

УДК 631.67

*А. П. ЛИХАЦЕВИЧ*

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ОРОШЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

*Институт мелиорации, Минск, Республика Беларусь, e-mail: niimel@mail.ru*

*(Поступила в редакцию 20.08.2014)*

**Введение.** Проблема оптимизации режима орошения в условиях неустойчивой естественной влагообеспеченности сельскохозяйственных культур исследовалась в Республике Беларусь в начале 90-х гг. прошедшего столетия [1]. При этом считалось, что границы, в которых следует с помощью орошения поддерживать почвенные влагозапасы в течение вегетационного периода, заданы заранее и не требуют экономического обоснования. На этой основе была разработана достаточно простая модель оптимизации, позволившая установить величину нормы полива, при которой расходуется минимум ресурсов на орошение [2].

Вместе с тем предложенная методика оптимизации режима орошения не учитывает экономику возделывания орошаемых сельскохозяйственных культур, ориентируя орошение только на экономию эксплуатационных затрат, что весьма ограничивает возможные экономические выгоды в орошаемом земледелии. Поэтому значительный интерес представляет дальнейшее совершенствование методики эколого-экономической оптимизации режима орошения с тем, чтобы в полной мере учесть все возможные резервы и установить показатели, обеспечивающие наибольшую экономическую эффективность при производстве орошаемой растениеводческой продукции.

**Обоснование алгоритма экономической оптимизации поливной нормы.** Основная идея совершенствования методики эколого-экономической оптимизации режима орошения состоит в максимизации дополнительного чистого дохода, получаемого от орошения. Очевидно, что при орошении разных культур дополнительный чистый доход будет различным. Задача состоит в том, чтобы установить тот режим орошения, при котором этот доход для конкретной культуры будет максимальным.

Стандартная действующая методика расчета дополнительного чистого дохода основана на определении разности между стоимостью дополнительной продукции растениеводства от орошения и ее себестоимостью [3], причем стоимость дополнительной продукции растениеводства, получаемой благодаря орошению, принято определять на основе среднесезонных прибавок урожая от орошения. Денежная оценка дополнительной продукции орошаемого земледелия, используемой для продажи государству или на рынке непосредственно в своей натуральной форме (зерно, картофель, овощи и т. п.), выполняется по государственным закупочным ценам (при определении плановой либо проектной себестоимости) и по фактическим среднереализационным ценам (при определении фактической экономической эффективности). Те виды дополнительной продукции растениеводства, которые используются либо полностью, либо преобладающей частью на корм животным (сено, сенаж, силос, кормовые корнеплоды и т. п.), оцениваются по расчетным ценам, определяемым исходя из оплаты кормов доходами, получаемыми от реализации продукции животноводства [3].

Известно, что себестоимость дополнительной продукции растениеводства, получаемой благодаря орошению, включает две группы затрат: 1) затраты на уборку, доработку, транспортировку, хранение и реализацию прибавки урожая от орошения; 2) затраты на эксплуатацию оросительной системы и проведение поливов [3].

Затраты на уборку, доработку, транспортировку, хранение и реализацию дополнительной продукции растениеводства определяются при помощи расчетов: 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 анализируемых хозяйствах либо группе их. Общеизвестно что эти затраты в расчете на единицу орошаемой площади изменяются прямо пропорционально величине прибавок урожаев от орошения [3]:

$$R(\Delta Y_i) = r \Delta Y_i, \quad (1)$$

где  $R(\Delta Y_i)$  – затраты на уборку, доработку, транспортировку, хранение и реализацию прибавки урожая, полученной при  $i$ -м режиме орошения культуры, руб/га;  $r$  – затраты на уборку, транспортировку, доработку, хранение и реализацию единицы продукции, руб/т;  $\Delta Y_i$  – прибавка урожая от  $i$ -го режима орошения культуры, т/га.

В свою очередь, текущие затраты на эксплуатацию оросительной системы состоят из двух частей: 1) постоянные ежегодные затраты, не зависящие от применяемого режима орошения; 2) переменные затраты, определяемые режимом орошения, т. е.

$$R(O_i) = R(OC) + R(M_i), \quad (2)$$

где  $R(O_i)$  – затраты на эксплуатацию оросительной системы при  $i$ -м режиме орошения, руб/га;  $R(OC)$  – постоянные ежегодные затраты, не зависящие от применяемого режима орошения (содержание, техническое обслуживание оросительной системы), руб/га;  $R(M_i)$  – переменные затраты, определяемые  $i$ -м режимом орошения, руб/га.

Затраты на проведение орошения культуры зависят от режима орошения [2]. Можно показать, что

$$R(M_i) = \frac{M_i}{\eta_0} \left( c_w + \frac{c_n}{Q} \right). \quad (3)$$

Здесь  $R(M_i)$  – затраты на проведение орошения культуры  $i$ -й оросительной нормой, руб/га;  $M_i$  –  $i$ -я оросительная норма (нетто), м<sup>3</sup>/га;  $c_w$  – стоимость воды, забираемой из водоисточника для проведения орошения (при платном водопользовании), руб/м<sup>3</sup>;  $\eta_0$  – коэффициент полезного действия оросительной системы, учитывающий потери поливной воды при проведении орошения (от насосной станции до поля);  $c_n$  – суммарные затраты средств за 1 ч работы всей оросительной системы (электроэнергия, топливно-смазочные материалы, обслуживание механизмов, заработная плата обслуживающего персонала, техническое обслуживание системы, ремонты, накладные расходы и плановые накопления), руб/ч;  $Q$  – расход воды, подаваемый насосной станцией в напорный трубопровод, м<sup>3</sup>/ч.

С учетом выражений (1) и (2) себестоимость дополнительной продукции растениеводства, получаемой благодаря орошению, будет равна

$$S(\Delta Y_i) = R(\Delta Y_i) + R(O_i) \quad (4)$$

( $S(\Delta Y_i)$  – себестоимость прибавки урожая, полученной при  $i$ -м режиме орошения культуры, руб/га).

В свою очередь, стоимость дополнительной продукции растениеводства (от орошения) в расчете на единицу орошаемой площади изменяется также прямо пропорционально величине прибавки урожая [3]:

$$C(\Delta Y_i) = c \Delta Y_i, \quad (5)$$

где  $C(\Delta Y_i)$  – стоимость дополнительной продукции растениеводства, полученной при  $i$ -м режиме орошения, руб/га;  $c$  – цена реализации продукции растениеводства, руб/т.

Таким образом, в качестве основы аналитической модели получения дополнительного чистого дохода, определяемого режимом орошения, можно использовать равенство

$$D(\Delta Y_i) = C(\Delta Y_i) - [R(\Delta Y_i) + R(O_i)] \quad (6)$$

( $D(\Delta Y_i)$  – дополнительный чистый доход, полученный при  $i$ -м режиме орошения культуры, руб/га).

Следовательно, стандартная целевая функция получения максимального чистого дохода будет иметь следующий вид:

$$D(\Delta V_i) \rightarrow \max \quad \text{или} \quad \max D(\Delta V_i) = \max \{C(\Delta V_i) - [R(\Delta V_i) + R(O)]\}. \quad (7)$$

Ранее нами было показано, что главным элементом режима орошения является поливная норма. Именно она определяет все характеристики режима орошения [1]. Следовательно, чтобы найти максимум (7), требуется установить зависимость каждого члена функции (6) от нормы полива.

Уравнения (1)–(5) представляют собой непрерывные функции, поэтому обобщенная зависимость (6) также является непрерывной функцией. Для нахождения максимума непрерывной функции (6) на замкнутом ограниченном множестве необходимо выполнение условия первого рода:

$$\frac{d}{dm} [D(\Delta V_i)]_{m=m_0} = 0, \quad (8)$$

где  $m_0$  – оптимальная поливная норма, обеспечивающая максимальный дополнительный чистый доход, м<sup>3</sup>/га · полив.

Причем достаточно, чтобы

$$\frac{d^2}{dm^2} [D(\Delta V_i)]_{m=m_0} < 0. \quad (9)$$

Очевидно, что максимизация дополнительного чистого дохода (6), определяемого режимом орошения, имеет смысл, если численное значение дохода (6) больше нуля:

$$D(\Delta V_i) > 0. \quad (10)$$

Неравенство (10) является экономическим ограничением целевой функции (7). Помимо того, решаемая задача эколого-экономической оптимизации режима орошения имеет особенность, которая состоит в повышенном статусе экологических требований, детально представленных в работе [4]. Поэтому, опираясь на классический алгоритм отыскания максимума (7)–(9), необходимо проверять, лежит ли искомый максимум в экологически допустимых пределах или находится за его рамками. Если значение оптимальной поливной нормы не удовлетворяет требованиям экологической безопасности полива, то необходимо ориентироваться на его экологическое ограничение. Здесь и будет находиться искомое значение  $m_0$ , если при этом выполняется неравенство (10). В противном случае придется констатировать, что орошение данной культуры экономически не выгодно.

**Реализация алгоритма экономической оптимизации режима орошения.** Для определения прибавки урожая от орошения используем общеизвестную зависимость [3]:

$$\Delta V_i = Y_{Mi} - Y, \quad (11)$$

где  $\Delta V_i$  – прибавка урожая от орошения, т/га;  $Y_{Mi}$  – урожай культуры при  $i$ -м режиме орошения, т/га;  $Y$  – урожай культуры, полученный при естественной влагообеспеченности (при отсутствии орошения), т/га.

Форма связи урожая с величиной любого регулируемого фактора известна [5, 6]. При орошении и стабилизации прочих урожаеформирующих факторов урожай культуры зависит только от уровня увлажнения корнеобитаемого слоя почвы

$$Y = Y_m \left[ 1 - \left( \frac{W_{HB} - W}{W_{HB} - W_{B3}} \right)^2 \right], \quad (12)$$

где  $Y_m$  – урожайность культуры при оптимальном водном режиме почвы, т/га;  $W_{HB}$  – оптимальные влагозапасы, соответствующие наименьшей влагоемкости, м<sup>3</sup>/га;  $W$  – средние влагозапасы в корнеобитаемом слое почвы при отсутствии орошения, м<sup>3</sup>/га;  $W_{B3}$  – влагозапасы завядания, м<sup>3</sup>/га.

Представив урожай при орошении по аналогии с (12), из (11) получим

$$\Delta V_i = \frac{Y_m}{(W_{HB} - W_{B3})^2} [(W_{HB} - W)^2 - (W_{HB} - W_{Mi})^2] \quad (13)$$

( $W_{Mi}$  – средние влагозапасы в корнеобитаемом слое почвы при  $i$ -м режиме орошения культуры,  $\text{м}^3/\text{га}$ ).

В процессе орошения за счет эвапотранспирации влагозапасы в корнеобитаемом слое почвы перед перемещающимся поливным устройством постепенно снижаются от начального уровня (равного разности наименьшей влагоемкости и поливной нормы) до конечного предполивного уровня (на последней позиции полива). Средневзвешенная по площади величина предполивных влагозапасов будет равна [7]

$$W_{Mi} = [(W_{\text{HB}} - am_i f/F) \cdot f + (W_{\text{HB}} - am_i - am_i f/F)(F - f)]/F, \quad (14)$$

где  $a$  – показатель, зависящий от технологии орошения и имеющий размерность «полив»;  $m_i$  – норма полива при  $i$ -м режиме орошения,  $\text{м}^3/\text{га} \cdot \text{полив}$ ;  $f$  – политая на данный момент площадь, га;  $F$  – вся орошаемая площадь, обслуживаемая поливным устройством, га.

Раскрывая уравнение (14), найдем, что при любом соотношении  $f/F$  выполняется равенство

$$W_{Mi} = W_{\text{HB}} - am_i. \quad (15)$$

С учетом (15) прибавка урожая от орошения (13) составит

$$\Delta Y_i = [(W_{\text{HB}} - W)^2 - a^2 m_i^2]. \quad (16)$$

При работе поливного устройства величину поливной нормы в принципе можно изменять в пределах от минимальной технологической нормы (для заданного поливного устройства) до максимально допустимой для орошаемого почвенного профиля, при этом, естественно, оросительные нормы также будут различаться. Можно показать, что в диапазоне от суточного водопотребления и до нормативных значений поливных норм, зависящих от водоудерживающей способности почвы [8], простейшей аппроксимацией зависимости оросительных норм от норм полива является линейная функция

$$M_i = M_0 - bm_i, \quad (17)$$

где  $M_0$  – оросительная норма, необходимая для постоянного поддержания почвенных влагозапасов в течение вегетации на уровне наименьшей влагоемкости,  $\text{м}^3/\text{га}$ ;  $b$  – показатель, зависящий от распределения атмосферных осадков и имеющий размерность «полив».

Подставив формулу (17) в выражение (3), получим

$$R(M_i) = \frac{M_0 - bm_i}{\eta_0} \left( c_w + \frac{c_n}{Q} \right), \quad (18)$$

Раскроем исходное уравнение (6) с учетом полученных значений составляющих (16)–(18):

$$D(\Delta Y_i) = \frac{Y_m}{(W_{\text{HB}} - W_{\text{B3}})^2} (c - r) [(W_{\text{HB}} - W)^2 - a^2 m_i^2] - [R(OC) + \frac{M_0 - bm_i}{\eta_0} \left( c_w + \frac{c_n}{Q} \right)]. \quad (19)$$

Оросительная норма, необходимая для постоянного поддержания почвенных влагозапасов в течение вегетации на уровне наименьшей влагоемкости, определяется погодно-климатическими условиями и не зависит от режима орошения. Поскольку постоянные ежегодные затраты на содержание и техническое обслуживание оросительной системы также не зависят от применяемого режима орошения и величины поливной нормы, в соответствии с (8) имеем

$$\frac{d}{dm} [D(\Delta Y_i)] = - \frac{2a^2 (c - r) Y_m}{(W_{\text{HB}} - W_{\text{B3}})^2} m_0 + \frac{b}{\eta_0} \left( c_w + \frac{c_n}{Q} \right) = 0 \quad (20)$$

( $m_0$  – экономически обоснованная норма полива, соответствующая максимальному дополнительному чистому доходу, который может быть получен от орошения культуры,  $\text{м}^3/\text{га} \cdot \text{полив}$ ).

Проверим выполнение ограничения (9). Из выражения (20) следует:

$$\frac{d^2}{dm^2} [D(\Delta Y)] = -\frac{2a^2(c-r)Y_m}{(W_{\text{НВ}} - W_{\text{ВЗ}})^2} < 0. \quad (21)$$

Полученное отрицательное значение второй производной (21) подтверждает выполнение требования (9). Следовательно, можно констатировать, что функция (19) имеет максимум, соответствующий наибольшему дополнительному чистому доходу, который может быть получен от орошения культуры экономически обоснованной нормой полива. Приравнявая к нулю первую производную дополнительного чистого дохода, из выражения (20) получим

$$m_o = \frac{b(W_{\text{НВ}} - W_{\text{ВЗ}})^2}{2a^2\eta_o(c-r)Y_m} \left( c_w + \frac{c_{\text{п}}}{Q} \right) \quad (22)$$

( $m_o$  – экономически обоснованная норма полива,  $\text{м}^3/\text{га} \cdot \text{полив}$ ).

Графическая интерпретация алгоритма экономически обоснованной нормы полива приведена на рисунке.

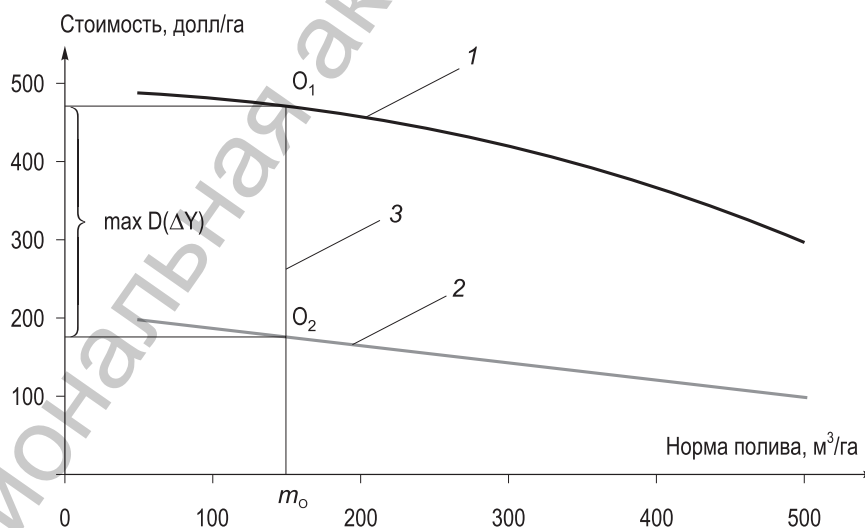
Особенность решения задачи эколого-экономической оптимизации режима орошения состоит в учете технологических и экологических ограничений. Поэтому помимо требования максимизации дополнительного чистого дохода, получаемого от орошения, величина поливной нормы должна удовлетворять еще двум условиям:

1) быть больше технологического минимума, связанного с суммарными затратами времени в процессе полива на техническое обслуживание оросительной системы и на холостые перебазировки оросительной техники, если таковые необходимы по технологии орошения;

2) не превышать экологически допустимый предел, исключать потери поливной воды на поверхностный и внутрпочвенный сток.

Указанные ограничения можно выразить в виде следующей формулы:

$$\frac{\varepsilon(T_{\text{ПХ}} + T_{\text{ТО}})}{k_{\text{сут}}} < m_o \leq m_3, \quad (23)$$



Зависимость экономических показателей от нормы полива при орошении моркови, возделываемой на хорошо окультуренной супесчаной почве: 1 – стоимость всей продукции растениеводства, полученной в условиях орошения, за вычетом затрат на ее уборку, транспортировку, доработку, хранение и реализацию  $[(c-r)(Y) = C(Y) - R(Y)]$ ; 2 – сумма ежегодных издержек на содержание оросительной системы и затрат на проведение орошения моркови  $[R(OC) + R(M)]$ ; 3 – максимальный дополнительный чистый доход, полученный от орошения моркови оптимальной поливной нормой  $m_o$ ,  $[\max D(\Delta Y) = O_1 O_2]$

где  $\varepsilon$  – интенсивность эвапотранспирации орошаемого поля,  $\text{м}^3/\text{га} \cdot \text{ч}$ ;  $T_{\text{ПХ}}$  – продолжительность холостых перебазировок оросительной техники, предусмотренных технологией полива,  $\text{ч}/\text{полив}$ ;  $T_{\text{ТО}}$  – продолжительность технического обслуживания оросительной системы в процессе одного полива,  $\text{ч}/\text{полив}$ ;  $k_{\text{сут}}$  – коэффициент, учитывающий продолжительность работы обслуживающего полив персонала в течение суток, включая выполнение полива и проведение технического обслуживания оросительной системы;  $m_3$  – экологически обоснованный верхний (допустимый) предел величины поливной нормы,  $\text{м}^3/\text{га} \cdot \text{полив}$ .

**Заключение.** Особенность задачи эколого-экономической оптимизации режима орошения состоит в учете технологических, экономических и экологических ограничений. Помимо учета дополнительного чистого дохода, получаемого от орошения, величина поливной нормы должна учитывать технологический минимум, связанный с суммарными затратами времени на техническое обслуживание оросительной системы и на холостые перебазировки оросительной техники в процессе полива, исключать потери поливной воды на поверхностный и внутриводный сток. Анализ составляющих дополнительного чистого дохода, полученного от орошения, показал, что экономически обоснованная норма полива прямо пропорциональна продуктивной влагоемкости почвы, увеличиваясь при повышении затрат на полив и снижаясь при росте стоимости полученного урожая орошаемой культуры, за вычетом затрат на уборку, доработку, транспортировку, хранение и реализацию выращенной продукции.

## Литература

1. *Лихацевич, А. П.* Обоснование расчетной модели режима орошения многолетних трав и овощных культур в условиях Беларуси: автореф. дис. ... док. техн. наук: 06.01.02 / А. П. Лихацевич, БелНИИМил. – Минск. 1993. – 47 с.
2. *Лихацевич, А. П.* Дождевание сельскохозяйственных культур: основы режима при неустойчивой естественной влагообеспеченности / А. П. Лихацевич. – Минск: Белорусская наука, 2005. – 278 с.
3. Методические указания по определению экономической эффективности капитальных вложений в орошение земель в нечерноземной зоне / Г. М. Лыч, А. Е. Жуков. – Минск: БелНИИМилВХ, 1974. – 47 с.
4. *Лихацевич, А. П.* Экологически безопасный, ресурсосберегающий режим орошения сельскохозяйственных культур в Беларуси / А. П. Лихацевич // Мелиорация переувлажненных земель: сб. науч. работ / БелНИИМил. 2003. – Т. 50. – С. 83–94.
5. Механизация полива: справ. / Б. Г. Штепа [и др.]. – М., 1990. – С. 31–37.
6. *Лихацевич, А. П.* Модель влияния регулируемых факторов окружающей среды на урожай сельскохозяйственных культур / А. П. Лихацевич // Мелиорация переувлажненных земель. – 2004. – № 2(52). – С. 123–143.
7. *Лихацевич, А. П.* Моделирование проектного режима орошения / А. П. Лихацевич // Мелиорация. – 2010. – № 2 (64). – С. 19–26.
8. Оросительные системы. Правила проектирования: ТКП/ПР 45–3.04.2009 (02250). – Введ. 29.12.2009. – Минск, 2010. – 74 с.

*A. P. LIKHATSEVICH*

## OPTIMIZATION OF CROP IRRIGATION MODE

### Summary

The existing method of optimizing an irrigation mode doesn't take into account the economy of irrigated crops cultivation, and irrigation is only oriented towards operating cost saving what restricts possible economic benefits in irrigated farming. That is why further improvement of the methods for optimizing crop irrigation mode is of great interest as it allows taking into consideration all the possible reserves and establishing the indicators which ensure the highest economic efficiency while growing irrigated crops.

The analysis of the components of the additional net income derived from irrigation shows that economically sound irrigation rate is a complex function of water holding capacity of soil, the selling price of irrigated crop products and irrigation costs.