

## РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА ПОЧВЫ ПОД МНОГОЛЕТНИМИ ТРАВАМИ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

*И. А. Романов<sup>1</sup>, ассистент*

*А. П. Лихачевич<sup>2</sup>, доктор технических наук*

*Г. В. Латушкина<sup>2</sup>, кандидат технических наук*

<sup>1</sup>УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», г. Горки, Беларусь

<sup>2</sup>РУП «Институт мелиорации», г. Минск, Беларусь

### Аннотация

Расчет элементов водного баланса почвы под многолетними травами проведен по данным, полученным на опытном участке оросительного комплекса «Тушково» (УО «БГСХА») с уклоном поверхности почвы, изменяющимся в пределах 0,023–0,027. Наименьшая ошибка водного баланса получена при расчете водопотребления многолетних трав по максимальным температурам воздуха и биотермическим коэффициентам, установленным на основе физического принципа баланса причинно-следственных взаимодействий в замкнутой физической системе и не зависящим от способа использования травостоя (зеленая масса, сенаж, сено, пастбище). Установлено, что при указанных значениях уклона поверхности поверхностный сток необходимо учитывать только на вершине склона и на расстоянии по уклону приблизительно до 50 м. На участках, расположенных ниже по склону, поверхностным стоком как расходным элементом водного баланса при возделывании многолетних трав можно пренебречь. Такое ограничение объясняется тем, что при дожде (или поливе) дополнительно в почву инфильтруется примерно столько же воды, притекающей с вышерасположенной части склона, сколько ее убывает с поверхностным стоком ниже по склону.

**Ключевые слова:** многолетние травы, водопотребление, поверхностный сток, водобалансовый расчет, математическое моделирование.

### Abstract

*I. A. Romanov, A. P. Likhatchevich, G. V. Latushkina*

### CALCULATION OF SOIL WATER BALANCE ELEMENTS UNDER PERENNIALGRASSES UNDER DIFFICULT CONDITIONS

The calculation of the elements of water balance of the soil under perennial grasses was carried out according to the data obtained at the experimental site of the irrigation complex «Tushkovo» (Belarusian State Agricultural Academy) with a soil surface slope varying within 0.023–0.027. The smallest error was obtained when calculating the water consumption of perennial grasses according to the maximum air temperatures and biothermal coefficients established on the basis of the physical principle «balance of cause-and-effect interactions in a closed physical system», independent of the method of grass stand use (green mass, haylage, hay, pasture). The analysis showed that with given indicators of surface slopes, surface runoff should be taken into account only at the top of the slope and at a distance along the slope of up to approximately 50 m. In areas located down the slope, surface runoff, as a consumable element of the water balance, can be neglected when cultivating perennial grasses. This limitation is explained by the fact that during rain (or irrigation), about the same amount of water inflowing from the higher part of the slope additionally infiltrates into the soil, as it decreases with surface runoff down the slope.

**Keywords:** perennial grasses, water consumption, surface runoff, water balance calculation, mathematical modeling.

### Введение

Обычно в методиках водобалансового расчета почвенных влагозапасов традиционно ориентируются на календарный декадный интервал (10–11 суток). Именно к этому интервалу привязываются все элементы водного баланса, включая водопотребление орошаемых культур. Однако на практике пользоваться декадными биотермическими коэффициентами не совсем удобно применительно к многолетним травам (сенокос, пастбище и др.),

поскольку сроки проведения уборки зеленой массы (укосов или стравливаний при пастбищном использовании травостоя) по годам различаются, сдвигаясь на несколько суток в ту или иную сторону, причем часто со сменой декады. Кроме того, в производственных условиях на одних и тех же участках могут применяться разные способы и сроки заготовки травяного корма (сено, сенаж, зеленая масса на откорм при стойловом содержании крупного рогатого

скота). В зависимости от различных производственных обстоятельств могут меняться количество укосов и очередность уборки трав по площади.

В связи с этим возникает проблема в определении одного из основных элементов водного баланса – водопотребления многолетних трав, без учета которого целенаправленное управление водным режимом орошаемой культуры невозможно. Привязка биоклиматических или биотермических коэффициентов водопотребления к календарным декадам здесь явно не подходит.

### Методика проведения опыта

Опыт заложен в 2017 г. Структура многолетних трав состояла из бобово-злаковой травосмеси. Фон удобрений на всех вариантах опыта составлял  $P_{60}K_{90}$ . Использование травостоев в 2018–2019 гг. – трехукосное со скашиванием в фазу цветения бобового элемента и колошения злаковых; в 2020 г. – без орошения, с имитацией уборки на зеленую массу для откорма крупного рогатого скота при стойловом содержании.

Норма высева рассчитана по И. В. Ларину. Посев многолетних трав выполнялся в апреле 2017 г. сеялкой СПУ-6 под покров ярового ячменя, уборка которого проведена в конце июля. Поэтому 2017 г. был исключен из анализа, а в расчетах использовались трехлетние данные с полным периодом вегетации травостоя (2018–2020).

Опытный участок расположен на склоне с переменным уклоном, причем варианты и повторности опыта располагались так, чтобы уклон поверхности почвы на опытных делянках существенно не различался и колебался в пределах 0,023–0,027. Вариант без орошения (контрольный) расположен у вершины склона (рис. 1).

Цель исследования – изучение влияния диапазона колебаний почвенной влажности на водопотребление многолетних трав. Первый вариант дождевания (РО-1), расположенный ниже по склону по сравнению с контрольным вариантом (без орошения), ориентирован на предполивную влажность 70 % НВ, но допускал кратковременное снижение почвенной влажности в корнеобитаемом слое почвы при вегетации третьего укоса до 50 % от наименьшей влагоемкости.

Особенно усложняется водобалансовый расчет при наличии на участке поверхностного стока. На наш взгляд, использование для его определения отдельно устроенных стоковых площадок нарушает протекание процессов инфильтрации и стока воды по поверхности почвы с растительностью в виде многолетних трав. Для выделения объема поверхностного стока из уравнения водного баланса мы использовали данные инструментального контроля за динамикой почвенных влагозапасов на опытном участке в течение вегетационных периодов 2018–2020 г.г.

Второй вариант дождевания (РО-2) расположен по склону ниже варианта РО-1 и ориентирован на предполивную влажность 80 % НВ, но допускал кратковременное снижение почвенной влажности в корнеобитаемом слое почвы до 40 % от наименьшей влагоемкости при вегетации второго укоса. Таким образом имитировался производственный полив с возможными сбоями в его проведении, что существенно может усложнять реализацию технологии полива, основанной на водобалансовом расчете динамики почвенных влагозапасов.

Повторность каждого варианта опыта трехкратная. Ширина одной повторности 3 метра, длина 30 м, причем длинная сторона делянки расположена вдоль склона. Учетная площадь делянок составляет 90 м<sup>2</sup>.

Определение сроков начала поливов выполнялось с помощью водобалансовых расчетов и контролировалось послойным измерением фактических влагозапасов почвы термостатно-весовым способом. Дождевание производилось позиционно, по сектору в утренние часы, чтобы уменьшить снос искусственного дождя ветром. Точность выдачи поливной нормы контролировалась осадкомерами.

Водно-физические свойства почвы определялись по стандартным методикам: наименьшая влагоемкость почвы – методом залива площадок; плотность почвы – методом режущего кольца; плотность твердой фазы – пикнометрическим методом; пористость почвы – расчетным путем; гранулометрический состав – ареометрическим методом.

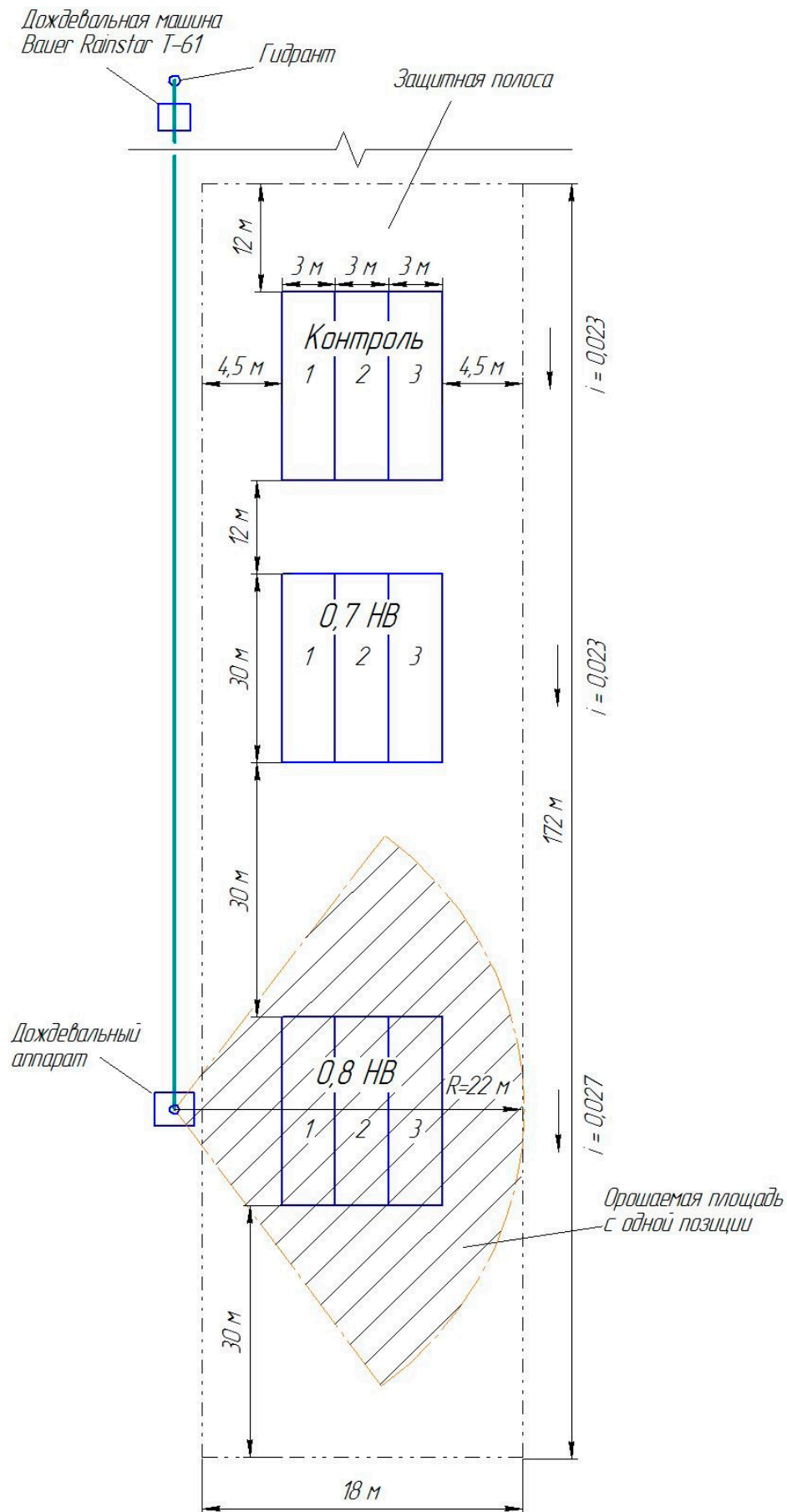


Рис. 1. Схема орошения многолетних трав

Пробы почвы на влажность на опытных площадках отбирались по слоям 0–10, 10–20, 20–30, 30–40 см с помощью почвенного бура. Влажность почвы определялась термостатно-весовым способом с использованием технических весов ВК-600 для взвешивания почвенных образцов и сушильного шкафа-термостата для их сушки. Максимальная температура воздуха измерялась метеорологическим термометром ТМ-1, атмосферными осадки – почвенными дождемерами ГР-28. Максимальная температура воздуха и атмосферные осадки измерялись ежедневно в 19 часов на метеопосту, расположенном на границе орошаемого участка.

**Водный баланс почвы.** Уравнение водного баланса, используемое для управления орошением сельскохозяйственных культур, состоит из приходной и расходной групп элементов. Приходная группа повышает содержание влаги в почве. К основным элементам этой группы водного баланса на автоморфных почвах с глубоким залеганием грунтовых вод относятся атмосферные осадки и поливы. Расходная часть водного баланса включает водопотребление культуры (эвапотранспирация), внутрипочвенный и поверхностный стоки влаги за пределы расчетного слоя. Итоговым показателем водного баланса орошаемого участка является количество влаги, содержащееся в заданном слое почвы на конец расчетного интервала:

$$W_k = W_n + (P + m) - (E + C + G), \quad (1)$$

где  $W_k$  – запасы влаги в почве на конец расчетного интервала;  $W_n$  – влагозапасы в почве в начале расчетного интервала;  $P$  – атмосферные осадки;  $m$  – поливы;  $E$  – водопотребление (эвапотранспирация) орошаемого поля;  $C$  – внутрипочвенный сток влаги за пределы расчетного слоя;  $G$  – поверхностный сток влаги за пределы участка.

Чтобы обеспечить высокую точность расчета по (1), начальные почвенные влагозапасы (в начале водобалансового расчета) замерялись непосредственно в поле, а продолжительность расчетного интервала составляла одни сутки [1]. Атмосферные осадки контролировались в соответствии с методиками гидрометеослужбы с помощью дождемера. Для определения поливных норм использовались стандартные методики расчета, а для контроля – мерные сосуды [2–4].

Основная сложность состоит в определении расходных элементов водного баланса. Для расчета внутрипочвенного стока нами использовалась формула, полученная по данным полевого опыта [5]:

$$C = (W_n - E_m - W_{нв}) \left( \frac{t}{T} \right)^\alpha + P \left( \frac{t}{T} \right)^b, \quad (2)$$

где  $P$ ,  $E_m$  – впитавшиеся в почву атмосферные осадки и максимальная эвапотранспирация, наблюдающаяся при насыщении почвы влагой до наименьшей влагоемкости, суммируемые за расчетный интервал продолжительностью  $t$ ;  $W_{нв}$  – наименьшая влагоемкость заданного (расчетного, корнеобитаемого) слоя почвы, мм;  $t$  – продолжительность расчетного интервала, изменяющаяся в диапазоне времени  $0 < t < T$ , сут;  $\alpha$ ,  $b$  – показатели, характеризующие, соответственно, водоудерживающую способность почвы и интенсивность выпавшего дождя (безразмерные величины);  $T$  – продолжительность полного стекания гравитационной влаги из корнеобитаемого слоя после заполнения водой всех почвенных пор при отсутствии подпора от капиллярной каймы грунтовых вод, сут. В уравнении (2) наименьшая влагоемкость ( $W_{нв}$ ) измеряется, как и другие элементы водного баланса почвы, в мм.

Продолжительность полного стекания гравитационной влаги из корнеобитаемого слоя ( $T$ ) устанавливается для любой почвы на основе стандартной методики определения наименьшей влагоемкости. Эта продолжительность зависит от типа почвы и плотности ее сложения (например, 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 по гранулометрическому составу почв рыхлого сложения; 4–5 суток для средних по грансоставу почв средней плотности; 5–6 суток для средних по грансоставу уплотненных почв; 6–7 суток и более для тяжелых почв) [6].

Водопотребление растений сложно измерить, поэтому его тоже вычисляют по косвенным показателям. Для этого обычно используется известный биоклиматический метод расчета водопотребления по среднесуточным дефицитам влажности, или среднесуточным, или максимальным за сутки температурам воздуха. Биологическая составляющая при этом учитыва-



ется через вводимые в расчетные формулы так называемые биоклиматические или биотермические коэффициенты. В наших исследованиях водопотребление растений увязывалось с максимальными за сутки температурами воздуха, для чего использовались соответствующие биотермические коэффициенты [2–4].

С учетом расположения вариантов опыта на участке с уклоном поверхности почвы в пределах 0,023–0,027 в уравнении водного баланса (1) присутствует поверхностный сток, алгоритм определения которого будет приведен ниже. Вначале уточним методику расчета водопотребления многолетних трав.

**Расчет водопотребления многолетних трав.** В качестве фактора, управляющего процессом водопотребления многолетних трав, мы использовали максимальную за сутки температуру воздуха, поскольку этот метеопараметр не только достаточно точно отражает влияние испаряющей способности приземного слоя атмосферы на растения, но и наиболее легко контролируется в производственных условиях, что особенно важно при управления орошением. Биологические особенности развития культур учитываются здесь соответствующими биотермическими коэффициентами, рассчитанными по максимальным за сутки температурам воздуха. Расчет велся посуточно по формуле:

$$E_i = 0,1\varphi_i K_{ii} \sum_{i=9}^i t_i, \quad (3)$$

где  $E_i$  – водопотребление многолетних трав за  $i$ -е сутки, мм;  $\varphi_i$  – коэффициент, учитывающий увлажненность почвы в  $i$ -е сутки;  $K_{ii}$  – биотермический коэффициент  $i$ -х суток, вычисленный по максимальным суточным температурам воздуха, мм/°С;  $\sum_{i=9}^i t_i$  – сумма максимальных суточных температур воздуха за расчетные ( $i$ -е) сутки и 9 суток, предыдущих расчетным, °С.

Коэффициент, учитывающий увлажненность почвы, вычислялся по формуле А. П. Лихачевича:

$$\varphi_i = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{W_{\text{НВ}}}{W_{i-1}} - 1 \right)^2 \right], \quad (4)$$

где  $W_{\text{НВ}}$  – наименьшая влагоемкость расчетного слоя почвы, мм;  $W_{i-1}$  – влагозапасы почвы в сутки, предыдущие расчетным ( $i$ -м), то есть начальные влагозапасы  $i$ -х суток.

Сложность расчета водопотребления многолетних трав состоит в определении их биотермических коэффициентов, поскольку уборка многолетних трав в течение вегетации в разные годы производится в разные сроки. Для решения указанной проблемы нами выполнена количественная оценка результатов водобалансовых расчетов с использованием при определении водопотребления трав биотермических коэффициентов, установленных на основе физического принципа баланса причинно-следственных взаимодействий в замкнутой физической системе.

В качестве одного из возможных и наиболее простых вариантов данной связи предлагаем уравнение в частных производных, вытекающее из математического выражения данного физического принципа, представленного в работе [7] и используемого при построении полуэмпирических уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial r_i} &= \left[ \frac{\mu(k - k_{\min})}{r_i(k_{\max})} \right] \frac{r_i(k_{\max}) - r_i}{r_i(k_{\max})} = \\ &= \mu(k - k_{\min}) \frac{r_i(k_{\max}) - r_i}{[r_i(k_{\max})]^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $k$  – изменяемое в процессе вегетации многолетних трав (текущее) значение биотермического коэффициента;  $\mu$  – показатель, учитывающий форму биологической кривой;  $k_{\min}$  – минимальное значение биотермического коэффициента;  $k_{\max}$  – максимальная величина биотермического коэффициента;  $r_i$  –  $i$ -я характеристика окружающей среды, влияющая на развитие и урожайность культуры;  $r_i(k_{\max})$  – фиксированное значение  $i$ -й характеристики окружающей среды, при которой биотермический коэффициент достигает максимума.

Решением дифференциального уравнения (5) является функция:

$$\begin{aligned} k &= k_{\min} + (k_{\max} - k_{\min}) \times \\ &\times \prod_{i=1}^{i=n} \exp \left[ -\frac{\mu}{2} \left( 1 - \frac{r_i}{r_i(k_{\max})} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где  $n$  – количество учитываемых характеристик окружающей среды.

Уравнение (6) может содержать неограниченное количество характеристик окружающей среды, влияющих на развитие растений в процессе их вегетации, которое количественно

выражается через изменение биотермического коэффициента. Главное условие при подборе аргументов в функцию (6) состоит в том, чтобы выбранные характеристики были независимы друг от друга.

Весьма подробный анализ зависимости биологических (биоклиматических, биотермических) коэффициентов водопотребления сельскохозяйственных культур от характеристик окружающей среды, влияющих на развитие растений в процессе их вегетации, приведен в монографии В. И. Вихрова. Со ссылкой на результаты изысканий разных авторов исследователем сделан вывод, что «...темпы и фазы развития растений более надежно определяются соответствующими суммами накопленных температур воздуха» [8, с. 29–30].

Помимо того, многолетние травы в процессе накопления биомассы используют почвенную влагу и растворенные в ней питательные элементы в соответствии с характерной для них биологической кривой, имеющей колоколообразную форму, которую можно увязать с прошедшим от начала вегетации количеством суток, начиная от первоначальной даты водобалансового расчета.

С учетом сказанного, выберем в качестве аргументов функции (6), во-первых, номер расчетных суток, накопление которых от начала вегетации культуры характеризует изменение потребности растений в почвенной влаге, во-вторых, сумму максимальных (можно среднесуточных) температур воздуха, накопленных от начала водобалансового расчета:

$$k = k_{\min} + (k_{\max} - k_{\min}) \times \exp \left[ -\frac{\mu_N}{2} \left( 1 - \frac{N}{N(k_{\max})} \right)^2 - \frac{\mu_t}{2} \left( 1 - \frac{t}{t(k_{\max})} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где  $\mu_N$  – показатель влияния номера расчетных суток на форму биотермической кривой;  $\mu_t$  – показатель влияния на форму биотермической кривой максимальных (или среднесуточных) температур воздуха, накопленных от начала водобалансового расчета;  $N(k_{\max})$  – фиксированное значение номера расчетных суток от начала водобалансового расчета, при котором биотермический коэффициент достигает максимума;  $N$  – текущий номер расчетных суток от начала водобалансового расчета;  $t(k_{\max})$  – фиксированное значение суммы максимальных (или среднесуточных) температур воздуха,

накопленных от начала водобалансового расчета, при которой биотермический коэффициент достигает максимума;  $t$  – текущее на расчетную дату значение суммы максимальных (или среднесуточных) температур воздуха, накопленной от начала водобалансового расчета.

Если в качестве фактора, управляющего водопотреблением многолетних трав, выбрать только номер расчетных суток, накопление которых характеризует изменение потребности растений в почвенной влаге в процессе вегетации, или только сумму максимальных (или среднесуточных) температур воздуха, накопленных от начала водобалансового расчета, получим:

$$k = k_{\min} + (k_{\max} - k_{\min}) \times \exp \left[ -\frac{\mu_N}{2} \left( 1 - \frac{N}{N(k_{\max})} \right)^2 \right], \quad (8)$$

и

$$k = k_{\min} + (k_{\max} - k_{\min}) \times \exp \left[ -\frac{\mu_t}{2} \left( 1 - \frac{t}{t(k_{\max})} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Проверка полученных расчетных формул выполнена нами по данным полевых исследований в 2018–2020 гг. на оросительном комплексе «Тушково-1» (УО «БГСХА»).

#### **Точность расчета водопотребления многолетних трав по формулам (7)–(9).**

Первый вариант водобалансовых расчетов проведен без учета поверхностного стока. Полученные результаты сравнивались между собой. В качестве критерия сравнения использовались среднеквадратичные (стандартные) и среднеарифметические отклонения, вычисляемые по известным формулам:

$$\delta_{\text{ст.}} = \sqrt{\frac{\sum_1^z (W - W_{\text{изм.}})^2}{z - 1}}, \quad (10)$$

где  $\delta_{\text{ст.}}$  – стандартное (среднеквадратичное) отклонение влагозапасов ( $W$ ), вычисленных на дату отбора почвенных образцов, от измеренных термовесовым способом по отобранному почвенным образцам ( $W_{\text{изм.}}$ ), мм;  $z$  – количество измеренных в поле значений влагозапасов, участвующих в определении стандартного отклонения;

$$\delta_{\text{ср.}} = \frac{1}{z} \sum_1^z (W - W_{\text{изм.}}), \quad (11)$$

где  $\delta_{\text{ср.}}$  – среднеарифметическое отклонение влагозапасов ( $W$ ), вычисленных на дату отбора почвенных образцов, от измеренных термовесовым способом по отобранным почвенным образцам ( $W_{\text{изм.}}$ ), мм.

Ранее нами было установлено, что в условиях опыта водобалансовый расчет по среднеукусным биотермическим коэффициентам

дал стандартное (среднеквадратичное) отклонение 9,6 мм, а по средневегетационному – в пределах от 11,4 до 12,8 мм [8]. В табл. 1 приведены среднеарифметические и среднеквадратичные отклонения между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными по биотермическим коэффициентам, установленным по формулам (7)–(9) без учета поверхностного стока в уравнении водного баланса.

**Таблица 1. Отклонения между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными по уравнению водного баланса (без учета поверхностного стока), мм**

Год	z, шт.	Среднеарифметические			Среднеквадратичные		
		Контроль	PO-1	PO-2	Контроль	PO-1	PO-2
Расчет по формуле (7) – $k = f(N, t)$							
2018	22	8,5	–3,6	1,6	11,9	9,0	6,1
2019	18	11,1	–1,0	4,6	13,6	6,9	8,7
2020	17	11,1	–2,6	–1,3	10,6	8,4	7,2
Среднее по варианту		10,2	–2,4	1,6	12,0	8,1	7,3
Среднее по опыту за 3 года +3,1 мм					Среднее по опыту +9,1 мм		
Расчет по формуле (8) – $k = f(N)$							
2018	22	7,1	–5,1	0,1	11,0	10,1	6,7
2019	18	9,9	–2,2	3,7	13,0	7,2	8,5
2020	17	8,8	–2,4	0,1	13,9	6,9	7,3
Среднее по варианту		8,6	–3,2	1,3	12,6	8,1	7,5
Среднее по опыту за 3 года +2,2 мм					Среднее по опыту +9,4 мм		
Расчет по формуле (9) – $k = f(t)$							
2018	22	7,5	–4,6	0,7	11,2	9,5	6,6
2019	18	10,4	–1,7	4,1	13,5	7,3	8,6
2020	17	8,0	–3,2	–0,7	12,8	7,7	7,5
Среднее по варианту		8,6	–0,2	1,4	12,5	8,2	7,6
Среднее по опыту за 3 года +2,3 мм					Среднее по опыту +9,4 мм		

Как видим, наименьшее среднеквадратичное отклонение (9,1 мм) получено при расчете биотермических коэффициентов по формуле (7), которая учитывает два фактора: номер расчетных суток, накопление которых характеризует изменение потребности растений в почвенной влаге в процессе вегетации, и сумму максимальных температур воздуха, накопленных от начала водобалансового рас-

чета до расчетных дат. Расчет по формуле (8) дал результат с несколько большей ошибкой расчета (9,4 мм), близкий к полученному при расчете водопотребления многолетних трав по среднеукусным биотермическим коэффициентам (9,6) [9]. При использовании в водобалансовом расчете формулы (9) средняя ошибка также составила 9,4 мм. Что касается точности определения среднеквадратичных

отклонений, можно считать, что ошибки водобалансового расчета (без учета поверхностного стока) по среднеукосным биотермическим коэффициентам (если ориентироваться только на трехукосное использование травостоя) и по предложенным нами формулам, сообразующимся с любым использованием травостоя, практически совпадают.

Таким образом, расчет почвенных влагозапасов по уравнению водного баланса даже без учета поверхностного стока при определении водопотребления многолетних трав при их смешанном использовании (сенокос, пастбище и др.) с применением любой из расчетных формул (7)–(9) дает ошибку в пределах 9,1–9,4 мм, которая примерно соответствует точности водобалансового расчета по среднеукосным биотермическим коэффициентам при трехукосном использовании травостоя (9,6 мм) [9]. Вместе с тем анализ среднеарифметических превышений вычисленных значений почвенных влагозапасов над измеренными на варианте без орошения (контроле) во все годы исследований (табл. 1) показывает, что на варианте, расположенном у вершины склона, явно присутствует поверхностный сток, причем его величина может достигать значительной части выпавшего дождя. Это не позволяет игнорировать данный элемент водного баланса при расчете динамики почвенных влагозапасов.

Заметим, что на варианте РО-1 наблюдалась обратная картина. Во все годы исследований в почву на середине склона поступало воды больше, чем выпадало с дождем (табл. 1). В свою очередь, в нижней части склона (вариант РО-2) положение стабилизировалось и различия между вычисленными и замеренными почвенными влагозапасами колебались в пределах ошибки измерений.

Таким образом, исследования показали, что при выпадении дождя на опытное поле поток воды, помимо перемещения вниз по склону, частично инфильтруется, и эта часть поступающей в почву воды в условиях опыта приблизительно через 50 м компенсирует поверхностный сток.

**Учет поверхностного стока.** Согласно результатам представленного выше анализа, поверхностный сток будем учитывать в уравнении водного баланса только на контрольном

варианте, расположенном в верхней части склона (рис. 1, вариант без орошения). В простейшем алгоритме расчета уравниваем интенсивности атмосферных осадков и поливов в течение всего вегетационного периода и примем поверхностный сток равным только некоторой доле от атмосферных осадков. Эту долю определим, как и при расчете водопотребления, на основе физического принципа баланса причинно-следственных взаимодействий в замкнутой физической системе [7]. В качестве одного из наиболее простых вариантов данной связи предлагаем простейшее уравнение для условий нашего опыта:

$$\frac{d(G/P)}{di} = \beta \frac{G/P}{i}, \quad (12)$$

где  $G$  – поверхностный сток влаги за пределы участка, мм;  $P$  – количество воды, поступившей на поверхность почвы (атмосферные осадки, а при проведении орошения поливная норма), мм;  $i$  – уклон поверхности почвы, по которой идет сток (безразмерная величина);  $\beta$  – показатель, учитывающий впитывающую способность почвы, по которой идет поверхностный сток (безразмерная величина).

Решением дифференциального уравнения (12) будет формула

$$G/P = i^\beta, \quad (13)$$

где  $G/P$  – доля поверхностного стока от количества воды, поступившей на поверхность почвы (безразмерная величина).

Из (13) следует, что

$$G = P i^\beta. \quad (14)$$

Заметим, что в опытах, проведенных в подобных условиях, для расчета поверхностного стока, вызванного орошением многолетних трав на участке, расположенном в средней части склона на местности с уклоном 0,002, Д. В. Яланским предложена формула

$$G = am + b, \quad (15)$$

где  $m$  – поливная норма;  $a$ ,  $b$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от интенсивности дождя.

В формуле Д. В. Яланского эмпирические коэффициенты, зависящие от интенсивности дождя, ориентированы на конкретный уклон опытного участка при изменяющейся интенсивности дождя [10]. Вторым ограничением формулы (15) является наличие поверхностного стока при полном отсутствии полива (при  $m = 0$ ,  $G = b$ ), из чего следует необходимость



введения границ, внутри которых можно использовать данную формулу в расчетах.

Вполне очевидно, что поверхностный сток зависит не только от величины поливной нормы, но и от величин выпадающих атмосферных осадков. Формула (14) учитывает данный факт. Вместе с тем в (14) также присутствует серьезное упрощение. Основным ее ограничением является указанное выше уравнивание интенсивностей атмосферных осадков и поливов в течение всего вегетационного периода. Кроме того, главная сложность использования полученного уравнения (14) состоит в определении показателя  $\beta$ , учитывающего впитывающую способность почвы, по которой имеет место поверхностный сток. Но заметим, что в формуле (2), предложенной для расчета внутрипочвенного стока, присутствует показатель водоудерживающей способности почвы ( $\alpha$ ). Если рассматривать эти показатели в совокупности (почвенные поры, удерживающие влагу при насыщении до уровня НВ, и остающийся объем пор для впитывания поступающей влаги сверх НВ), то можно предположить, что относительные показатели  $\alpha$  и  $\beta$  в сумме должны быть равны единице. Следовательно,

$$\beta = 1 - \alpha. \quad (16)$$

Для суглинистых почв  $\alpha = 0,5$ . Значит,  $\beta = 1 - 0,5 = 0,5$ , и в нашем случае при уклоне поверхности почвы опытного участка в среднем 0,025 определим:

$$G/P = i^{(1-\alpha)} = 0,025^{0,5} = 0,16. \quad (17)$$

Проверим полученную долю (17) поверхностного стока от количества воды, поступившей на поверхность почвы, используя ее в разных вариантах водобалансового расчета и методом подбора, находя минимальную величину стандартного (среднеквадратичного) отклонения.

В табл. 2 приведены полученные указанным образом из разных вариантов расчета наименьшие среднеарифметические и среднеквадратичные отклонения между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными по уравнению (1). Водопотребление определялось по биотермическим коэффициентам, рассчитанным по формулам (7)–(9). Поверхностный сток на контрольном варианте, расположенном в верхней части склона, получен также путем минимизации стандартного (среднеквадратичного) отклоне-

ния; он оказался близким к 16 % от величины выпадающих атмосферных осадков.

Как видим, результаты подбора и расчета (17) совпали, что подтверждает справедливость полученных нами формул (2) и (14). Именно при равенстве (17) водобалансовый расчет дает минимальное отклонение рассчитанных величин почвенных влагозапасов от измеренных в поле. Данное совпадение подтверждает возможность уравнивания интенсивностей атмосферных осадков и поливов в течение всего вегетационного периода, что принято при выводе формулы (14).

Данные табл. 2 показывают, что учет поверхностного стока в уравнении водного баланса (1) на контрольном варианте, расположенном в верхней части склона, позволяет резко уменьшить расхождения между вычисленными и измеренными влагозапасами. Среднеквадратичные отклонения между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными по уравнению водного баланса, снизились от 9,1 до 7,2 мм. Полученный результат даже лучше, чем при расчете водопотребления многолетних трав 3-укосного использования по декадным биотермическим коэффициентам (7,9 мм) [9] и практически не зависит от того, учитывается ли при расчете водопотребления один фактор – формулы (8), (9) – или два фактора – формула (7).

Установленные по данным трехлетних опытов (2018–2020) опорные показатели биотермических коэффициентов для многолетних трав при любых способах использования травостоя в течение весенне-летне-осеннего периода (на сено, сенаж, зеленую массу для откорма при стойловом содержании крупного рогатого скота) для формул (7)–(9) приведены в табл. 3.

Исходя из данных табл. 3, можем рекомендовать использовать при расчете водопотребления многолетних трав простейшую формулу (8), в которой биотермические коэффициенты не зависят от температурных условий года и определяются только номером расчетной даты, начиная от 21 апреля (начало вегетации) с нулевым номером начальной даты.

На рис. 2 показано изменение биотермических коэффициентов в процессе вегетации многолетних трав, полученных с применением разных методик их определения.

Таблица 2. Отклонения между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными по уравнению водного баланса (с учетом поверхностного стока), мм

Год	z, шт.	Среднеарифметические			Среднеквадратичные		
		Контроль	PO-1	PO-2	Контроль	PO-1	PO-2
Расчет по формуле (7) – $k = f(N, t)$							
2018	22	-0,4	-3,7	1,6	8,8	8,9	6,1
2019	18	0,1	1,0	4,6	5,4	6,9	8,7
2020	17	3,5	-1,9	0,6	7,1	6,2	6,8
Среднее по варианту		1,1	-2,2	2,3	7,1	7,3	7,2
Среднее по опыту за 3 года +0,9 мм				Среднее по опыту +7,2 мм			
Расчет по формуле (8) – $k = f(N)$							
2018	22	-1,1	-5,1	0,1	8,5	10,1	6,7
2019	18	-1,7	-2,1	3,7	5,9	7,2	8,5
2020	17	1,2	-2,4	0,1	3,9	6,9	7,3
Среднее по варианту		-0,5	-3,2	1,3	6,1	8,1	7,5
Среднее по опыту за 3 года -0,5 мм				Среднее по опыту +7,2 мм			
Расчет по формуле (9) – $k = f(t)$							
2018	22	-0,7	-4,6	0,7	8,3	9,5	6,6
2019	18	-0,6	-1,7	4,1	5,8	7,3	8,6
2020	17	0,8	-3,2	-0,7	3,7	7,7	7,5
Среднее по варианту		-0,2	-3,2	1,4	5,9	8,2	7,6
Среднее по опыту за 3 года -0,4 мм				Среднее по опыту +7,2 мм			

Таблица 3. Опорные показатели биологических кривых для расчетных формул (7)–(9)

Формула	Опорные показатели биологических кривых						Среднеквадратичные отклонения между почвенными влагозапасами, замеренными в поле и вычисленными, если поверхностный сток	
	$\mu_T$	$\mu_t$	$k_{min}$	$k_{max}$	$N(k_{max})$	$t(k_{max})$	не учитывается	учитывается
	–	–	мм/°C	мм/°C	сут	°C	мм	мм
(7)	2	2	0,11	0,16	70	1000	9,1	7,3
(8)	2	–	0,11	0,15	50	–	9,4	7,3
(9)	–	2	0,11	0,15	–	1050	9,4	7,3

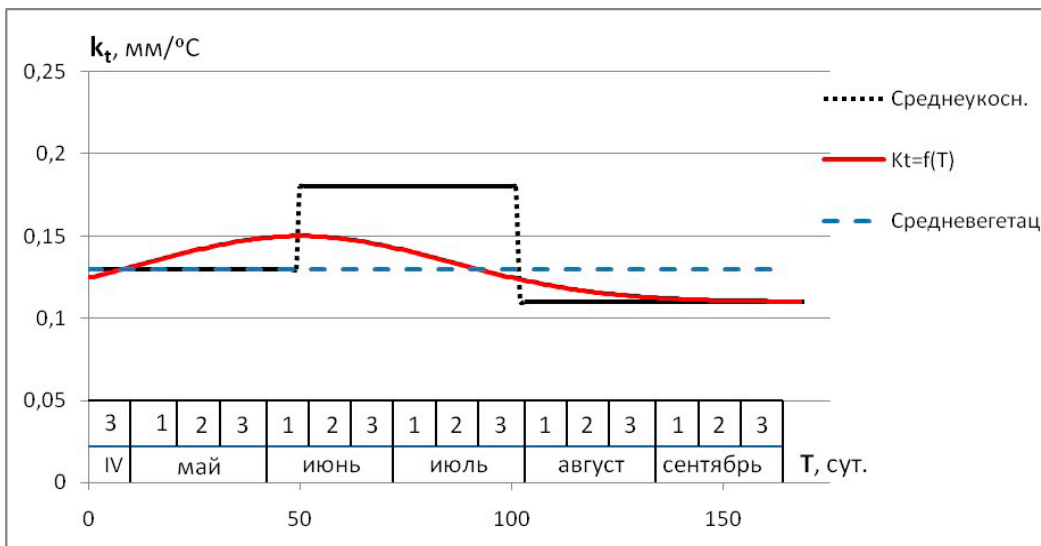


Рис. 2. Динамика биотермических коэффициентов в процессе вегетации многолетних трав

В заключение отметим, что полученные нами значения показателей влияния на форму биотермической кривой номеров расчетных суток ( $\mu_N$ ) или максимальных (среднесуточных) температур воздуха, накопленных от начала водобалансового расчета ( $\mu_t$ ), позволяют исключить эти показатели из формул, поскольку отношения  $\mu_N/2$  и  $\mu_t/2$  всегда равны единице. Следовательно, при расчете водопотребления многолетних трав для определения формы их биологической кривой по формуле (8) достаточно знать только три параметра:

### Заключение

Анализ результатов обработки данных полевого опыта на участке оросительного комплекса «Тушково» (УО «БГСХА») показал, что при контроле динамики почвенных влагозапасов наименьшая ошибка получена при расчете водопотребления многолетних трав по максимальным температурам воздуха и биотермическим коэффициентам, установленным на основе физического принципа баланса причинно-следственных взаимодействий в замкнутой физической системе и не зависящим от способа использования травостоя (зеленая масса, сенаж, сено, пастбище).

Формула для расчета поверхностного стока также получена с использованием физического принципа баланса причинно-следственных взаимодействий в замкнутой физической системе. Анализ опытных данных показал, что при уклонах поверхности 0,023–0,027 поверх-

$k_{\min}$  – минимальное значение биотермического коэффициента;

$k_{\max}$  – максимальное значение биотермического коэффициента;

$N(k_{\max})$  – фиксированное значение номера расчетных суток от начала водобалансового расчета, при котором биотермический коэффициент достигает максимума.

Подчеркнем, что водобалансовый расчет следует начинать в любой год, как рекомендовано нормативным документом [11] для северо-восточной зоны Беларуси, с даты, имеющей нулевой номер отсчета, – 21 апреля.

ностный сток необходимо учитывать только на вершине склона и на расстоянии по уклону приблизительно до 50 м. На участках, расположенных ниже по склону, при возделывании многолетних трав можно пренебречь поверхностным стоком как расходным элементом водного баланса. Такой вывод объясняется тем, что на этих участках при дожде или поливе в почву дополнительно инфильтруется примерно столько же воды, притекающей с вышерасположенной части склона, сколько ее убывает с поверхностным стоком ниже по склону. Точность водобалансового расчета, выполняемого по предложенному алгоритму, в абсолютном выражении равна 7,2 мм, что меньше, чем при расчете водопотребления многолетних трав трехкосного использования по декадным биотермическим коэффициентам.

### Библиографический список

1. Лихацевич, А. П. 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.
2. Управление орошением сельскохозяйственных культур на основе расчета динамики почвенных влагозапасов / А. П. Лихацевич, Г. В. Латушкина, И. А. Романов, С. В. Набздоров // Эффективное использование мелиорированных земель: проблемы и решения : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Тверь, 28 сент. 2018 г. / ФГБНУ «Всероссийский НИИ мелиорированных земель». – Тверь, 2018. – С. 270–275.
3. Лихацевич, А. П. Управление режимом орошения сельскохозяйственных культур в условиях Беларуси / А. П. Лихацевич, Г. В. Латушкина, И. А. Романов // Мелиорация. – 2019. – № 2. – С. 18–25.
4. Рекомендации по управлению дождеванием в производственных условиях / А.С. Анженков [и др.]. – Минск : РУП «Институт мелиорации», 2020. – 40 с.

5. Лихацевич, А. П. Расчет водного баланса почвы при краткосрочном переувлажнении / А. П. Лихацевич, И. А. Романов // Мелиорация. – 2016. – № 4. – С. 6–17.
6. Лихацевич, А. П. Орошаемое плодовоовощеводство : учеб. пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности «Плодовоовощеводство» / А. П. Лихацевич, М. Г. Голченко ; ред. А. П. Лихацевич. – Минск : ИВЦ Минфина, 2017. – 286 с.
7. Лихацевич, А. П. Использование физического принципа для построения экспериментальных математических моделей исследуемых процессов в мелиоративной науке / А. П. Лихацевич. // Мелиорация и вод. х-во. – 2021. – № 6. – С. 30–36.
8. Вихров, В. И. Ретроспективные расчеты и пространственно-временная изменчивость сезонных показателей водного режима почв на территории Беларуси / В. И. Вихров. – Горки : БГСХА, 2019. – 176 с.
9. Романов, И. А. Влияние способа определения биотермических коэффициентов водопотребления растений на точность расчета водного баланса почвы / И. А. Романов, А. П. Лихацевич, Г. В. Латушкина // Мелиорация. – 2021. – № 1. – С. 5–18.
10. Оросительные системы. Правила проектирования : ТКП 45-3.04-178-2009 (02250). – Введ. 29.12.2009 г. – Минск : Минстройархитектуры, 2010. – 74 с.
11. Яланский, Д. В. Водный режим минеральных почв и его регулирование при орошении дождеванием сенокосно-пастбищной травосмеси : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02 / Д. В. Яланский ; ФГБОУ ВО «РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева». – М., 2022. – 24 с.

Поступила 6 мая 2022 г.