

## МЕЛИОРАЦИЯ И ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО

УДК 633.63:628.1

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 07.09.2020)

*Исследована зависимость водопотребления сахарной свеклы от уровня питания (NPK), влагообеспеченности вегетационного периода и полученного урожая. Анализируются результаты опытов разных авторов и выполнена оценка возможности учета связи водопотребления сахарной свеклы с уровнем питания и влагообеспеченностью вегетационного периода при расчете водного баланса почвы. Рассмотрена связь потребления влаги сельскохозяйственным полем с выбранным метеорологическим фактором. В качестве такого фактора, управляющего процессом водопотребления, 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. Для функционального обобщения исследуемой зависимости введено понятие «условно нулевой урожай культуры». Подтверждено, что при условно нулевом урожае суммарное испарение поля не равно нулю, а имеет вполне реальное значение, существенно большее нуля. В статье показано, что алгоритм водобалансового расчета, основанный на связи водопотребления сахарной свеклы с максимальной температурой воздуха с использованием коэффициентов увлажнения почвы и установленных опытным путем биотермических коэффициентов автоматически исключают зависимость результатов расчета от применяемых режимов орошения. Кроме того, доказано, что влияние уровня питания и урожая на величину биотермических коэффициентов для сахарной свеклы также незначительно. Сделанные выводы в статье позволяют рекомендовать полученные опытным путем биотермические коэффициенты для расчета как проектного, так и эксплуатационного режимов орошения сахарной свеклы, возделываемой на суглинистых почвах в восточной части Республики Беларусь с применением любого способа регулирования влагообеспеченности культуры (дождевание, капельный полив). С использованием биотермических коэффициентов исследована структура связи сезонного водопотребления сахарной свеклы с уровнем питания и урожайностью.*

**Ключевые слова:** водопотребление, NPK, урожайность сахарной свеклы, биотермические коэффициенты, максимальная температура воздуха.

*We have examined the dependence of water consumption of sugar beet on the level of nutrition (NPK), moisture supply during the growing season and the obtained yield. We have analyzed results of experiments by different authors and estimated the possibility of taking into account the relationship between water consumption of sugar beet and the level of nutrition and moisture supply during the growing season when calculating the water balance of the soil. The relationship between moisture consumption by an agricultural field and the selected meteorological factor is considered. As such a factor controlling the water consumption process, it was proposed to use the maximum air temperature per day, since it is this meteorological parameter that not only accurately reflects the effect of evaporating capacity of the surface layer of the atmosphere on plants, but is also most easily controlled under industrial conditions. For the functional generalization of the studied dependence, the concept of «conditionally zero crop yield» is introduced. It has been confirmed that with a conditionally zero yield, the total evaporation of the field is not zero, but has a very real value, significantly greater than zero. The article shows that the water balance calculation algorithm, based on the relationship between the water consumption of sugar beet and the maximum air temperature using soil moisture coefficients and empirically established biothermal coefficients, automatically excludes the dependence of calculation results on the applied irrigation regimes. In addition, it has been proven that the influence of nutrition level and yield on the value of biothermal coefficients for sugar beet is also insignificant. The conclusions made in the article allow us to recommend empirically obtained biothermal coefficients for calculating both the design and operational modes of irrigation of sugar beets cultivated on loamy soils in the eastern part of the Republic of Belarus using any method of regulating moisture supply of the crop (sprinkling, drip irrigation). With the use of biothermal coefficients, we examined the structure of relationship between the seasonal water consumption of sugar beet and the level of nutrition and yield.*

**Key words:** water consumption, NPK, sugar beet yield, biothermal coefficients, maximum air temperature.

Известно, что при управлении орошением сельскохозяйственных культур с использованием результатов расчета водного баланса почвы наиболее сложно определить водопотребление, или так называемое суммарное испарение (эвапотранспирацию) растений, поскольку потребление влаги сельскохозяйственным полем определяется урожайностью, которая в свою очередь зависит от плодородия почвы, уровня агротехники, увлажненности и теплоэнергетических ресурсов приземного слоя

атмосферы. Наличие взаимосвязи названных факторов с водопотреблением растений установлено достаточно давно и впервые в СССР обобщено в капитальном труде классика советской мелиоративной науки А. Н. Костякова, последнее шестое издание которого вышло в 1960 году [1]. Многочисленные результаты подобных исследований, выполненных в условиях неустойчивого и избыточного естественного увлажнения, публиковались во многих научных статьях и монографиях А. М. Алпатьева, С. М. Алпатьева, Н. Н. Иванова, А. Р. Константинова, Е. А. Стельмаха, Н. В. Окулика, В. И. Ольгаренко, И. А. Шарова и других авторов [2–5]. Но в методиках расчета водного баланса орошаемого поля, используемых в Беларуси, до настоящего времени отсутствуют разъяснения по учету количественной связи водопотребления и урожайности, водопотребления и влаготеплообеспеченности вегетационного периода.

Наиболее достоверные данные, которые можно использовать для оценки количественной оценки связи водопотребления сельскохозяйственных культур с условиями их возделывания, можно получить только в процессе проведения полевых экспериментов. Однако для таких опытов требуются большие затраты труда и времени. В связи с этим при установлении режима орошения сельскохозяйственных культур, а также при проектировании оросительных систем и при их эксплуатации для расчета суточного, декадного, месячного и сезонного водопотребления на просторах бывшего СССР традиционно используются установленные по результатам полевых опытов биоклиматические или биотермические коэффициенты. С помощью биоклиматических коэффициентов водопотребление культур связывают с дефицитами влажности воздуха, а биотермические коэффициенты используются для установления связи водопотребления с текущими температурами воздуха (среднесуточными или максимальными за сутки). А при разработке соответствующих расчетных формул обычно ориентируются на некий заданный (плановый) урожай, получаемый при оптимальной влажности почвы, полагая, что можно ограничиться только связью водопотребления с одним из метеофакторов (дефицитом влажности воздуха, среднесуточными или максимальными за сутки температурами воздуха).

Проанализируем известные нам данные о сезонном водопотреблении сельскохозяйственных культур, полученные в Российской Федерации и в Беларуси. Рассмотрим, прежде всего, связь потребления влаги сельскохозяйственным полем с выбранным метеорологическим фактором. В качестве такого фактора, управляющего процессом водопотребления, 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 [6]. Биологические особенности и фазы развития культур учитываются в расчете при помощи соответствующих биотермических коэффициентов, определяющих связь между водопотреблением растений и максимальной температурой воздуха.

Суточное водопотребление сельскохозяйственного поля (орошаемой культуры) определяется по формуле [6, 7]:

$$E_{mi} = K_{ti} t_{m(cp)i}, \quad (1)$$

где  $E_{mi}$  – максимальное водопотребление орошаемой культуры, под которым понимается эвапотранспирация культуры за  $i$ -е (расчетные) сутки при оптимальном увлажнении почвы, мм;  $K_{ti}$  – биотермический коэффициент орошаемой культуры в  $i$ -е сутки, мм/град;  $t_{m(cp)i}$  – осредненная за предыдущую декаду (относительно даты расчета) максимальная суточная температура воздуха, °С.

Биотермические коэффициенты в (1) отражают биологические особенности культуры в разные фазы ее развития и соответствуют приращению водопотребления в данных условиях при повышении максимальной за сутки температуры воздуха на один градус. А осреднение за предыдущую декаду (относительно даты расчета) максимальной суточной температуры воздуха призвано учесть инерционность в реакции растений на изменение внешних условий.

При расчете фактического суточного водопотребления для учета увлажненности корнеобитаемого слоя, характеризуемой почвенными влагозапасами, согласно ТКП [8], вводится коэффициент  $\varphi_i$ , зависящий от уровня увлажненности почвы по отношению к ее наименьшей влагоемкости:

$$E_i = \varphi_i E_{mi}. \quad (2)$$

Определять коэффициент увлажненности почвы ( $\varphi_i$ ) в ТКП предложено по формуле А. П. Лихачевича:

$$\varphi_i = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{W_{HB}}{W_{HI}} - 1 \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $W_{\text{НВ}}$  – влагозапасы расчетного слоя почвы при наименьшей влагоемкости, мм;  $W_{\text{Нн}}$  – начальные влагозапасы при водобалансовом расчете в  $i$ -е сутки, мм.

В основу формулы (1) положена идея учета влияния теплообеспеченности вегетационного периода на водопотребление растений. А с помощью коэффициента увлажнения (3) можно учесть любые варианты увлажнения почвы, начиная от варианта без орошения и заканчивая вариантом с капельным поливом нормами, близкими к суточному водопотреблению орошаемой культуры. Следовательно, уже в самой методике заложена возможность учета влияния на водопотребление растений текущей влаготеплообеспеченности вегетационного периода.

Таким образом, в процессе расчета суточного водного баланса почвы сначала по максимальным температурам воздуха определяется максимальное водопотребление в  $i$ -е сутки при достаточном увлажнении корнеобитаемого слоя, а затем рассчитывается фактическое водопотребление ( $E_i$ ), учитывающее с помощью коэффициента (3) увлажнение почвы в конкретные сутки. Суммируя суточную эвапотранспирацию за всю вегетацию, получают, соответственно, сезонное водопотребление культуры:

$$E = \sum_{i=1}^N E_i, \quad (4)$$

где  $E$  – суммарное водопотребление культуры за вегетационный период, мм;  $N$  – продолжительность вегетационного периода, сут.

Сравнивая формулы (1), (2) и (4) можем записать:

$$E = \varphi_{\text{ср.}} K_{t(\text{ср.})} \sum_{i=1}^N t_{mi}, \quad (5)$$

где  $\varphi_{\text{ср.}}$  – осредненная за вегетацию величина коэффициента, учитывающего увлажненность почвы (зависит от режима орошения и колеблется в пределах 0,95–0,99);  $K_{t(\text{ср.})}$  – осредненная за вегетацию величина биотермического коэффициента орошаемой культуры, мм/град;  $\sum_{i=1}^N t_{mi}$  – сумма максимальных суточных температур воздуха за вегетационный период, °С.

Вместе с тем известно, что сезонное водопотребление культуры напрямую связано с ее урожайностью. Причем эта связь традиционно по предложению А. Н. Костякова в обобщенной форме представляется простейшей линейной функцией [1]:

$$E = K_{\text{В}} Y, \quad (6)$$

где  $E$  – водопотребление культуры за вегетационный период;  $K_{\text{В}}$  – коэффициент водопотребления;  $Y$  – урожай культуры.

Эмпирическая зависимость (6) справедлива в узком диапазоне урожайностей, и не отвечает результатам полевых опытов, охватывающих широкий спектр условий возделывания культур. Поэтому для использования в водобалансовых расчетах предлагаются другие формулы, более точно аппроксимирующие опытные данные. Например, в статье В.И. Ольгаренко и др. [5 – рис. 1, с. 33] зависимость водопотребления моркови от урожая авторы предлагают представлять экспоненциальной функцией:

$$E = b_1 e^{b_2 Y}, \quad (7)$$

где  $b_1, b_2$  – эмпирические коэффициенты.

Заметим, что с учетом известных свойств экспоненциальных зависимостей формулу (7) можем привести к виду:

$$E = E_{\text{min}} e^{b_2 Y}, \quad (8)$$

где  $E_{\text{min}}$  – водопотребление культуры при экстраполяции области снижения урожая до нулевого значения.

Согласно формуле В. И. Ольгаренко (7), водопотребление моркови при нулевом урожае не равно нулю, как в формуле А. Н. Костякова (6). Тот же вывод получен в Беларуси при анализе данных многолетних лизиметрических исследований Н. В. Окулика на Пружанском гидролого-гидрогеологическом стационаре Белорусского НИИ мелиорации и водного хозяйства, проведенных с озимой рожью и картофелем [3]. Эти опыты были направлены на оценку составных элементов водного баланса почвы, включая водопотребление культур при удовлетворительном водном режиме.

В монографии Н. В. Окулика отсутствуют результаты статистической обработки данных и не предложена какая-либо количественная связь водопотребления исследуемых культур с их урожайностями, а лишь на рисунках показаны опытные точки [3 – рис. 10 на с. 87, рис. 18 на с. 157]. Мы отсканировали указанные рисунки и провели обработку приведенных на них опытных точек с использова-

нием стандартной программы «Excel» [9]. Графики, предложенные программой «Excel», показывают, что для аппроксимации опытных точек одинаково успешно можно применить как линейную, так и параболическую функции (рис. 1).

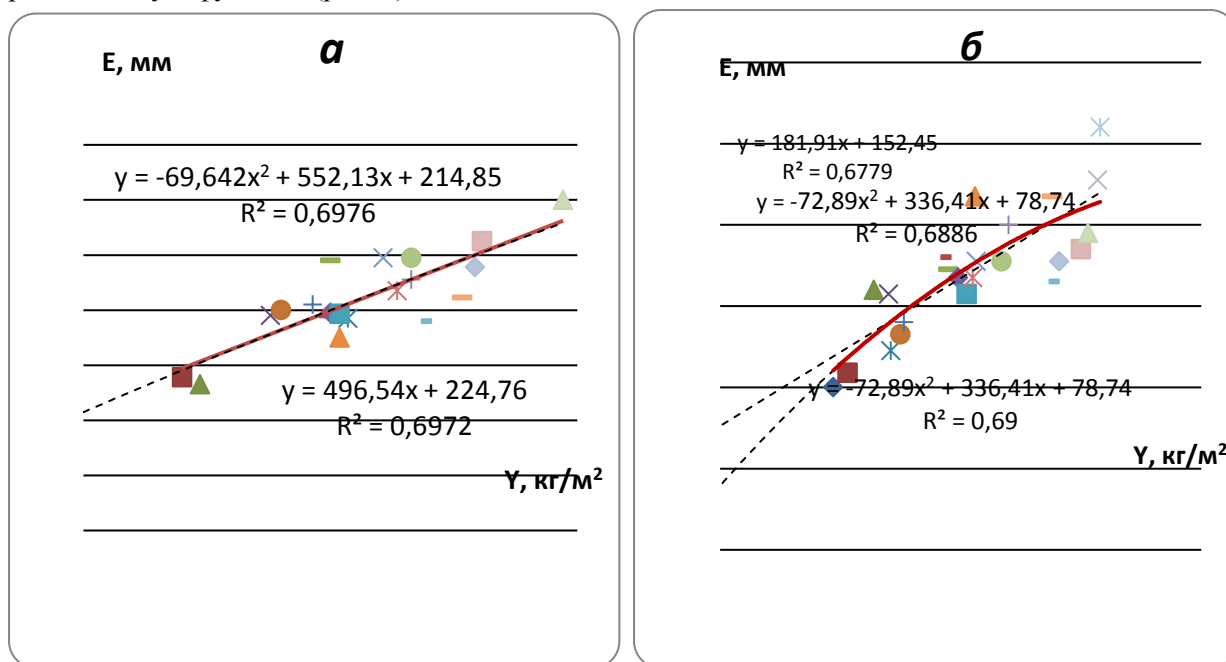


Рис. 1. Зависимость водопотребления озимой ржи (а) и картофеля (б) от урожайности по данным Н. В. Окулика [3]

Данные Пружанского гидролого-гидрогеологического стационара получены в лизиметрических опытах при удовлетворительном водном режиме (на осушенном болоте) и не могут характеризовать все условия. Поэтому для уточнения формы зависимости водопотребления от урожая дополнительно используем результаты проведенных нами в 2017–2019 годы полевых опытов с орошением сахарной свеклы на участке «Тушково-1» Горецкого района Могилевской области Беларуси.

В таблице представлена часть схемы наших опытов с вариантами запланированных режимов орошения и удобрений, по данным которых можно в полной мере проанализировать зависимость водопотребления сахарной свеклы от условий опыта.

**Показатели водопотребления сахарной свеклы при разных вариантах удобрения и режима орошения**

Год	Варианты	Удобрительный фон	NPK, кг д.в./га	Урожай (Y), т/га	Водопотребление (E), мм	E <sub>м</sub> , мм	Ф <sub>ср</sub>	E <sub>ср</sub> , мм³/га	ΣT <sub>м</sub> , °С	Ф <sub>ср</sub> K <sub>в(ср)</sub> , мм/°С	K <sub>в(ср)</sub> , мм/°С	K <sub>в</sub> =E/Y, м³/т
2017	Без орошения	N <sub>90</sub> P <sub>90</sub> K <sub>150</sub>	330	54,7	322,3	348,5	0,925	3223	3040	0,106	0,115	58,9
	Поливы при 0,6 НВ	N <sub>90</sub> P <sub>90</sub> K <sub>150</sub>	330	72,1	340,9	348,5	0,978	3409	3040	0,112	0,115	47,3
	Поливы при 0,7 НВ	N <sub>90</sub> P <sub>90</sub> K <sub>150</sub>	330	105,2	336,7	348,5	0,966	3367	3040	0,111	0,115	32,0
	Поливы при 0,8 НВ	N <sub>90</sub> P <sub>90</sub> K <sub>150</sub>	330	98,7	344,6	348,5	0,989	3446	3040	0,113	0,115	34,9
2018	Без орошения	N <sub>90</sub> P <sub>70</sub> K <sub>150</sub>	310	58,0	345,4	375,9	0,919	3454	3288	0,105	0,114	59,6
	Поливы при 0,6 НВ	N <sub>90</sub> P <sub>70</sub> K <sub>150</sub>	310	73,8	363,2	375,9	0,966	3632	3288	0,110	0,114	49,2
	Поливы при 0,7 НВ	N <sub>90</sub> P <sub>70</sub> K <sub>150</sub>	310	92,7	365,3	375,9	0,972	3653	3288	0,111	0,114	39,4
	Поливы при 0,8 НВ	N <sub>90</sub> P <sub>70</sub> K <sub>150</sub>	310	87,4	372,5	375,9	0,991	3725	3288	0,113	0,114	42,6
2019	Без орошения	N <sub>90</sub> P <sub>100</sub> K <sub>260</sub>	450	71,8	346,0	373,3	0,927	3460	3325	0,104	0,112	48,2
	Поливы при 0,6 НВ	N <sub>90</sub> P <sub>100</sub> K <sub>260</sub>	450	80,2	352,1	373,3	0,943	3521	3325	0,106	0,112	43,9
	Поливы при 0,7 НВ	N <sub>90</sub> P <sub>100</sub> K <sub>260</sub>	450	109,8	358,5	373,3	0,960	3585	3325	0,108	0,112	32,7
	Поливы при 0,8 НВ	N <sub>90</sub> P <sub>100</sub> K <sub>260</sub>	450	96,1	361,2	373,3	0,968	3612	3325	0,109	0,112	37,6

Все показатели, приведенные в таблице, получены с использованием стандартных методик. Значения сезонного водопотребления (E) рассчитывались по зависимостям (1)-(5). Среднегодовой коэф-

фициент увлажнения почвы ( $\phi$ ) определялся как отношение фактической сезонной эвапотранспирации сахарной свеклы ( $E$ ) на каждом варианте опыта к максимальному сезонному водопотреблению ( $E_m$ ), не зависящему от условий увлажнения. Точность расчета контролировалась регулярными (не реже раза в декаду) замерами влажности в корнеобитаемом слое почвы термостатно-весовым способом по вариантам опыта непосредственно в полевых условиях. Ошибка водобалансового расчета определялась по формуле:

$$\delta_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^Z (W_{i \text{ рас.}} - W_{i \text{ изм.}})^2}{Z-1}}, \quad (9)$$

где  $\delta_w$  – среднеквадратическая ошибка, характеризующая точность водобалансового расчета, мм;  $Z$  – количество замеров почвенной влажности в  $i$ -е сутки, которое равнялось количеству используемых в формуле (9) рассчитанных в те же сутки влагозапасов, шт.;  $W_{i \text{ изм.}}$  – влагозапасы в корнеобитаемом слое почвы, установленные термостатно-весовым способом в  $i$ -е сутки, мм;  $W_{i \text{ рас.}}$  – влагозапасы в корнеобитаемом слое, полученные при водобалансовом расчете в те же сутки, мм.

Отметим, что вычисленное по формуле (9) суммарное за три года (2017–2019) среднеквадратическое отклонение рассчитанных почвенных влагозапасов от замеренных в поле составило 6,6 мм. При наименьшей влагоемкости в корнеобитаемом слое в 2017 году 124,5 мм, в 2018–132,9 мм и в 2019 году – 120,8 мм это отклонение соответствует приблизительно 6 % от уровня фактического увлажнения почвы по вариантам опыта, подтверждая достаточно высокую точность совпадения вычисленных влагозапасов с измеренными. Примерно с такой же ошибкой получены и показатели водопотребления сахарной свеклы при разных вариантах удобрения и режима орошения (табл. 1). Заметим, что в подобных водобалансовых расчетах допустимой является ошибка до 10–15 % [10].

Выше отмечено, что эмпирические формулы, соответствующие данным полевых исследований Н. В. Окулика, Е. А. Стельмаха, В. И. Ольгаренко и др. (например, формула (7) и зависимости, приведенные на рис. 1), отличаются от формулы А. Н. Костякова тем, что при нулевом урожае водопотребление не равно нулю, а существенно больше. Для того чтобы обойти возникающее противоречие, мы вынуждены в качестве формального параметра при экстраполяции предлагаемых эмпирических зависимостей в область с очень низкими урожаями (близкими к нулю) ввести в анализ понятие «условно нулевой урожай». Например в формуле (8) – это  $E_{min}$ . Этот урожай мы назвали «условным нулевым», поскольку в результатах известных нам опытов нет урожая, равного или хотя бы близкого нулю. Данную величину ( $E_{min}$ ) можно определить только путем экстраполяции функции, аппроксимирующей опытные точки, до нулевого урожая.

Отметим, что согласно данным полевых исследований Н. В. Окулика (рис. 1), для озимой ржи и картофеля криволинейность связи  $E(Y)$  в условиях Беларуси выражена весьма слабо. На основании этого ранее нами был сделан предварительный вывод, что в границах урожайностей, полученных в многолетних экспериментах при удовлетворительном водном режиме, кривизной функции  $E(Y)$  можно пренебречь, используя для количественной оценки линейную форму зависимости [9]:

$$E = E_{min} + k_B Y, \quad (10)$$

где  $E_{min}$  – водопотребление культуры при условно нулевом урожае (при  $Y=0$ );  $k_B$  – коэффициент наклона прямой, характеризующей рост водопотребления от условно нулевого до фактического урожая;  $Y$  – фактический урожай.

Аналогичным образом проанализируем данные таблицы. На рис. 2(а) показаны построенные по данным таблицы графики зависимости водопотребления сахарной свеклы, возделываемой на легкосуглинистых почвах в восточной части Беларуси, от урожая.

Полученные нами эмпирические зависимости водопотребления сахарной свеклы от урожайности существенно отличаются от графиков на рисунке 1, а именно:

- точки на рис. 2(а) нельзя аппроксимировать одной функцией, каждый год характеризуется своими параметрами зависимости;
- линейная форма связи  $E(Y)$  для 2017 года имеет недопустимо низкий коэффициент детерминации;
- для всех лет наиболее приемлемой при аппроксимации опытных точек оказалась не линейная, а параболическая функция.

Представленные на рис. 1 прямые линии и параболические кривые при условно нулевом урожае для всех лет исследований сходятся в точках, существенно больших нуля. Заметим, что в этих точках водопотребление не зависит ни от плодородия почвы, ни от влаго- и теплообеспеченности года.

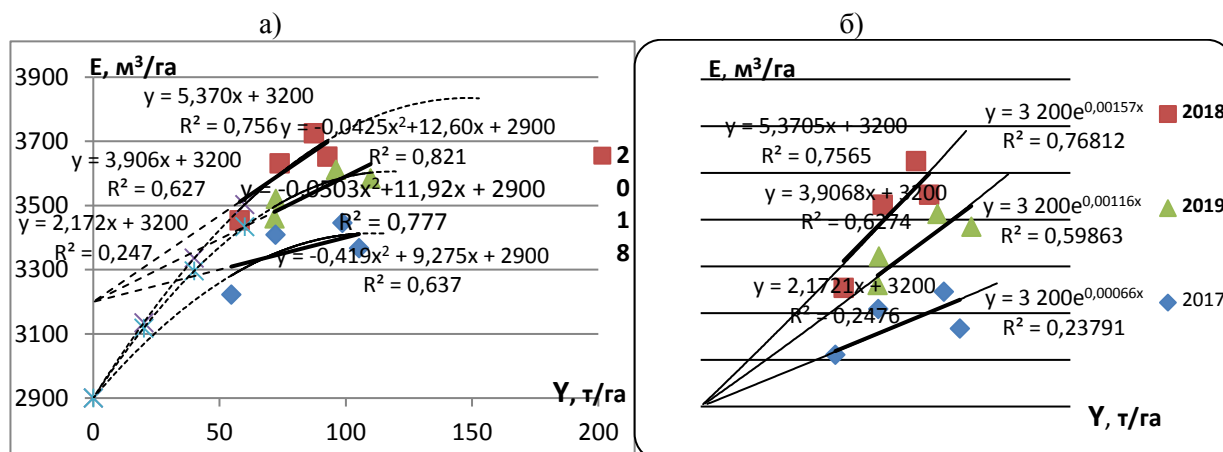


Рис. 2. Зависимости сезонного водопотребления сахарной свеклы от урожайности (а); аппроксимация опытных точек зависимости водопотребления сахарной свеклы от урожайности экспоненциальными функциями (б)

Преимуществом параболических функций, приведенных на рис. 2(а), является также то, что они имеют максимумы, которые в данных конкретных случаях соответствуют максимальным урожаям, соответствующим условиям конкретного года.

Оценим предложение российских ученых представлять зависимость водопотребления культуры от ее урожая с помощью экспоненты [5]. На рис. 2(б) показаны результаты подобной аппроксимации данных таблицы с использованием экспоненциальной зависимости. Как видим, в пределах опытных точек программа «Excel» дает координаты экспоненты почти совпадающие с линейными функциями, показанными здесь жирными прямыми. Причем они совпадают как по графике, так и по показателям тесноты связи (см. рис. 2).

Сравнение графиков, представленных на рис. 2, показывает, что по форме как линейную, так и экспоненциальную функции можно использовать в расчетах только в ограниченном диапазоне урожайностей, поскольку очевидно, что водопотребление культуры при росте урожайности не может возрастать до бесконечности. Априори понятно, что существует какой-то предел росту водопотребления культуры при росте ее урожайности. Поэтому очевидно, что намного точнее зависимость водопотребления от урожайности представляется параболой.

При разработке проектного режима орошения биоклиматические и биотермические коэффициенты определяются, как правило, применительно к проектному урожаю, полученному при фиксированном уровне минерального питания. Нас же интересует вопрос, а как могут изменяться биотермические коэффициенты при изменении режима орошения и доз NPK. На рис. 3(а) показано влияние удобрений на биотермические коэффициенты, учитывающие режим орошения ( $\phi_{cp}, K_{t(cp)}$ ).

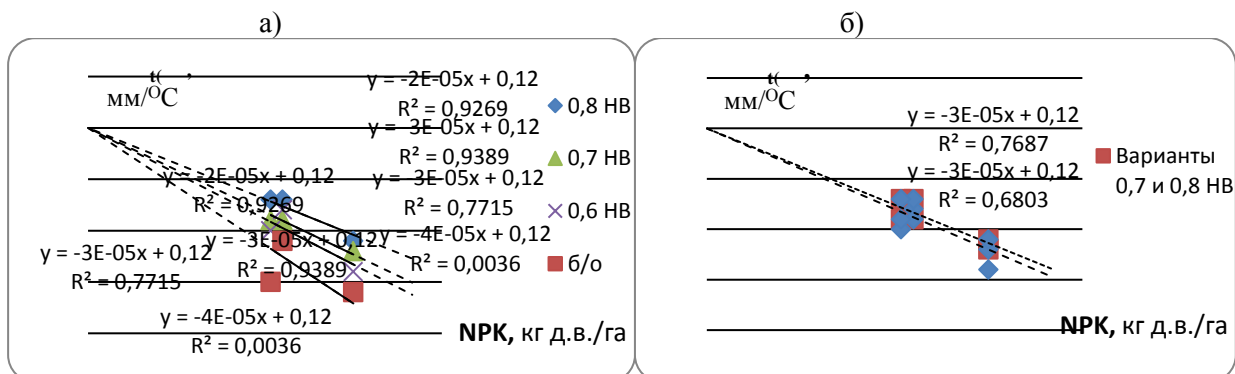


Рис. 3. Зависимость средних за год биотермических коэффициентов сахарной свеклы от доз вносимых удобрений на разных вариантах режима орошения (а); зависимость средних за год биотермических коэффициентов, сахарной свеклы от доз NPK на разных вариантах орошения (б)

Как видим, биотермические коэффициенты, полученные на разных вариантах режима орошения, несколько возрастают по величине с ростом влагообеспеченности сахарной свеклы. При этом повы-

шается теснота связи этих коэффициентов с дозами NPK. Но диапазон их изменения при дозах NPK от 300 до 550 кг д. в./га ограничен на вариантах с орошением весьма небольшими пределами – от 0,105 до 0,113 мм/°С.

Дополнительный анализ графиков, относящихся только к орошаемым вариантам, показывает, что зависимость среднегодовых биотермических коэффициентов сахарной свеклы от доз NPK можно представить одной наклонной прямой, пересекающей ось ординат в точке 0,12 мм/°С (рис. 3(б)).

Более того зависимость водопотребления сахарной свеклы от доз NPK вообще можно пренебречь, сохранив допустимую погрешность результатов водобалансовых расчетов, поскольку аппроксимирующая линейная функция имеет очень небольшой коэффициент наклона (-3E-05х).

Как показывают данные таблицы, проиллюстрированные на рис. 4(а), еще меньший (примерно в 1,5–2,0 раза) коэффициент наклона (-1,72E-05х) аппроксимирующей линейной функции имеет график зависимости биотермических коэффициентов, осредненных за год для всех вариантов опыта, включая варианты с орошением и без него.

Таким образом, согласно данным наших полевых исследований можно утверждать, что при проведении водобалансового расчета зависимостью биотермических коэффициентов сахарной свеклы от доз вносимых удобрений и от полученного урожая можно пренебречь, сохранив достаточную точность выполняемых вычислений. Полученные по данным опыта зависимости скорее отражают тенденцию влияния доз NPK на водопотребление сахарной свеклы, не сказываясь существенно на точности посуточного расчета водного баланса почвы.

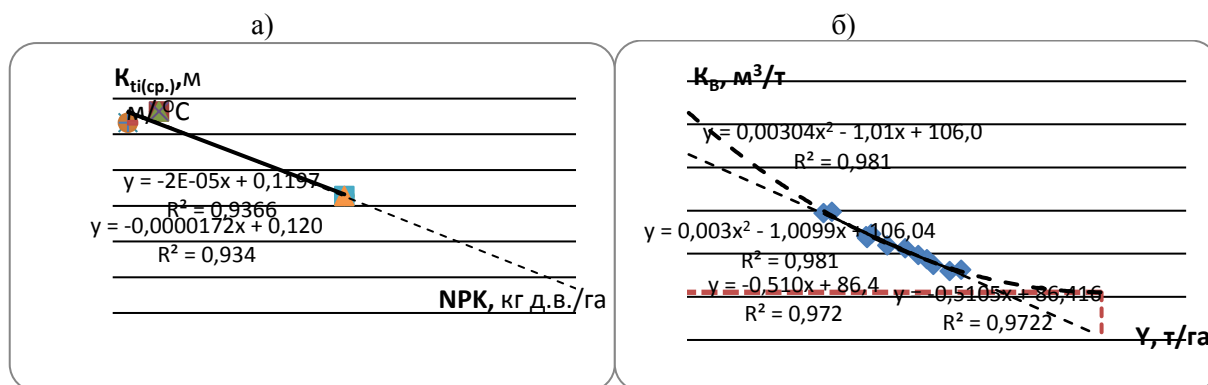


Рис. 4. Зависимость средних за год биотермических коэффициентов от доз вносимых удобрений по данным 3-х летних полевых опытов (а); зависимость коэффициентов водопотребления сахарной свеклы от урожайности культуры (б)

В заключение анализа взаимосвязи показателей, влияющих на водопотребление сельскохозяйственных культур, на примере сахарной свеклы, проиллюстрируем на рис. 4(б) изменение удельного расхода воды на единицу получаемой растениеводческой продукции при росте урожая. Согласно А. Н. Костякову [1]:

$$K_B = E / Y, \quad (11)$$

где  $K_B$  – коэффициент водопотребления культуры (потребление воды на единицу урожая), м<sup>3</sup>/т;  $E$  – водопотребление культуры за вегетационный период, м<sup>3</sup>/га;  $Y$  – урожай культуры, т/га.

Опытные точки на рис. 4(б) с применением стандартной программы «Excel» можно достаточно точно аппроксимировать либо прямой, либо параболической функциями. Но точнее соотносится с результатами опыта именно параболическая зависимость, указывая на существование минимума водопотребления при максимально возможном урожае. Координаты этого минимума можно получить из уравнения параболической функции, приведенной в верхней части рис. 4(б). Для этого согласно правилам математического анализа решим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dy}{dx} = 2 \cdot 0,00304 - 1,01x = 0.$$

Следовательно:

$$Y_{max} = x = 1,01 / (2 \cdot 0,00304) \approx 166 \text{ т/га.}$$

При этом в соответствии с уравнением параболы, приведенном на рис. 4(а), получим:

$$K_{Bmin} = 0,003042 \cdot 166^2 - 1,01 \cdot 166 + 106,0 \approx 22 \text{ м}^3/\text{т.}$$

Координаты минимума водопотребления показаны точкой пересечения двух взаимно перпендикулярных штриховых линий (рис. 4(б)). Как видим, при потенциально возможной урожайности сахарной свеклы, равной в условиях опыта приблизительно 166 т/га, на одну тонну урожая будет расходовано всего около 22 м<sup>3</sup> воды. В то же время, согласно этому же рисунку, при урожае свеклы 55 т/га на одну тонну продукции расходуется 60 м<sup>3</sup> воды, т. е. в 2,7 раза больше.

Заметим, что опытные точки на рис. 4(б) распределены по вертикальной оси координат в диапазоне от 32 до 60 м<sup>3</sup>/т, а по горизонтальной оси в диапазоне от 55 до 110 т/га. Применяв экстраполяцию, можем расширить диапазон урожайностей сахарной свеклы, например, до полученного максимума, т.е. до 166 т/га, охватив достаточно большой спектр условий возделывания.

При таком диапазоне колебаний доз NPK (от 300 до 600 кг д. в./га) и урожаев сахарной свеклы (от 55 до 166 т/га), как показывают полученные в опытах данные, осредненные за год биотермические коэффициенты различаются весьма незначительно, изменяясь в диапазоне 0,110–0,115 мм/°C (рис. 4(а)). Тем самым подтверждается наш вывод не только об отсутствии зависимости биотермических коэффициентов от режимов орошения, но и незначительном влиянии на них условий питания и урожая.

До настоящего времени при расчете водного баланса орошаемого поля водопотребление возделываемой культуры связывалось только с тем режимом орошения, при котором в опытах получен максимальный урожай. Считалось, что для условий, не совпадающих с условиями опыта, требуются новые исследования, на основе которых должны разрабатываться новые рекомендации. Это существенно ограничивало область внедрения предлагаемых режимов орошения. Нами показано, что алгоритм водобалансового расчета, основанный на связи водопотребления сахарной свеклы с максимальной температурой воздуха с использованием коэффициентов увлажнения почвы и установленных опытным путем биотермических коэффициентов, автоматически исключает зависимость результатов расчета от применяемых режимов орошения. Кроме того доказано, что влияние уровня питания и урожая на величину биотермических коэффициентов для сахарной свеклы также незначительно. Сделанные выводы позволяют рекомендовать полученные нами опытным путем биотермические коэффициенты для расчета как проектного, так и эксплуатационного режимов орошения сахарной свеклы, возделываемой на суглинистых почвах в восточной части Республики Беларусь с применением любого способа регулирования влагообеспеченности культуры (дождевание, капельный полив). Для распространения данного вывода на другие регионы требуются дополнительные исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Костяков, А. Н. Основы мелиораций / А. Н. Костяков. – М.: Сельхозгиз, 1960. – 622 с.
2. Стельмах Е. А. Режимы орошения сельскохозяйственных культур на юге Нечерноземной зоны РСФСР / Е. А. Стельмах. – М.: Россельхозиздат. – 1987. – 112 с.
3. Окулик, Н. В. Водный режим и продуктивность почв / Н. В. Окулик. – Минск: Ураджай, 1989. – 191 с.
4. Лихацевич, А. П. Оценка факторов, формирующих неустойчивую влагообеспеченность сельскохозяйственных культур в гумидной зоне (на примере Беларуси, Центрального и Волго-Вятского районов Российской Федерации) / А. П. Лихацевич, Е. А. Стельмах. – Минск: ООО «Полирек», 2002. – 212 с.
5. Нормирование водопотребления сельскохозяйственных культур с учетом изменчивости гидрометеорологических условий / В. И. Ольгаренко [и др.] // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – № 2(30). – 2018. – С. 22–40.
6. 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.
7. Рекомендации по управлению дождеванием в производственных условиях / А. С. Анженков [и др.]; РУП «Институт мелиорации. – Минск, 2020. – 40 с.
8. Оросительные системы. Правила проектирования: ТКП/ПР 45-3.04.2009 (02250). – Введ. 29.12.2009. – Минск, 2010. – 74 с.
9. Лихацевич, А. П. Зависимость водопотребления сельскохозяйственных культур от урожайности / А. П. Лихацевич, А. П. Латушкина, С. В. Набздоров // Мелиорация. – 2018. – № 3(85). – С. 17–23.
10. Прошляков, И. В. Испарение / И. В. Прошляков // Мелиоративная энциклопедия. М.: ФГНУ «Росинформагротех». – 2003. – Т. 1 (А-К). – С. 577.