

ЗАВИСИМОСТЬ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ОТ УРОЖАЙНОСТИ

А.П. Лихацевич, доктор технических наук, член-корр. НАН Беларуси,

Г.В. Латушкина, кандидат технических наук,

РУП «Институт мелиорации»

г. Минск, Беларусь

С.В. Набздорov, старший преподаватель

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»

г. Горки, Беларусь

Аннотация

Исследована связь водопотребления сельскохозяйственных культур с их урожайностью. Тем самым показано, что отношение водопотребления к урожаю является не прямым, а косвенным показателем расхода влаги на единицу урожая. С использованием биотермических коэффициентов определена структура связи текущего водопотребления орошаемой культуры с урожайностью и с максимальной температурой воздуха – метеопараметром, наиболее легко определяемым в производственных условиях при расчетах эксплуатационных режимов орошения.

Ключевые слова: водопотребление, урожайность, сельскохозяйственные культуры, биотермические коэффициенты, фазы вегетации, максимальная температура воздуха

Abstract

A.P. Likhachevich, G.V. Latushkina, S.V. Nabzdorov

DEPENDENCE OF WATER CONSUMPTION ON CROP PRODUCTIVITY

Ratio of water consumption of crops and its productivity is studied. Thus it is shown that the ratio of water consumption to yield is not a direct indicator of the consumption of moisture per unit of yield, but an indirect one. Due to bio thermal coefficients the structure of the ratio is determined between the current water consumption of the irrigated crop with the yield and the maximum air temperature – the meteorological parameter most easily determined in the production conditions when calculating the operating irrigation regimes.

Keywords: water consumption, crop productivity, agricultural crops, bio thermal coefficients, phases of vegetation, maximum air temperature

Введение

Актуальность орошения сельскохозяйственных культур в последние годы распространилась на регионы, которые традиционно входили в зону избыточного увлажнения, в том числе и на Беларусь. Эффективность орошения в нашей зоне зависит от точности управления режимом поливов, который существенно осложняется непредсказуемым чередованием жарких и засушливых периодов с прохладными и дождливыми.

Основным показателем необходимости поливов является изменяющаяся в процессе вегетации величина иссушения корнеобитаемого слоя почвы, измеряемая недостатком увлажнения почвы до равновесной влажности – наименьшей влагоемкости (НВ).

Динамика почвенной влажности определяется в основном текущим водопотреблением сельскохозяйственных культур, выпадающими атмосферными осадками и поливами. Контроль за динамикой почвенных влагозапасов осуществляется либо периодическими замерами почвенной влажности непосредственно

в поле, либо путем расчета водного баланса почвы, в котором суммарный расход влаги полем (испарение влаги почвой и транспирации растениями) является одним из основных характеристик, определяющих сроки поливов сельскохозяйственных культур. От правильности расчета составных элементов водного баланса орошаемого поля, включая водопотребление, во многом зависит эффективность организации и проведения орошения.

Наиболее достоверные данные о водопотреблении орошаемого поля в различных почвенно-климатических условиях получают путем непосредственных полевых измерений с использованием лизиметров. Однако для проведения таких опытов требуются большие затраты труда и времени. В связи с этим при установлении режима орошения сельскохозяйственных культур (при проектировании мелиоративных систем и при их эксплуатации) для определения водопотребления чаще используются расчетные методы.

Классиком советской мелиоративной науки академиком А.Н. Костяковым еще в середине XX

века предложено при расчетах использовать простейшую линейную форму связи водопотребления орошаемых сельскохозяйственных культур с урожаем [1]:

$$E = K_e Y, \quad (1)$$

где E – водопотребление орошаемой сельскохозяйственной культуры, м³/га; K_e – коэффициент водопотребления, показывающий расход почвенной влаги на единицу урожая, м³/т; Y – урожайность культуры, т/га.

Было установлено, что с ростом урожайности коэффициент водопотребления снижается [1, 2, 3]. Оказалось, что это снижение существенно зависит от конкретных условий. Поэтому количественная связь вида (1) до настоящего времени используется только для качественной оценки расхода почвенной влаги на единицу урожая.

Поскольку эмпирическую зависимость (1) не удается количественно трансформировать к обобщенному виду, пригодному для использования в любых частных рекомендациях, в расчетах водопотребления обычно используются другие методики, в частности, биоклиматический метод, основанный на использовании биоклиматических или биотермических коэффициентов. С помощью биоклиматических коэффициентов водопотребление культур связывают с дефицитами влажности воздуха, а биотермические коэффициенты используются для установления связи водопотребления с температурами воздуха (среднесуточными или максимальными за сутки). По причине отсутствия количественной оценки связи биоклиматических или биотермических коэффициентов с урожайностью сельскохозяйственных культур в рекомендациях по расчету водопотребления обычно дается ссылка на некую фиксированную урожайность, связанную с конкретными уровнями почвенного плодородия, агротехники и влагообеспеченности культуры. Предполагается, что при изменении исходных показателей, влияющих на водопотребление сельскохозяйственных культур, значения их биоклиматических и биотермических коэффициентов следует уточнять.

В данной статье проводится анализ результатов опытов разных авторов, и выполнена оценка возможности учета связи водопотребления культур с их урожайностью при разной тепловлагообеспеченности.

Материалы и методы исследований

На процесс водопотребления растений помимо метеорологических условий и увлажненности корнеобитаемого слоя почвы влияют биологические особенности развития культур. В качестве метеорологического фактора, управляющего процессом водопотребления конкретной сельскохозяйственной культуры, нами предложено использовать максимальную за сутки температуру воздуха, поскольку именно этот метеопараметр не только достаточно точно отражает влияние испаряющей способности приземного слоя атмосферы на растения, но и наиболее легко контролируется в производственных условиях [4]. При этом биологические особенности развития культур учитываются соответствующими биотермическими коэффициентами, определяющими в процессе вегетации связь между водопотреблением культуры и максимальной температурой воздуха.

Максимальное суточное водопотребление орошаемой культуры, которое имеет место при биологически оптимальных влагозапасах почвы, рассчитывается по формуле [4]

$$E_{mi} = K_{ti} t_{m(cp).i}, \quad (2)$$

где K_{ti} – биотермический коэффициент орошаемой культуры в i -е (расчетные) сутки, мм/град; $t_{m(cp).i}$ – осредненная за предыдущую декаду (относительно даты расчета) максимальная суточная температура воздуха;

$$t_{m(cp).i} = \frac{1}{10} \sum_{i-9}^i t_{mi}, \quad (3)$$

где 10 – число суток, за которые выполняется осреднение максимальных суточных температур воздуха; $\sum_{i-9}^i t_{mi}$ – сумма максимальных суточных температур воздуха за 10 суток (включая текущую дату, за которую определяется водопотребление, и предыдущие 9 суток), °С; t_{mi} – максимальная суточная температура воздуха в i -е расчетные сутки, °С.

Поскольку растения являются живой развивающейся системой, через присутствие в формуле (3) осреднения учитывается фактор влияния предыдущих условий вегетации (температурного режима в предыдущие 10 суток) на максимальное водопотребление орошаемой культуры.

Биотермические коэффициенты в (2) отражают биологические особенности культур в фазы их развития, и соответствуют приращению водопотребления орошаемой культуры в данных условиях при повышении температуры воздуха на один градус.

Для учета увлажненности корнеобитаемого слоя, характеризуемой почвенными влагозапасами, согласно ТКП, вводится коэффициент φ_i , зависящий от уровня увлажненности почвы по отношению к ее наименьшей влагоемкости [5]

$$E_i = \varphi_i E_{mi}. \quad (4)$$

Определять коэффициент увлажненности почвы φ_i предложено по формуле

$$\varphi_i = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{W_{HB}}{W_{Hi}} - 1 \right)^2 \right], \quad (5)$$

где W_{HB} – влагозапасы расчетного слоя почвы при наименьшей влагоемкости, мм; W_{Hi} – фактические влагозапасы в i -е сутки, мм.

С целью достижения максимальной точности расчет водопотребления производится посуточно [6]. При продолжительности расчетного интервала одни сутки величина потерь воды на внутрипочвенный сток (C) в диапазоне $W_{HB} \leq (W_H + P - E_m) \leq W_{ПВ}$ устанавливается по начальным влагозапасам, атмосферным осадкам и максимальному водопотреблению культуры за расчетный интервал [4]

$$C = (W_H - E_m - W_{HB}) \left(\frac{T}{T_{MAX}} \right)^a + P \left(\frac{T}{T_{MAX}} \right)^b, \quad (6)$$

где W_H – влагозапасы в расчетном слое почвы на начало расчетного интервала; T – продолжительность расчетного интервала (при посуточном расчете водного баланса $T=1$ сут.); T_{MAX} – продолжительность стекания гравитационной влаги из расчетного слоя почвы, установленная по методике определения наименьшей влагоемкости, сут.; a , b – коэффициенты, зависящие от разновидности почвы и плотности ее сложения, с уменьшением содержания физической глины и повышением крупности почвенных частиц величина показателя степени снижается. Например, для суглинистых почв $a = 0,5$; $b = 2$.

Продолжительность стекания гравитационной влаги из расчетного слоя почвы (T_{MAX}) зависит от типа почвы и плотности ее сложения. Может изменяться в диапазоне 1–2 суток для легких почв рыхлого сложения, 2–3 суток для легких почв средней плотности, 3–4 суток для средних почв средней плотности, 4–5 суток для средних уплотненных почв и 5–6 суток для тяжелых почв.

В процессе водобалансового расчета сначала определяется максимальное водопотребление в i -е сутки при достаточном увлажнении почвы, а затем – фактическое водопотребление (E_i), учитывающее с помощью коэффициента (4) фактическое увлажнение почвы в конкретные сутки. Суммируя суточные водопотребления за весь период вегетации, получают, соответственно, водопотребление культуры за вегетационный период

$$E = \sum_1^N E_i, \quad (7)$$

где E – суммарное водопотребление культуры за вегетационный период; N – продолжительность вегетационного периода.

Однако возникает вопрос, каким же образом изменяются биотермические коэффициенты при разных уровнях влагообеспеченности культуры и как они связаны с изменяющейся при этом урожайностью. Оценим эту связь, отталкиваясь от формулы А.Н. Костякова (1).

Заметим, что исследования, проведенные в разных почвенно-климатических условиях, показали, что более точной формой связи водопотребления с урожайностью является не прямая (1), выходящая из начала координат, а прямая, пересекающая ось ординат в некоторой начальной точке, существенно большей нуля [7, 8, 9]

$$E = E_{min} + k_B Y, \quad (8)$$

где E_{min} – условное водопотребление при нулевом товарном урожае возделываемой культуры; k_B – коэффициент пропорциональности водопотребления поля росту урожая культуры – не зависящая от урожая величина.

Заметим, что Е.А. Стельмахом помимо линейной формы (8) на рисунках, трактующих результаты полевых опытов, приводилась и параболическая зависимость водопотребления от урожайности [2].

Встречаются и другие предложения. Например, в статье В.И. Ольгаренко и др. [7] зависимость водопотребления моркови от урожая авторами аппроксимируется экспоненциальной функцией

$$E = b_1 e^{b_2 Y}, \quad (9)$$

где b_1, b_2 – эмпирические коэффициенты.

Сравнивая формулы (8) и (9), приходим к выводу, что

$$E = E_{min} e^{b_2 Y}. \quad (10)$$

Согласно исследованиям В.И. Ольгаренко и др. [7] водопотребление поля и при отсутствии товарного урожая никак не может быть равно нулю. Как видим, в формуле (8) так называемый эмпирический коэффициент b_1 является ни чем иным, как условным водопотреблением поля при нулевом товарном урожае.

Возможно, переход от линейной (8) к более сложной, например, экспоненциальной (9), (10) зависимости может несколько повысить точность расчета водопотребления культур на планируемый урожай, но насколько актуально данное повышение, рассмотрим на конкретных примерах. Для этого, проанализируем результаты опытов, выполненных в условиях России и Беларуси, оценив допустимость использования в расчетах более простой формы зависимости (8).

Результаты и обсуждение

Для уточнения выводов по статье [7] используем опубликованные в ней осредненные результаты многолетних опытов в степной полусасушливой зоне Российской Федерации и представим построенные по данным статьи [7] графики связи $E(Y)$ для моркови и кормовой свеклы. Согласно рисунку 1 эти графики, помимо формул (9), (10) с достаточно большой точностью можно аппроксимировать простыми линейными функциями вида (8).

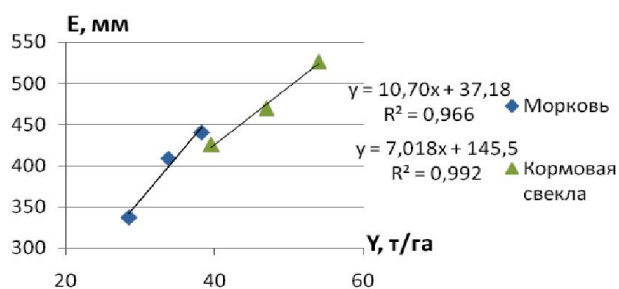


Рисунок 1. – Зависимость водопотребления моркови и кормовой свеклы от урожайности [7]

Проанализируем результаты подобных опытов, полученные в Беларуси. В 80-е годы XX века в Брестской области на Пружанском гидролого-гидрогеологическом стационаре Белорусского НИИ мелиорации и водного хозяйства проводились полевые и лизиметрические исследования с целью оценки влияния осушительной мелиорации на составные элементы водного баланса почв, включая и водопотребление сельскохозяйственных культур. Научным руководителем этих исследований Н.В. Окуликом в лизиметрических опытах получены данные по связи водопотребления озимой ржи и картофеля с их урожайностями [8]. Автором исследований не проводилась статистическая обработка данных и не предложена какая-либо форма количественной зависимости водопотребления исследуемых культур с их урожайностями, а лишь на рисунках с опытными точками от руки проведены кривые (глазомерно близкие к параболе), осредняющие данные многолетнего эксперимента [8]. Мы отсканировали указанные рисунки и провели обработку приведенных на них опытных точек с использованием стандартной программы «Excel» (рисунок 2).

Результаты исследований Н.В. Окулика показывают, что криволинейность связи $E(Y)$ в условиях Беларуси для озимой ржи и картофеля выражена весьма слабо. Поэтому в границах урожайностей,

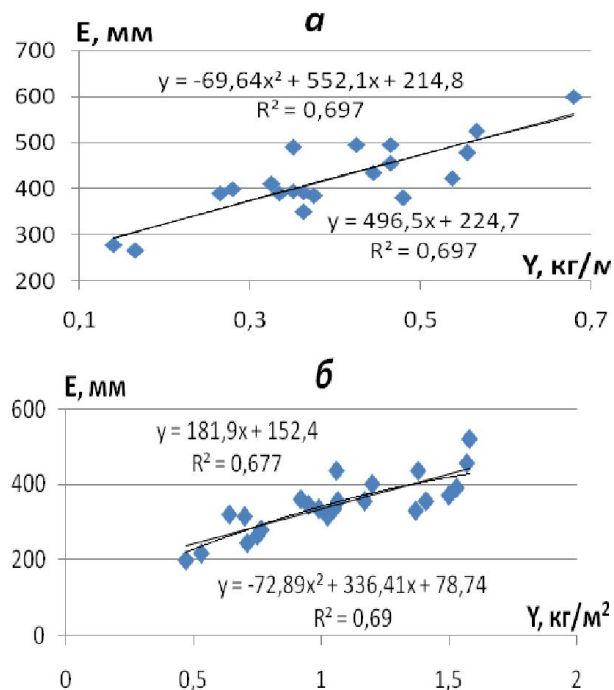


Рисунок 2. – Зависимость водопотребления озимой ржи (а) и картофеля (б) от урожайности [8]

полученных в экспериментах, этой кривизной можно пренебречь, используя для количественной оценки связи $E(Y)$ линейную форму зависимости (8).

Таким образом, основываясь на результатах российских и белорусских исследований, считаем возможным при расчете водопотребления сельскохозяйственных культур на планируемую урожайность использовать линейную функцию вида (8). Согласно указанным на рисунках 1 и 2 значениям показателей тесноты эмпирической связи, это не приведет к недопустимо большим ошибкам. Вместе с тем подчеркнем, что данный вывод справедлив в границах урожайностей культур, полученных в прокомментированных выше опытах.

Основываясь на полученном заключении, вытекающие из формулы А.Н. Костякова (1) выводы можно существенно дополнить. Для этого рассмотрим приведенный на рисунке 3 график связи водопотребления картофеля с урожаем (отрезок АВ), построенный по осредненным данным результатов опыта И.В. Гуриной, Т.В. Мельник и И.М. Калечак с картофелем, проведенного в ООО «Исток-1» Семикаракорского района Ростовской области [9].

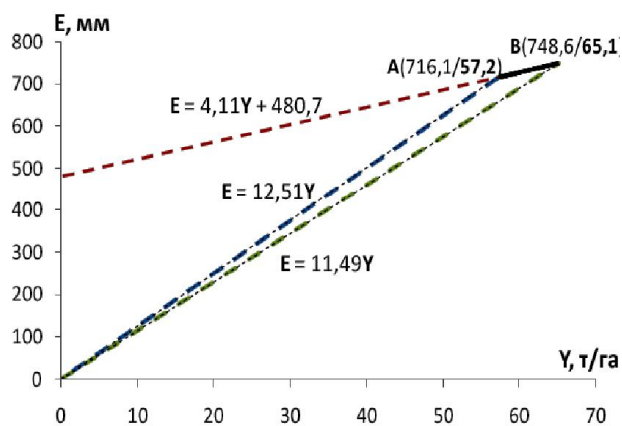


Рисунок 3. – Схема для анализа зависимости водопотребления картофеля от урожайности (по данным [8])

Согласно опыту [9], при урожае картофеля 57,2 т/га водопотребление составило 716,1 мм, а при урожае 65,1 т/га – 748,6 мм. Следовательно, согласно А.Н. Костякову (1), в первом случае на получение одной тонны картофеля израсходовано 125,1 м³/т воды, а во втором – 114,9 м³/т (аппроксимирующие формулы на рис. 3 – $E=12,51Y$ и $E=11,49Y$).

Вместе с тем, согласно зависимости (8), только на обеспечение жизнедеятельности культуры не-

зависимо от ее урожая требуется 480,7 мм воды. А на формирование каждой дополнительной тонны клубней как при урожае картофеля 57,2 т/га, так и при урожае 65,1 т/га растением израсходовано одинаковое количество воды – 41,1 м³/т. Другими словами, для того, чтобы растения вообще смогли сформировать урожай клубней, они должны быть изначально обеспечены минимальным количеством почвенной влаги не менее, чем 480,7 мм (рисунок 3).

Полученные выводы нам представляются вполне обоснованными и более развернутыми, чем вытекающие из формулы (1). Поэтому в дальнейшем при анализе будем основываться на аппроксимации связи $E(Y)$ вида (8).

Согласно (1) и (8) получим

$$K_B = \frac{E_{\min} + k_e Y}{Y} = k_e + \frac{E_{\min}}{Y}. \quad (11)$$

Как видим, коэффициент водопотребления для возделываемой в конкретных условиях культуры складывается из двух составляющих:

- коэффициента пропорциональности водопотребления урожаю в виде константы (k_e);
- гиперболически зависящей от урожая переменной величины, которую можно назвать коэффициентом снижения влияния урожая на водопотребление культуры (E_{\min}/Y) при росте продуктивности посевов от повышения увлажненности почвы.

Заметим, что эмпирическая зависимость (11) подтверждается опытными данными Е.А. Стельмаха [3].

В соответствии с (11) можем утверждать, что всегда выполняется неравенство

$$K_B > k_e. \quad (12)$$

Сравним формулы (2)-(4), (7) и (8). Согласно им справедливо равенство

$$\sum_1^N (\varphi_i K_{ti} t_{m(cp.)i}) = E_{\min} + k_B Y. \quad (13)$$

Осредним за период вегетации величины коэффициента φ и биотермического коэффициента K_{ti} , приравняв их значению среднего за вегетацию биотермического коэффициента, соответствующему конкретным условиям влагообеспеченности культуры

$$\varphi_{cp} K_{i(cp)} = \frac{1}{N} \sum_1^N \varphi_i K_{ti}. \quad (14)$$

Из (13) и (14) следует

$$K_{ii(ср)} = \frac{E_{\min} + k_6 Y}{\varphi_{ср} \sum_1^N t_{m(ср),i}} = \frac{E_{\min} + k_6 Y}{\varphi_{ср} \sum_1^N t_{mi}} = \frac{K_B Y}{\varphi_{ср} \sum_1^N t_{mi}}. \quad (15)$$

Соотношение (15) связывает средний за вегетацию биотермический коэффициент культуры с ее урожайностью. Проанализируем зависимость (15). При повышении влагообеспеченности культуры растет урожай, однако при этом, соответственно, снижается коэффициент водопотребления (K_B) и растет коэффициент $\varphi_{ср}$.

Проверить изменение биотермического коэффициента при повышении или снижении влагообеспеченности культуры можно по результатам конкретного полевого опыта. Выполним эту проверку, используя данные опыта с орошением сахарной свеклы, проведенного С.В. Набздоровым в 2017 году на участке «Тушково-1» Горецкого района Могилевской области Беларуси. На рисунке 4 показана зависимость водопотребления сахарной свеклы от урожая, вытекающая из результатов данного опыта.

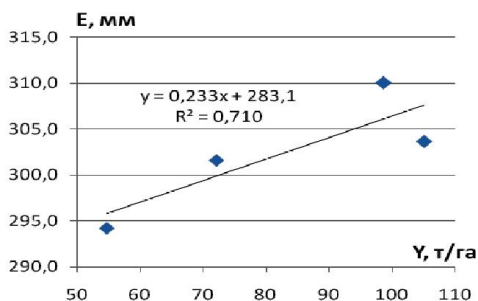
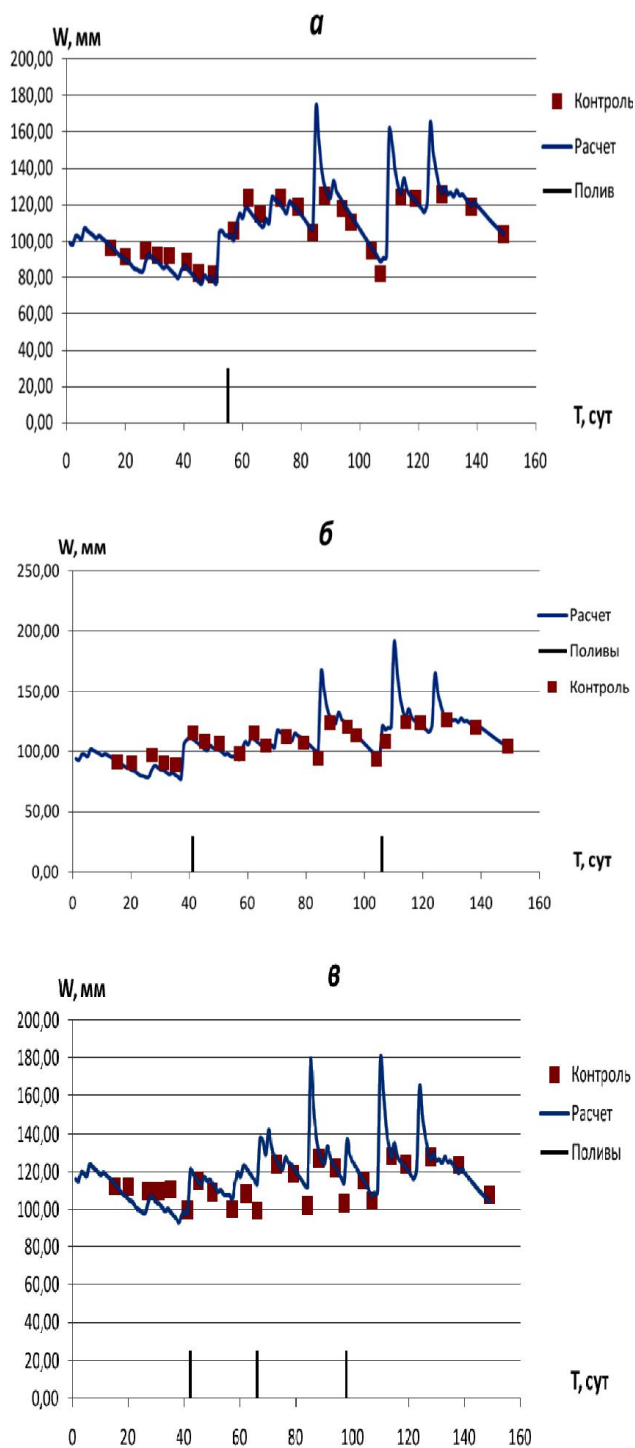


Рисунок 4. – Зависимость водопотребления сахарной свеклы от урожая

Полученная в однолетнем полевом опыте с сахарной свеклой предварительная зависимость (рисунок 4) в общем виде повторяет результаты многолетних лизиметрических исследований на Пружанском стационаре с озимой рожью и картофелем [8], а также результаты полевых опытов российских исследователей с морковью, кормовой свеклой [7] и картофелем [9], тем самым подтверждая справедливость формул (11)-(15). Но вопрос состоит в том, как при этом меняются значения биотермических коэффициентов.

В таблице 1 приведены данные подбора величин биотермических коэффициентов, которые оказа-

лись во всех вариантах орошения одинаковыми при минимальных отклонениях рассчитанных по формулам (2)-(6) влагозапасов почвы от измеренных непосредственно в поле (рисунок 5).



а) предполивная влажность равна 0,6 НВ;
 б) предполивная влажность равна 0,7 НВ;
 в) предполивная влажность равна 0,8 НВ

Рисунок 5. – Графики динамики рассчитанных по водному балансу и измеренных в поле почвенных влагозапасов по вариантам опыта

Таблица 1. – Результаты опыта орошения сахарной свеклы на удобрительном фоне $N_{40}P_{80}K_{150}$ в условиях 2017 года

ВАРИАНТЫ	Водопотребление, мм	φ_{cp}	$E_m = E/\varphi_{cp}$, мм	Урожай, т/га	$K_{tm(cp)}$, мм/°С
Без орошения	294,3	0,941	312,7	54,7	0,102
Поливы при 0,6 НВ	301,6	0,965	312,6	72,1	0,102
Поливы при 0,7 НВ	303,6	0,971	312,6	105,2	0,102
Поливы при 0,8 НВ	310,0	0,992	312,6	98,7	0,102

Графики динамики рассчитанных и измеренных почвенных влагозапасов на рисунке 5 подтверждают высокую точность водобалансового расчета с использованием одной и той же величины биотермического коэффициента при разной влагообеспеченности орошаемой культуры (таблица 1) при использовании в алгоритме расчета коэффициента увлажнения почвы (φ).

Выводы

1. Коэффициенты водопотребления культуры, которые определяются как отношение водопотребления к полученному урожаю, слагаются из двух составляющих:

– коэффициента пропорциональности водопотребления урожаю (является константой для данных

условий и не зависит от урожая культуры);

– коэффициента снижения влияния урожая на водопотребление культуры при росте продуктивности посевов от повышения их влагообеспеченности.

2. При расчете водопотребления растений величины биотермических коэффициентов при разных режимах увлажнения остаются постоянными, если в алгоритме расчета водопотребления используется коэффициент увлажнения почвы (φ).

Полученные выводы существенно упрощают водобалансовый расчет, в котором нет необходимости менять значения биотермических коэффициентов при изменении режима увлажнения орошаемых культур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костяков, А.Н. Основы мелиораций. – М. : Сельхозгиз, 1960. – 662 с.
2. Стельмах, Е.А. Режимы орошения сельскохозяйственных культур на юге Нечерноземной зоны РСФСР. – М. : Россельхозиздат. – 1987. – 112 с.
3. Лихацевич А.П., Стельмах Е.А. Оценка факторов, формирующих неустойчивую влагообеспеченность сельскохозяйственных культур в гумидной зоне (на примере Беларуси, Центрального и Волго-Вятского районов Российской Федерации). – Мн.: ООО "Полирек". – 2002. – 212 с.
4. Усовершенствованный алгоритм управления орошением в производственных условиях / А.П. Лихацевич [и др.] Мелиорация: современные методики, инновации и опыт практического применения. Материалы Международной научно-практической конференции. – Минск : Беларуская навука. – 2017. – С. 30-40.
5. Оросительные системы. Правила проектирования: ТКП/ПР 45-3.04.2009 (02250). – Введ. 29.12.2009. – Минск, 2010. – 74 с.
6. Оценка влияния продолжительности расчетного интервала на точность водобалансового расчета при неустойчивых погодных условиях / А.П. Лихацевич, И.А. Романов // Мелиорация. – 2017. – №2. – С. 5-9.
7. Ольгаренко В.И., Ольгаренко И.В., Ольгаренко В.Иг., Панкарикова А.А., Эфендиев М.С., Костюнин Г.Г. Нормирование водопотребления сельскохозяйственных культур с учетом изменчивости гидрометеорологических условий. – Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – № 2(30). – 2018. – С. 22-40.
8. Окулик, Н.В. Водный режим и продуктивность почв. – Мн.: Ураджай. –1989. – 191 с.
9. Гурина И.В., Мельник Т.В., Калечак И.М. Режимы орошения и водопотребление картофеля весенней посадки при поливах современной дождевальной техникой. – Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – № 2(30). – 2018. – С. 158-168.

Поступила 18.09.2018