [6]. Закономерность (11) справедлива для овощных культур в диапазоне поливных норм, который, согласно (12), охватывает весь спектр норм дождевания и капельного полива:

$$0 < m \leq m_{max},$$

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

Максимальные экологически обоснованные поливные нормы устанавливались по типам почв согласно действующему нормативу [5]:

- для песчаных почв $m_{max} = 20$ мм,
- для супесчаных почв $m_{max} = 25$ мм,
- для суглинистых почв $m_{max} = 30$ мм.

Раскрывая исходное уравнение (1) с учетом полученных значений (2)–(11), получим

$$D(\Delta Y_i) = \frac{(c-r)Y_m}{(W_{HB} - W_{B3})} \left[(W_{HB} - W)^2 - a^2 m_i^2 \right] - \left[R(OC) + \frac{M_{max} - b m_i}{\eta} \left(c_w + \beta \frac{C_{\Pi}}{Q} \right) \right]. \quad (13)$$

Стандартная целевая функция получения максимального чистого дохода имеет вид

$$D(\Delta Y_i) \rightarrow \max \text{ или } \max D(\Delta Y_i) = \max \{ C(\Delta Y_i) - [R(\Delta Y_i) + R(O_i)] \}. \quad (14)$$

Уравнения (1)–(11) представляют собой непрерывные функции. Максимум непрерывной функции (13) на замкнутом ограниченном множестве будет иметь место при выполнении условия первого рода:

$$\frac{d}{dm} [D(\Delta Y_i)] \Big|_{m=m_0} = 0, \quad (15)$$

где m_0 – оптимальная поливная норма, обеспечивающая максимальный дополнительный чистый доход, м³/га полив).

Причем достаточно, чтобы

$$\frac{d^2}{dm^2} [D(\Delta Y_i)] \Big|_{m=m_0} < 0. \quad (16)$$

Максимизация дополнительного чистого дохода (13), определяемого режимом орошения, справедлива, если величина дохода больше нуля

$$D(\Delta Y_i) > 0. \quad (17)$$

Неравенство (17) является экономическим ограничением целевой функции (14).

Поскольку постоянные ежегодные затраты на содержание и техническое обслуживание оросительной системы не зависят от применяемого режима орошения и величины поливной нормы, в соответствии с (13, 15) имеем

$$\frac{d}{dm} [D(\Delta Y_i)] = -\frac{2a^2(c-r)Y_m}{(W_{\text{НВ}} - W_{\text{ВЗ}})^2} m_0 + \frac{b}{\eta} \left(c_w + \beta \frac{C_{\text{П}}}{Q} \right) = 0. \quad (18)$$

Проверим выполнение ограничения (16). Из (18) следует

$$\frac{d^2}{dm^2} [D(\Delta Y_i)] = -\frac{2a^2(c-r)Y_m}{(W_{\text{НВ}} - W_{\text{ВЗ}})^2} < 0. \quad (19)$$

Полученное отрицательное значение второй производной (19) подтверждает выполнение требования (16). Следовательно, функция (13) имеет максимум, соответствующий наибольшему дополнительному чистому доходу.

Приравнявая к нулю первую производную дополнительного чистого дохода (18), получаем зависимость для определения технико-экономически обоснованной поливной нормы при орошении в открытом грунте:

$$m_0 = \frac{b(W_{\text{НВ}} - W_{\text{ВЗ}})^2}{2a^2\eta(c-r)Y_m} \left(c_w + \beta \frac{C_{\text{П}}}{Q} \right). \quad (20)$$

При дождевании по общепринятой технологии коэффициент $a = 0,75$.

В формуле (20) присутствует соотношение $(\beta C_{\text{П}}/Q)$, определение составляющих которого может вызвать затруднения. Его можно трансформировать, используя тождество

$$\frac{\beta C_{\text{П}}}{Q} \equiv \frac{\beta C_{\text{П}} T_{\text{ср}} F}{Q T_{\text{ср}} F}, \quad (21)$$

где $T_{\text{ср}}$ – продолжительность работы насосной станции в средний год, (час или сут.)/сез.; F – орошаемая площадь, га.

Разделим соотношение (21) на две части. В числителе выделим удельные затраты на орошение

$$\frac{\beta C_{\text{П}} T_{\text{ср}}}{F} = Z_{\text{ср}}, \quad (22)$$

где $Z_{\text{ср}}$ – суммарные затраты на орошение единицы площади в средний год (электроэнергия, топливно-смазочные материалы, заработная плата обслуживающему персоналу, включая насосную станцию и оросительную технику, затраты на ремонты, техническое обслуживание оросительной системы во время полива, со всеми налогами), руб./га.

В знаменателе получим количество воды, забираемой насосной станцией из водоисточника для орошения (оросительную норму брутто),

$$\frac{QT_{\text{ср}}}{F} = M_{\text{ср}}, \quad (23)$$

где $M_{\text{ср}}$ – норма орошения (брутто) в средний год, м³/га.

Поскольку суммарные затраты на орошение единицы площади пропорциональны объему воды, забранной из водоисточника для полива, их среднелетние и фактические значения за конкретный год можно уравнивать:

$$\frac{Z_{\text{ср}}}{M_{\text{ср}}} \approx \frac{Z}{M}, \quad (24)$$

где Z – суммарные затраты на орошение в конкретный год (электроэнергия, топливно-смазочные материалы, заработная плата обслуживающему персоналу, включая насосную станцию и оросительную технику, затраты на ремонты, техническое обслуживание оросительной системы во время полива, со всеми налогами), руб./га; M – объем воды, забранной из водоисточника для орошения (норма орошения брутто) в тот же год, м³/га.

Из (20) с учетом зависимостей (21)–(24) получим приближенную формулу для расчета технико-экономически обоснованной поливной нормы при орошении в открытом грунте

$$m_0 = \frac{b(W_{\text{НВ}} - W_{\text{ВЗ}})^2}{2a^2\eta(c-r)Y_m} \left(c_w + \frac{Z}{M} \right). \quad (25)$$

Формула (25) повторяет формулу (20), но в более простом и более удобном для использования виде. И суммарные затраты на орошение в конкретном году, и норму орошения (брутто) в том же году можно получить из бухгалтерской отчетности хозяйства.

Из вышеизложенного следует, что при определении величины оптимальной поливной нормы для орошаемой сельскохозяйственной культуры в конкретном хозяйстве необходимо знать следующие технико-экономические показатели:

- цену реализации продукции, руб./т;
 - удельные затраты на уборку, транспортировку, доработку, хранение и реализацию орошаемой сельскохозяйственной культуры, руб./га;
 - планируемую урожайность орошаемой культуры, т/га;
 - коэффициент полезного действия оросительной системы;
 - расход воды, который подается насосной станцией в напорный трубопровод из водосточника, м³/ч;
 - стоимость воды для орошения, руб./м³;
 - суммарные затраты средств на 1 час работы оросительной системы, руб./ч (электроэнергия, топливно-смазочные материалы, заработная плата обслуживающему персоналу, работающему в том числе на насосной станции и оросительной технике, затраты на ремонты, техническое обслуживание оросительной системы во время полива, со всеми налогами, накладные расходы и плановые накопления) либо суммарные затраты на орошение в конкретный год, руб./га и норма орошения (брутто) в тот же год, м³/га;
 - водно-физические свойства (наименьшая влагоемкость и влажность устойчивого завядания) орошаемой почвы.

Для примера в табл. 1 выполнен расчет оптимальных технико-экономически обоснованных поливных норм по среднемноголетним показателям для ряда сельскохозяйственных культур (капуста среднепоздних сортов, морковь столовая, лук репчатый и картофель), возделываемых на дерново-подзолистых суглинистых почвах, подстилаемых легким суглинком. Орошение проводится мобильной шланговой дождевальнoй машиной ПДМ-2500, агрегируемой с трактором МТЗ-82. Для забора воды из открытого водосточника используется дизель-насосная установка.

Влагозапасы в корнеобитаемом слое (0–50 см) для дерново-подзолистых суглинистых почв при насыщении до наименьшей влагоемкости ($W_{\text{нв}}$) равны 1600 м³/га, влагозапасы устойчивого завядания $W_{\text{вз}}$ соответствуют 500 м³/га (это минимальные, практически недоступные для растений влагозапасы почвы в расчетном слое). Затраты на уборку, доработку, транспортировку и реализацию продукции растениеводства могут определяться на основе нормативных материалов, содержащихся в типовых технологических картах или на основе соответствующих средних затрат, фактически

складывающихся в хозяйстве. Учтено, что водопользование для сельхозпредприятий в настоящее время бесплатное.

Приводим пример расчета m_0 по зависимости (20) для лука репчатого при планируемой урожайности 60 т/га

$$= \frac{2,3(1600 - 500)}{2 \cdot 0,75 \cdot 0,85 \cdot (550 - 40) \cdot 60} \cdot \left(0 + 1,25 \frac{54}{50}\right) = 156 \text{ м}^3/\text{га}.$$

В табл. 2 представлены результаты расчета оптимальных технико-экономически обоснованных поливных норм (m_0) для капусты среднепоздних сортов, моркови столовой, лука репчатого и картофеля, возделываемых на дерново-подзолистых легкосуглинистых почвах для трех уровней планирования урожайности.

Как видно из данных табл. 2, для получения максимальной прибыли предполагается повышение урожайности сельскохозяйственных культур путем ужесточения режима орошения при снижении поливных норм и, соответственно, уменьшении межполивных интервалов и увеличении числа поливов.

Для подтверждения соответствия полученной по формуле (20) нормы полива своему оптимуму в табл. 3 приведены результаты расчета чистой прибыли, получаемой при орошении моркови разными поливными нормами. Графики, построенные по данным таблицы, при монотонно убывающих значениях выручки от реализации прибавки урожая от орошения, сельхозиздержек на получение прибавки урожая и затрат на орошение, наглядно демонстрируют зависимость чистой прибыли от нормы полива и достижение максимальной величины при оптимальной поливной норме.

Для моркови при планируемом урожае 75 т/га при проведении дождевания машиной *Reinke* (табл. 3, рисунок) наибольшая прибыль может быть получена при норме полива 170 ± 10 м³/га. Несмотря на растущую прибавку урожая при ужесточении режима орошения путем снижения поливных норм и увеличения числа поливов, соответствующее повышение сельскохозяйственных издержек и затрат на проведение орошения идет более быстрыми темпами.

Таблица 1. **Хозяйственные показатели сельскохозяйственных культур, возделываемых на орошаемых землях**

№ п/п	Показатель	Ед. изм.	Орошаемая культура			
			капуста поздняя и среднепоздняя	морковь столовая	лук репчатый	картофель
1	планируемая урожайность	т/га	75	60	45	60
2	планируемая прибавка урожая от орошения	т/га	36	23	15	30
3	цена реализации продукции	руб./т	400	420	550	500
4	затраты на уборку, транспортировку, хранение, реализацию	руб./т	52	47	40	50
5	затраты на поливы, обслуживание и ремонт оросительной системы, плановые накопления	руб./ч	54	54	54	54
6	оросительная норма	м ³ /га	1200	900	500	1150
7	расход дождевальнoй машины ПДМ-2500	м ³ /ч	50	50	50	50
8	коэффициент α	–	0,75	0,75	0,75	0,75
9	коэффициент β	–	1,25	1,25	1,25	1,25

Таблица 2. **Результаты расчета оптимальных технико-экономически обоснованных поливных норм при поливе дождеванием, м³/га**

№ п/п	Орошаемая сельскохозяйственная культура	Оптимальная технико-экономически обоснованная поливная норма при планируемой урожайности, м ³ /га		
		75 т/га	60 т/га	45 т/га
1	капуста среднепоздних сортов	180	225	300
2	морковь столовая	170	210	280
3	лук репчатый	125	160	205
4	картофель	140	170	230

Таблица 3. **Расчет чистой прибыли, получаемой при разных режимах дождевания моркови [6]**

Норма полива, м ³ /га	Выручка от реализации прибавки урожая от орошения, долл. США/га	Сельскохозяйственные издержки на получение прибавки урожая, долл. США/га	Затраты на орошение, долл. США/га	Чистый доход, долл. США/га
100	4180	2926	1089	165
150	4061	2843	1040	178
170	4000	2800	1021	179
200	3894	2726	992	177
250	3680	2576	943	161

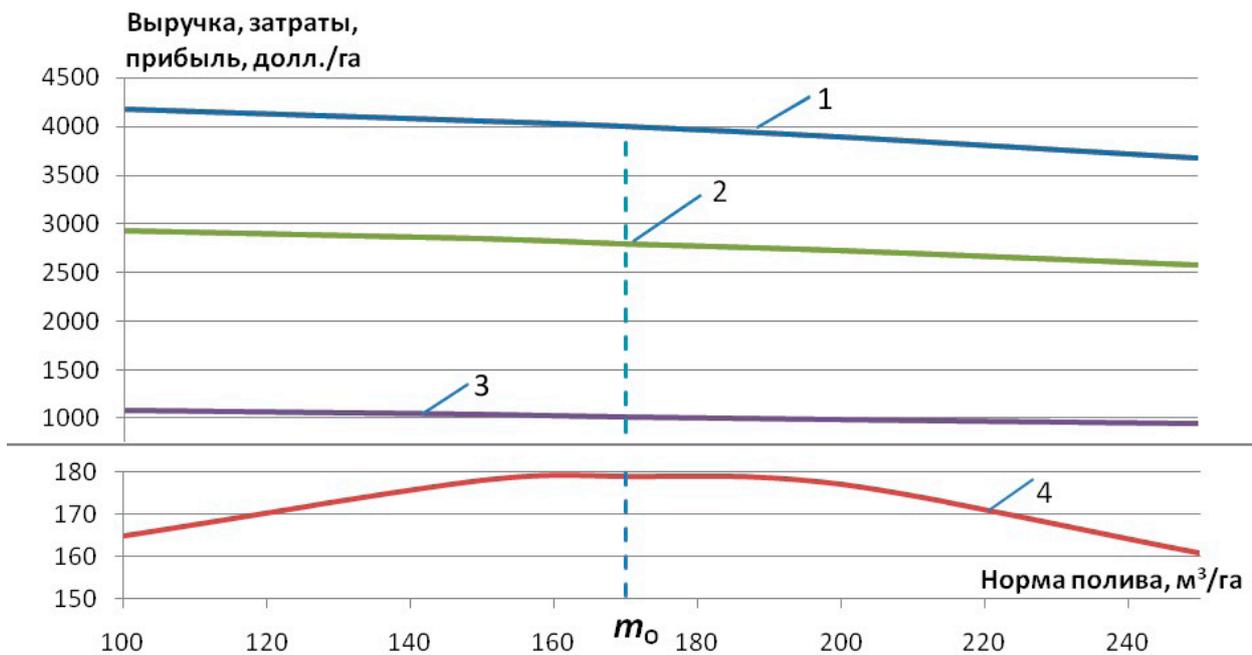


Рисунок. Зависимость от нормы полива экономических показателей возделывания моркови:

- 1 – выручка от реализации прибавки урожая от орошения, долл. США/га;
- 2 – сельскохозяйственные издержки на получение прибавки урожая, долл. США/га;
- 3 – затраты на проведение орошения, долл. США/га;
- 4 – чистая прибыль от возделывания моркови при разных режимах орошения, долл. США/га

Заключение

Технико-экономически обоснованный режим орошения сельскохозяйственных культур обеспечивает согласование величины поливной нормы с прибылью, получаемой от реализации прибавки урожая от орошения. Его целью является достижение наиболее выгодного баланса между доходами и расходами в орошаемом земледелии. Величина поливной нормы и предполивные влагозапасы устанавливаются в каждом конкретном хозяйстве с учетом достигнутых технико-экономических показателей так, чтобы чистая прибыль от оро-

шения была максимальной. В случае если технико-экономически обоснованная (оптимальная) поливная норма превысит экологический предел для орошаемой почвы (согласно действующему нормативу [5]), полив проводится экологически допустимой нормой. Этим соблюдается приоритет экологии перед экономикой.

Если же оптимальная поливная норма будет меньше технологического минимума для дождевальными машин, следует переориентироваться на капельное орошение.

Библиографический список

1. Лыч, Г. М. Методические указания по определению экономической эффективности капитальных вложений в орошение земель в Нечерноземной зоне / Г. М. Лыч, А. Е. Жуков. – Минск : БелНИИМиВХ, 1974. – 47 с.
2. Механизация полива : справочник / Б. Г. Штепа [и др.]. – М. : Агропромиздат, 1990. – С. 31–37.
3. Методические рекомендации по определению зависимости урожайность – влагообеспеченность на основе полевого опыта в условиях орошения / Д. Б. Циприс [и др.]. – Л. : СевНИИГиМ, 1988. – 50 с.

4. Лихацевич, А. П. Анализ результатов агрономических опытов с использованием обобщенной математической модели / А. П. Лихацевич // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2017. – № 2. – С. 68–81.

5. Оросительные системы. Правила проектирования : ТКП/ПР 45–3.04.2009 (02250). – Введ. 29.12.2009. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2010. – 74 с.

6. Лихацевич, А. П. Определение технико-экономически обоснованных норм водопотребности при дождевании и капельном орошении овощных культур в условиях открытого грунта / А. П. Лихацевич, Г. В. Латушкина // Мелиорация. – 2018. – № 4 (86). – С. 16–23.

Поступила 18 февраля 2021 г.