

УДК 631.432

## **РАСЧЕТ ВОДНОГО БАЛАНСА ПОЧВЫ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ПЕРЕУВЛАЖНЕНИИ**

**А.П. Лихацевич**, доктор технических наук, член-корреспондент НАН Беларуси,  
РУП «Институт мелиорации»  
г. Минск, Беларусь

**И.А. Романов**, аспирант  
УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»  
г. Горки, Беларусь

### **Аннотация**

Разработана структурная математическая модель формирования стока гравитационной влаги из корнеобитаемого слоя почвы в периоды кратковременных переувлажнений. Приведены результаты полевого опыта. Сравнительный анализ измеренных и рассчитанных почвенных влагозапасов показал, что расчет водного баланса переувлажненной почвы с учетом внутрпочвенного стока, вычисленного по установленной зависимости, дает ошибку, не превышающую ошибку измерения почвенных влагозапасов непосредственно в поле.

**Ключевые слова:** водный баланс почвы, внутрпочвенный сток, интенсивность инфильтрации, продолжительность расчетного интервала, ошибка опыта

### **Abstract**

**A.P. Likhachevich, I.A. Romanov**  
**CALCULATING SOIL WATER BALANCE  
DURING SHORT-TERM OVER MOISTENING**

Calculated structural mathematical model shows how gravitational moisture drains from root layer of the soil during short-term over moistening. The article presents the results of field experiment. Comparative analysis of the measured and calculated soil moisture reserves shows that the calculation of the water balance in water-logged soil, taking into account runoff in the soil, calculated in the prescribed dependence, gives an fault which does not exceed the fault of measurement of soil moisture reserves in the field.

**Keywords:** water balance, internal soil drainage, infiltration intensity, duration of estimating interval, experiment fault

### **Введение**

Территория Республики Беларусь характеризуется неустойчивой погодой. В течение вегетации происходит хаотичная смена дождливых и засушливых периодов разной продолжительности. Поддержание на достаточно высоком уровне плодородия почв и повышение эффективности земледелия в таких условиях требует дополнительного увлажнения. Особенно важно создание благоприятного водного режима при засухах для влаголюбивых овощных и кормовых культур, высокоэффективное возделывание которых в Беларуси, как доказано наукой и передовой сельскохозяйственной практикой, невозможно без дополнительного увлажнения (орошения).

Научное обеспечение регулирования водного режима сельскохозяйственных культур базируется на обосновании алгоритма управления водным балансом корнеобитаемого слоя почвы. Именно на основе контроля за элементами водного баланса почвы разрабатываются технологии управления водным режимом растений при орошении [1, 2].

В уравнение водного баланса орошаемой почвы входят две группы составных элементов – «приходные», повышающие содержание влаги в почве (в простейшем случае – это атмосферные осадки, поливы и капиллярный подток почвенной влаги из нижележащих почвенных слоев), и «расходные», снижающие почвенные влагозапасы (эвапотранспирация и сток влаги за пределы расчетного слоя). Результирующим показателем водного баланса является содержание влаги в корнеобитаемом слое почвы на конец расчетного интервала

$$W_K = W_H + (P + m + Q) - (E + C), \quad (1)$$

где  $W_K$  – запас влаги в корнеобитаемом слое почвы на конец расчетного интервала;  $W_H$  – то же на начало расчетного интервала;  $P$  – впитавшиеся в почву атмосферные осадки;  $m$  – поливы;  $Q$  – капиллярный подток влаги в корнеобитаемый слой из нижерасположенного почвенного слоя;  $E$  – эвапотранспирация (суммарное испарение) сельскохозяйственного поля;  $C$  – сброс влаги за пределы расчетного слоя почвы.

Все составные элементы уравнения водного баланса ( $P$ ,  $m$ ,  $Q$ ,  $E$ ,  $C$ ) суммируются за расчетный интервал, продолжительность которого зависит от цели расчета и может варьировать от суток до года. В мелиоративной практике (например, при расчете оросительных норм, или при прогнозе динамики почвенных влагозапасов с целью управления орошением сельскохозяйственных культур) расчетный интервал обычно принимается продолжительностью не более декады (10 суток).

Вместе с тем, на основе анализа результатов многочисленных водобалансовых расчетов Н.М. Химиним было установлено, что традиционная алгебраическая форма уравнения водного баланса (1) в принципе не может учесть постоянную изменчивость (динамизм) почвенной влажности, являющейся интегральной характеристикой непрерывно протекающего процесса перераспределения влаги в почвенном профиле. Поэтому помимо традиционной формы представления водного баланса (1) при расчете динамики почвенных влагозапасов им было предложено использовать дифференциальную форму, более согласованную по заданию внешних условий [3],

$$\frac{dW}{dt} = -\varepsilon(\omega) + q(\omega) + (p + m) - c, \quad (2)$$

где  $W$  – запас влаги в расчетном слое почвы на данный момент времени;  $t$  – время;  $\varepsilon(\omega)$  – интенсивность эвапотранспирации как функция почвенной влажности ( $\omega$ );  $q(\omega)$  – плотность потока влаги через границу между корнеобитаемым и подстилающим слоем как функция почвенной влажности;  $(p+m)$  – интенсивность впитывания влаги, поступающей на поверхность почвы (атмосферные осадки + поливы);  $c$  – интенсивность инфильтрации (сброса влаги за пределы расчетного слоя почвы).

Преимущества дифференциальной формы (2) представления водного баланса почвы были подтверждены при расчете водного режима орошаемого участка [4, 5]. Эти преимущества закономерны, поскольку эффективность применения дифференциальных уравнений для решения многих естественнонаучных задач доказана успешной практикой построения математических моделей природных и техногенных процессов [6]. Однако до настоящего времени уравнение вида (2) не использовалось для оценки инфильтрации влаги за пределы расчетного слоя почвы в периоды кратковременных переув-

лажнений. Под кратковременным переувлажнением будем понимать повышение содержания влаги в почве сверх ее водоудерживающей способности (наименьшей влагоемкости), наступающее после выпадения атмосферных осадков и продолжающееся при отсутствии подтоплений и затоплений корнеобитаемого слоя без существенного влияния на растения.

#### Решение дифференциального уравнения водного баланса почвы в условиях кратковременного переувлажнения

Очевидно, что для орошаемого сельскохозяйственного поля в условиях кратковременного переувлажнения (например, после ливневых осадков) не требуется орошение, эвапотранспирация близка к максимальной, отсутствует подпитка влагой из нижележащих слоев почвы и, следовательно, дифференциальное уравнение водного баланса (2) примет вид

$$\frac{dW}{dt} = -\varepsilon_m + p - c, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_m$  – максимальная интенсивность эвапотранспирации.

В этих условиях решением уравнения (3) при продолжительности расчетного интервала, изменяющейся в диапазоне  $0 < t < T$  (здесь  $T$  – продолжительность полного стекания гравитационной влаги из корнеобитаемого слоя после заполнения водой всего порового пространства и при отсутствии подпора от капиллярной каймы грунтовых вод), является равенство

$$W_K = W_H + P - E_m - \int_0^t c dt, \quad (4)$$

где  $P$ ,  $E_m$  – атмосферные осадки и максимальная эвапотранспирация, суммируемые за расчетный интервал (продолжительностью  $t$ ).

В уравнении (4) интересующим нас параметром является сток ( $C$ ), определяемый интегральной функцией

$$C = \int_0^t c dt. \quad (5)$$

Отметим, что в техническом кодексе установившейся практики [7] при определении потерь воды на сток рекомендуется учитывать водоудерживающую способность почв путем введения в расчетную формулу соответствующего коэффициента

$$C = K(W_H + P + m - E - W_{HB}), \quad (6)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от типа почвы и равный 0,9 для тяжелых по гранулометрическому составу почв, 0,95 для средних почв и 1,0 для легких по гранулометрическому составу почв;  $m$  – поливная норма, вводится в расчет, если в течение расчетного интервала был проведен полив, мм;  $W_{нв}$  – наименьшая влагоемкость корнеобитаемого слоя почвы, мм.

Формула (6) дает результаты, пригодные только для расчета проектных оросительных норм при постоянном расчетном интервале, равном декаде [7]. Ею нельзя пользоваться в условиях эксплуатации оросительных систем для управления режимом орошения сельскохозяйственных культур. В более точных водобалансовых расчетах, согласно Н.М. Химину [3], следует учитывать не только наименьшую влагоемкость почвы, но и динамику почвенной влаги в течение расчетного интервала.

Для установления вида интегральной функции  $\int_0^t c dt$  необходимо определить зависимость интенсивности сброса влаги за пределы расчетного слоя почвы от ее текущей влажности и от фактора времени. Не вызывает сомнений, что искомая зависимость является следствием известного «закона Дарси». Для заданных условий ее можно представить как

$$c = k_{инф} \cdot i(W), \quad (7)$$

где  $k_{инф}$  – коэффициент инфильтрации (фиксированная для данной почвы скорость вертикального перемещения гравитационной влаги);  $i(W)$  – параметр, характеризующий реализацию потенциальной энергии инфильтрационного потока в течение расчетного интервала (подобен гидравлическому уклону).

Исследованию закономерностей передвижения почвенной влаги в ненасыщенной зоне (при  $W < W_{нв}$ ) посвящены многие работы. Большая их часть основана на полуэмпирической зависимости, предложенной академиком С.Ф. Аверьяновым [8], в которой так называемый «коэффициент влагопроводности почвы» (в нашем случае он идентичен интенсивности инфильтрации) нелинейно зависит от почвенной влажности. Нелинейность учитывается через показатель степени, в которую возводится отношение фактического содержания влаги в почве (сверх задаваемого минимума) к количеству влаги, содержащейся сверх этого минимума при полном заполнении почвенных пор водой [8, 9, 10 и др.]

$$k_B = k_{\Phi} \left( \frac{W - W_{нф}}{V - W_{нф}} \right)^n, \quad (8)$$

где  $k_B$  – коэффициент влагопроводности ненасыщенной почвы (при  $W < W_{нв}$ );  $k_{\Phi}$  – коэффициент фильтрации (при полном заполнении почвенных пор водой);  $V$  – пористость почвы;  $W_{нф}$  – начальная фиксированная влажность почвы;  $n$  – показатель степени.

С привлечением многочисленных опытных данных было показано, что величина показателя степени ( $n$ ) в функции (8) зависит от начальной фиксированной влажности почвы. Например, в условиях переувлажнения, т.е. при  $W_{нф} \geq W_{нв}$  (здесь  $W_{нв}$  – наименьшая влагоемкость корнеобитаемого слоя почвы), показатель степени в (8) не превышает единицу [11]. Этот вывод подтверждают результаты опытов И.С. Никитина, Е.П. Панова, П.И. Пыленка, И.В. Сидорова и др., которые установили, что суммарный влагообмен в почве (инфильтрация и подпитка) может быть вычислен по другим элементам водного баланса корнеобитаемого слоя без возведения их в какую-либо степень [12, 13 и др.].

В рассматриваемом нами случае (при переувлажнении) в качестве фиксированного коэффициента инфильтрации примем скорость вертикального перемещения (сверху вниз) гравитационной влаги, осредненную за период полного стекания максимального возможного ее количества из корнеобитаемого слоя, т.е.

$$k_{инф} = \frac{V - W_{нв}}{T}, \quad (9)$$

где  $k_{инф}$  – коэффициент инфильтрации гравитационной влаги в почве, мм/сут.;  $T$  – 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 (9) пористость ( $V$ ) и наименьшая влагоемкость ( $W_{нв}$ ) измеряются, как и 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 сло-

жения, 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).

Установив коэффициент инфильтрации (9), определим параметр  $i(W)$ , характеризующий реализацию потенциальной энергии инфильтрационного потока во времени. При определении вида функции  $i(W)$  в соответствии с методикой структурного математического моделирования (А.С. Образцов, 1990, [14]) важно учесть известные закономерности влияния элементов водного баланса на инфильтрационный поток. Известно следующее:

- по своему воздействию на изменение содержания влаги в почве в течение расчетного интервала основные составные элементы водного баланса разделяются на непрерывно и дискретно действующие [5]. В рассматриваемых условиях (в периоды переувлажнения), согласно уравнению (4), к непрерывно действующим элементам водного баланса относятся эвапотранспирация и возможный сток гравитационной влаги, накопленной в почве на начало расчетного интервала, а к дискретным – атмосферные осадки, выпадающие в течение расчетного интервала. Соответственно, разные элементы водного баланса по разному влияют на перераспределение влаги по почвенному профилю и на формирование внутрипочвенного стока. Другими словами, формирование стока влаги атмосферных осадков отличается от формирования стока гравитационной влаги, накопленной в почве в доосадковый период. Отличие состоит в том, что между началом выпадения атмосферных осадков и началом стока из корнеобитаемого слоя их гравитационной составляющей всегда наблюдается некоторый промежуток времени, в течение которого влага атмосферных осадков, впитавшись в почву, заполняет почвенные поры, перемещаясь от поверхности почвы до нижней границы корнеобитаемого слоя. Этим запаздыванием отличается сток влаги атмосферных осадков от стока излишков почвенной влаги, насыщающих почву сверх наименьшей влагоемкости на начало расчетного интервала;

- при отсутствии атмосферных осадков инфильтрация из расчетного слоя почвы может появ-

иться, когда его влагозапасы на начало расчетного интервала превысят наименьшую влагоемкость, т.е. при  $W_H - E_m \geq W_{HB}$ ;

- максимальный объем инфильтрации при отсутствии атмосферных осадков не может превышать разность конечных влагозапасов и наименьшей влагоемкости, т.е.  $C_{max} \leq W_H - E_m - W_{HB}$ ;

- потенциальная энергия инфильтрационного потока пропорциональна содержанию гравитационной влаги в почве (сверх водоудерживающей способности – наименьшей влагоемкости) и реализуется в течение полного стекания гравитационной влаги из корнеобитаемого слоя;

- продолжительность полного стекания гравитационной влаги, которую может вместить корнеобитаемый слой, известна (устанавливается по методике определения наименьшей влагоемкости почвы при отсутствии подпора от капиллярной каймы грунтовых вод).

Перечисленные выше закономерности при определении структуры параметра инфильтрационного потока  $i(W)$ , характеризующего реализацию его потенциальной энергии в течение расчетного интервала, можно учесть с помощью функции

$$i(W) = \frac{\alpha (W_H - E_m - W_{HB}) \left(\frac{t}{T}\right)^{a-1} + \beta P \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1}}{V - W_{HB}}, \quad (10)$$

где  $t$  – продолжительность расчетного интервала, изменяющаяся в диапазоне времени  $0 < t < T$ , сут.;  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты пропорциональности (безразмерные величины);  $a$ ,  $b$  – показатели степени (безразмерные величины).

Согласно представленным выше зависимостям (5), (9), (10), величину внутрипочвенного стока можно определить, интегрируя функцию (7) в интервале, продолжительностью  $t$ , т.е.

$$C = \int_0^t \left[ \alpha (W_H - E_m - W_{HB}) \frac{t^{a-1}}{T^a} + \beta P \frac{t^{b-1}}{T^b} \right] dt. \quad (11)$$

Решением интегрального уравнения (11) является уравнение

$$C = \frac{\alpha}{a} (W_H - E_m - W_{HB}) \left(\frac{t}{T}\right)^a + \frac{\beta}{b} P \left(\frac{t}{T}\right)^b. \quad (12)$$

Входящие в (12) эмпирические коэффициенты ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) установим, используя граничное условие

$t=T$ , определяющее продолжительность полного стекания максимального количества влаги, насыщающей почву сверх наименьшей влагоемкости. В этом случае, как известно из теории режима орошения,  $C_{t=T} = W_H - E_m + P - W_{HB}$ . Отсюда найдем, что  $\alpha = a$  и  $\beta = b$ , что, в конечном итоге, приводит к зависимости

$$C = (W_H - E_m - W_{HB}) \left( \frac{t}{T} \right)^a + P \left( \frac{t}{T} \right)^b. \quad (13)$$

Напомним, что формула (13) справедлива в диапазоне  $0 < t < T$ , сут. Очевидно, что показатели степени  $a$  и  $b$  в функции (13) можно установить только опытным путем. Определим их из результатов эксперимента, который поставлен нами на опытном поле «Тушково-1» УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» в 2016 году.

#### Материалы и методы

Эксперимент по изучению закономерностей инфильтрации гравитационной влаги из корнеоби-

таемого слоя почвы при ее переувлажнении был поставлен на учебно-опытном поле УО «БГСХА» «Тушково-1». Опыт проводился с 14.07.2016 по 23.07.2016.

Переувлажнение почвы в опыте имитировалось путем подачи поливной нормы, рассчитанной из условия максимального насыщения водой корнеобитаемого слоя на поле с орошаемой однолетней кормовой культурой – пайзой (японским просом). Опыт включал два варианта (с изоляцией поверхности почвы от влагообмена с приземным слоем воздуха и без изоляции). Согласно его схеме были заложены 6 площадок (по 3 площадки на каждый вариант опыта), окантованных земляными валиками (рисунок 1). Перед устройством площадок растительность была скошена и убрана.

Размер каждой площадки, представляющей одну повторность опыта, составил 2х2 метра, высота земляного валика равнялась 30-40 см (рисунок 2).

Внутри земляных валиков были установлены деревянные рамы для предотвращения растекания воды при заливке площадок водой (при подаче за-



Рисунок 1. – Панорама опытного поля



Рисунок 2. – Вид опытной площадки

данной поливной нормы). Размер рамы 1x1 метр, ширина доски 30-40 см. Рамы были заглублены в почву на глубину 11-12 см.

Заливка площадок водой была выполнена 14 июля с 10.20 до 14.30. На площадках в начале заливки на внешней стороне рамы был создан слой воды высотой 5 см, который поддерживался в период выдачи всей поливной нормы (рисунок 3). Вода подавалась в несколько приемов во внутрь рамы.

После заливки водой до полного насыщения почвы три площадки были изолированы сверху пленкой (для предотвращения эвапотранспирации) – первый вариант – и далее использовались для определения наименьшей влагоемкости почвы. Другие три площадки после заливки были оставлены в естественном состоянии (без укрытия пленкой) – второй вариант.

На каждую площадку было подано по 300 литров воды. На первом варианте опыта, после заливки и изоляции площадок пленкой, на ее поверхность была уложена сухая трава для защиты почвы от нагревания в дневные часы.

Пробы почвы на влажность на неизолированных площадках отбирались ежедневно, примерно в одно и то же время по слоям 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 и 40-50 см с помощью почвенного бура. Первый отбор проб был выполнен 14 июля в 17.00. Влажность почвы определялась термостатно-весовым способом с использованием технических весов ВК-600.

При расчетах влагозапасов плотность почвы опытного участка в естественном сложении принята по данным аспиранта Яланского Д.В., который определил ее в 2016 г. путем отрывки шурфа и послойно-

го отбора образцов почвы методом режущего кольца. Плотность твердой фазы почвы опытного участка определена пикнометрическим способом Лукашевичем В.М., проводившим полевой эксперимент по орошению пайзы (японского проса) на том же опытном поле.

Полная влагоемкость почвы оценивалась по ее пористости. При этом учитывалось, что после полного насыщения почвенного профиля дождевой (или поливной) водой в почве всегда остается заземленный воздух, заполняющий (согласно исследованиям С.Ф. Аверьянова и А.И. Голованова [8, 9]) около 5 % от объема пор.

Продолжительность полного стекания гравитационной влаги из корнеобитаемого слоя в первом варианте опыта предварительно была принята равной 4 суткам, с ориентацией на средние по гранулометрическому составу почвы средней плотности. Поэтому поверхность почвы на трех изолированных площадках первого варианта опыта была освобождена от травы и пленки только 18 июля. Затем послойно были отобраны почвенные пробы для определения наименьшей влагоемкости в корнеобитаемом слое почвы.

### Результаты и обсуждение

Водно-физические свойства, измеренные по слоям почвы опытного участка, приведены в таблице 1. Согласно расчету, пористость почвы в корнеобитаемом (расчетном) слое (0-50 см) составила около 45,3 %, а полная влагоемкость – 215,02 мм.

В таблице 2 приведена влажность почвы, соответствующая наименьшей влагоемкости и измеренная после стекания гравитационной влаги из



Рисунок 3. – Заливка площадок водой

корнеобитаемого слоя на площадках первого варианта опыта. Стандартное отклонение (от среднего) измеренных по повторностям опыта значений влажности составило 0,9 % от массы сухой почвы, что соответствует точности опыта в 4,4 %.

Расчеты (таблица 2) показали, что наименьшая влагоемкость почвы в слое 0-50 см равна 145,53 мм.

На втором варианте опыта, начиная с 14 июля, по измеренной влажности почвы вычислялись влагозапасы корнеобитаемого слоя. В таблице 3 приведены значения влагозапасов в полуметровом слое почвы по датам отбора почвенных образцов. Из-за интенсивных атмосферных осадков, выпавших 20 и 21 июля в установленное время измерений, в эти даты отбора образцов почвы на влажность не проводилось.

Статистический анализ измеренных по повторностям опыта влагозапасов (таблица 3) показал, что их среднеквадратическое (стандартное) отклонение (как мера дисперсии распределения отклонений от среднего значения) колеблется в пределах от 2,43 до 3,86 мм, т.е. относительная ошибка опыта не превышает 3 %, что позволяет характеризовать полученные результаты, как достаточно точные.

Данные измерений почвенных влагозапасов подтверждают, что после полного насыщения кор-

необитаемого слоя водой продолжительность стекания гравитационной влаги (продолжительность снижения почвенных влагозапасов до наименьшей влагоемкости) составляет четверо суток, следовательно в расчетах по формуле (13) следует принимать  $T = 4$  суток. Следовательно, при суточной продолжительности расчетного интервала отношение  $t/T = 1/4 = 0,25$ .

Результаты сверки данных проведенного эксперимента (таблица 3) и данных соответствующего водобалансового расчета с использованием формулы (13) свидетельствуют, что при  $t/T = 0,25$  наименьшие отклонения рассчитанных значений почвенных влагозапасов от измеренных в поле получены при значениях эмпирических коэффициентов  $a = 0,5$  и  $b = 2$ . Это подтверждает наше предположение, что разные элементы водного баланса по разному влияют на формирование внутрипочвенного стока.

Таким образом, на основании данных опыта зависимость для определения стока гравитационной влаги из корнеобитаемого слоя переувлажненной почвы может быть представлена в завершеном виде

$$C = (W_H - E_m - W_{HB}) \left( \frac{t}{T} \right)^{0,5} + P \left( \frac{t}{T} \right)^2. \quad (14)$$

**Таблица 1. – Водно-физические свойства почвы опытного участка**

Слой почвы, см	Плотность сложения, г/см <sup>3</sup>	Плотность твердой фазы, г/см <sup>3</sup>	Пористость, см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	Полная влагоемкость слоя, мм
0-10	1,34	2,54	0,4724	44,88
10-20	1,39	2,56	0,4570	43,42
20-30	1,40	2,57	0,4553	43,25
30-40	1,46	2,59	0,4363	41,45
40-50	1,45	2,60	0,4423	42,02
<b>0-50</b>	<b>1,41</b>	<b>2,57</b>	<b>0,4527</b>	<b>215,02</b>

**Таблица 2. – Расчет влагозапасов почвы при ее насыщении до наименьшей влагоемкости**

Слой почвы, см	Влажность почвы при насыщении до наименьшей влагоемкости по повторностям опыта, % от массы сухой почвы				Плотность сложения почвы, г/см <sup>3</sup>	W <sub>HB</sub> , % объема	W <sub>HB</sub> , мм
	I	II	III	Среднее			
0-10	22,88	21,88	23,45	22,74	1,34	30,47	30,47
0-20	21,91	20,9	21,95	21,59	1,39	30,01	30,01
20-30	22,10	20,59	20,15	20,95	1,40	29,33	29,33
30-40	21,07	20,12	20,73	20,64	1,46	30,13	30,13
40-50	19,06	15,58	18,31	17,65	1,45	25,59	25,59
<b>0-50</b>	<b>21,40</b>	<b>19,81</b>	<b>20,92</b>	<b>20,71</b>	<b>1,41</b>	<b>29,11</b>	<b>145,53</b>

Таблица 3. – Содержание почвенной влаги (мм) в слое почвы 0-50 см, измеренное по повторностям опыта

№ п/п	Даты измерений	W рассчитанные по повторности опыта			W измеренные средние	Квадраты отклонений от средних		
		1	2	3		1	2	3
1	14 июля	191,55	178,97	180,64	183,72	61,31	22,56	9,49
2	15 июля	162,04	163,95	162,25	162,75	0,50	1,45	0,25
3	16 июля	147,22	150,88	154,15	150,75	12,46	0,02	11,56
4	17 июля	148,1	150,02	151,33	149,82	2,95	0,04	2,29
5	18 июля	155,51	159,46	164,5	159,82	18,60	0,13	21,87
6	19 июля	153,16	154,24	156,89	154,76	2,57	0,27	4,52
7	22 июля	164,77	160,45	164,63	163,28	2,21	8,03	1,81
8	23 июля	158,16	159,26	151,47	156,30	3,47	8,78	23,30
<b>Сумма =</b>						<b>104,07</b>	<b>41,28</b>	<b>75,09</b>
<b>Стандартные отклонения, мм =</b>						<b>3,86</b>	<b>2,43</b>	<b>3,28</b>

Напомним, что в формуле (14) учитываются только впитавшиеся в почву атмосферные осадки.

В таблице 4 приведены результаты посуточного сравнения почвенных влагозапасов, вычисленных с учетом определения внутрипочвенного стока гравитационной влаги по формуле (14), с влагозапасами, измеренными в поле термостатно-весовым способом. Как видим, стандартное отклонение вычисленных влагозапасов ( $W_{расч.}$ ) от осредненных измеренных ( $W_{изм.}$ ) составляет всего 2,05 мм, что меньше дисперсии измеренных по повторностям опыта влагозапасов почвы (таблица 3). Этот результат показывает высокую точность расчета внутрипочвенного стока по формуле (14), подтверждая справедливость принятых при ее разработке

выражений коэффициента инфильтрации (9) и параметра (10), характеризующего реализацию потенциальной энергии инфильтрационного потока в течение расчетного интервала.

На рисунке 4 показана хронология измеренных в поле и рассчитанных по формуле (14) почвенных влагозапасов в слое 0-50 см. Как видим, наблюдается практически полное их совпадение, что весьма убедительно подтверждает справедливость разработанной нами структурной математической модели расчета внутрипочвенного стока (9)-(13) и полученной результирующей формулы (14).

В таблице 5 приведены результаты водобалансовых расчетов для почвы опытного участка, выполненных по четырем алгоритмам.

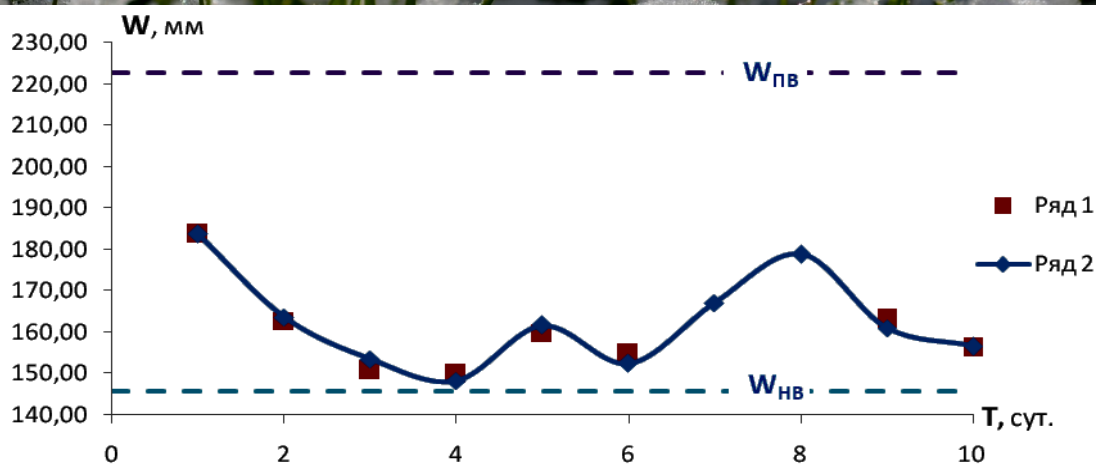
Таблица 4. – Расчет динамики почвенных влагозапасов в слое почвы 0-50 см с использованием зависимости (15)

№ п/п	Дата	W измененное среднее	P, мм	T <sub>max</sub> , °C	E <sub>max</sub> , мм	C, мм	W рассчитанное мм	ΔW, мм	(ΔW) <sup>2</sup>
1	14 июля	183,72	0	24,6	2,58	-	183,72	0,00	0,00
2	15 июля	162,75	0,4	28,6	3,00	17,62	163,50	0,75	0,56
3	16 июля	150,75	0	23,6	2,48	7,75	153,28	2,53	6,38
4	17 июля	149,82	0	26,5	2,78	2,48	148,01	-1,81	3,27
5	18 июля	159,82	16,9	23,1	2,43	1,08	161,40	1,58	2,50
6	19 июля	154,76	0	23,3	2,45	6,71	152,24	-2,52	6,34
7	20 июля	-	20,2	20	2,10	3,57	166,77	-	-
8	21 июля	-	25	18,6	1,95	11,21	178,61	-	-
9	22 июля	163,28	0	24,5	2,57	15,26	160,79	-2,49	6,22
10	23 июля	156,30	4,9	27,2	2,86	6,51	156,32	0,02	0,00
<b>Сумма =</b>			<b>67,4</b>		<b>22,62</b>	<b>72,18</b>		<b>-1,94</b>	<b>25,27</b>
<b>Стандартное отклонение, мм =</b>								<b>2,05</b>	



Таблица 5. – Расчет динамики влагозапасов почвы в слое 0-50 см с использованием известных алгоритмов

№ п/п	Дата	$W_{изм.}$ (средние) мм	$P$ , мм	$T_{max}$ , °C	$E_{max}$ , мм	Без учета внутрипочвенного стока				С учетом внутрипочвенного стока								
						по формуле (6) от $W_{изм.}$		по формуле (14) от $W_{изм.}$		по формуле (6) от $W_{изм.}$		по формуле (14) от $W_{изм.}$		по формуле (14) от $W_{ПВ}$				
						$W_{расч.1}$ мм	$\Delta W_1$ , мм	$(\Delta W_1)^2$	$W_{расч.2}$ , мм	$\Delta W_2$ , мм	$(\Delta W_2)^2$	$W_{расч.3}$ мм	$\Delta W_3$ , мм	$(\Delta W_3)^2$	$W_{расч.4}$	$\Delta W_4$ , мм	$(\Delta W_4)^2$	
1	14 июля	183,72	0	24,6	2,58	183,72	0,00	0,00	183,72	0,00	0,00	183,72	0,00	0,00	178,98	-4,74	22,43	
2	15 июля	162,75	0,4	28,6	3,00	181,12	18,37	337,35	147,30	-15,45	238,71	163,50	0,75	0,56	161,13	-1,62	2,62	
3	16 июля	150,75	0	23,6	2,48	178,64	27,89	777,80	144,82	-5,93	35,14	153,28	2,53	6,38	152,09	1,34	1,80	
4	17 июля	149,82	0	26,5	2,78	175,86	26,04	677,90	142,04	-7,78	60,54	148,01	-1,81	3,27	147,42	-2,40	5,76	
5	18 июля	159,82	16,9	23,1	2,43	190,33	30,51	930,92	146,07	-13,75	189,07	161,40	1,58	2,50	161,11	1,29	1,65	
6	19 июля	154,76	0	23,3	2,45	187,88	33,12	1097,23	143,62	-11,14	124,03	152,24	-2,52	6,34	152,09	-2,67	7,10	
7	20 июля	-	20,2	20,0	2,10	205,98	-	-	146,33	-	-	166,77	-	-	166,70	-	-	
8	21 июля	-	25,0	18,6	1,95	229,03	-	-	146,71	-	-	178,61	-	-	178,58	-	-	
9	22 июля	163,28	0	24,5	2,57	226,46	63,18	3991,59	144,14	-19,14	366,33	160,79	-2,49	6,22	160,77	-2,51	6,32	
10	23 июля	156,30	4,9	27,2	2,86	228,50	72,20	5213,27	145,55	-10,75	115,49	156,32	0,02	0,00	156,31	0,01	0,00	
				<b>Сумма =</b>		<b>271,31</b>	<b>13026,06</b>	<b>-83,93</b>	<b>1129,31</b>	<b>-1,94</b>	<b>25,27</b>	<b>1129,31</b>	<b>-11,29</b>	<b>47,69</b>	<b>2,05</b>	<b>2,61</b>	<b>2,05</b>	<b>2,61</b>
				<b>Стандартное отклонение, мм =</b>			<b>46,59</b>		<b>13,72</b>									



**Рисунок 4. – Сравнение почвенных влагозапасов, измеренных в поле (ряд 1) и посуточно рассчитанных с использованием формулы (14) (ряд 2)**

**1. Без учета внутрипочвенного стока,** когда начальные влагозапасы первого расчетного интервала принимались равными измеренным, т.е.  $W'_{расч.1} = 183,72 + P - E_m$  (где  $W'_{расч.1}$  – конечные влагозапасы в первом расчетном интервале, они же являлись начальными влагозапасами для второго расчетного интервала). Со второго интервала расчет велся по формуле  $W_{расч.1} = W_H + P - E_m$ .

**2. С определением внутрипочвенного стока по рекомендации ТКП [7] с использованием формулы (6).** В начале расчета влагозапасы также принимались равными измеренным (183,72 мм). Далее (в очередных расчетных интервалах) считалось, что сток появляется только при превышении конечными влагозапасами наименьшей влагоемкости (т.е. при  $W_K = (W_H + P - E_m) > W_{нв}$ ). В этом случае расчет стока велся по формуле  $W_{расч.2} = W_H + P - E_m - C$ , где  $C = 0,95(W_H + P - E_m - W_{нв})$ . При этом всегда получали  $W_K = 0,05(W_H + P - E_m) + 0,95W_{нв}$ . Если же при расчете по формуле  $W_{расч.2} = W_H + P - E_m$  конечные влагозапасы не превышали установленный предел ( $W_{нв}$ ), то считалось, что внутрипочвенный сток отсутствует и водобалансовый расчет велся при  $C = 0$ .

**3. С определением внутрипочвенного стока по формуле (14).** Начальные влагозапасы первого расчетного интервала принимались равными измеренным. В последующих расчетных интервалах расчет конечных влагозапасов велся по формуле  $W_{расч.3} = W_H + P - E_m - C$ , где внутрипочвенный сток (C) вычислялся по формуле (14) (таблица 3).

**4. С определением внутрипочвенного стока по формуле (14).** Расчет начинался не с 14 июля, как в предыдущих вариантах, а с 13 июля, принятого

за начальную точку отсчета (позиция 0). При этом было сделано предположение, что на начало расчета (13 июля) почва была насыщена до полной влагоемкости, т.е. до 215,02 мм (таблица 1), а первый отбор почвенных проб был проведен 14 июля (как и было выполнено фактически).

Сравнивая результаты расчета, полученные по третьему и четвертому алгоритмам, заметим, что они достаточно близки между собой. Некоторые различия наблюдаются только в первые четверо суток. Следовательно, можно сделать вывод, что после обильных атмосферных осадков, гарантированно насытивших корнеобитаемый слой до полной влагоемкости, расчет водного баланса почвы можно начинать от полной влагоемкости непосредственно с даты завершения выпадения осадков.

#### **Выводы**

По результатам сравнения рассчитанных и измеренных почвенных влагозапасов, приведенным в таблице 5, можем сделать следующие выводы:

- игнорирование внутрипочвенного стока при расчете водного баланса почвы в периоды ее кратковременных переувлажнений приводит к существенной ошибке – в опыте стандартное отклонение рассчитанных влагозапасов от измеренных превысило 46 мм, т.е. точность расчета невысока (относительная ошибка превышает 26 %);

- использование для определения внутрипочвенного стока уравнения (6), рекомендуемого ТКП [7], снижает абсолютную ошибку расчета до 13,72 мм, т.е. в 3,4 раза. При этом относительная ошибка приближается к 9,5 %. Однако и такая ошибка при реализации эксплуатационного режима орошения неже-

лательна, поэтому уравнение (6) не рекомендуется применять при водобалансовых расчетах с целью управления водным режимом почв;

- расчет внутрипочвенного стока по полученной нами формуле (14) дает результаты, совпадающие с измеренными в поле. Стандартное отклонение рассчитанных значений влагозапасов от измеренных в опыте составило 2,05 мм, что соответствует относительной ошибке 1,4 % и не превышает абсолютную ошибку опыта (2,43...3,86 мм);

- использование формулы (14) для расчета внутрипочвенного стока, позволяет после обильных атмосферных осадков, гарантированно насытивших корнеобитаемый слой до полной влагоемкости, начи-

нать расчет водного баланса почвы непосредственно от полной влагоемкости с даты завершения выпадения осадков. Стандартное отклонение расчета по этому алгоритму составило 2,61 мм (относительная ошибка расчета равна 1,8 %), что находится в пределах ошибки опыта.

Таким образом, выполненный выше анализ подтверждает достаточно высокую точность разработанного нами метода вычисления стока влаги из корнеобитаемого слоя почвы в периоды ее кратковременных переувлажнений с использованием формулы (14). При этом ошибка расчета не превышает точности измерения почвенных влагозапасов непосредственно в полевых условиях.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голченко, М. Г. Способы и устройства для совершенствования оперативного управления эксплуатационными режимами орошения дождеванием / М. Г. Голченко, Д. А. Емельяненко, Д. В. Яланский // Мелиорация. – 2016. – № 1(75). – С. 21-25.
2. Kowalczyk, A. An assessment of crop water deficits of the plants growing on the Malopolska Upland (Poland) / A. Kowalczyk, L. Labedzki, A. Kuzniar, M. Kostuch // Journal of Water and Land Development. - 2016. – No. 29 (IV-VI). – p. 11-22.
3. Химин, Н. М. Метод расчета влагообмена между корнеобитаемым слоем почвы и грунтовыми водами на орошаемом сельскохозяйственном поле / Н.М. Химин // Метеорология и гидрология. – 1989. – № 8. – С. 104-111.
4. Лихацевич, А. П. Оценка факторов, формирующих неустойчивую влагообеспеченность сельскохозяйственных культур в гумидной зоне / А. П. Лихацевич, Е. А. Стельмах. – Минск : ООО «Белпринт». – 2002. – 210 с.
5. Лихацевич, А. П. Интегральная схема расчета водного баланса сельскохозяйственного поля / А. П. Лихацевич // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2004. – №2. – С. 13-15.
6. Пономарев, К. К. Составление дифференциальных уравнений / К. К. Пономарев. – Минск : Вышэйшая школа. – 1973. – 560 с.
7. Оросительные системы. Правила проектирования : ТКП 45-3.04-178-2009 (02250). – Введ. 29.12.2009 г. № 441. – Минск : Минстройархитектура. – 2010. – 74 с.
8. Аверьянов, С. Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод / С. Ф. Аверьянов. – М. : Колос. – 1982. – 237 с.
9. Голованов, А. И. Водообмен и оросительные нормы / А. И. Голованов // Природообустройство. – 2008. – № 3. – С. 5-14.
10. Ахмедов, А. Д. Моделирование параметров влагопереноса в зависимости от влажности почвы / А. Д. Ахмедов // Теоретические и технологические основы воспроизводства плодородия почв и урожайность сельскохозяйственных культур : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – М. : РГАУ-МСХА. – 2012. – С. 90-97.
11. Лихацевич, А. П. Исследование гидрофизических характеристик почвогрунтов / А. П. Лихацевич // Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. – 2013. – № 4. – С. 40-45.
12. Никитин, И. С. Режимы осушения и увлажнения сельскохозяйственных культур на осушаемых почвах / И. С. Никитин, Е. П. Панов // Резервы мелиорации : сб. науч. тр. Мещерского филиала ВНИИГиМ. – Рязань : Московский рабочий. – 1978. – С. 112-116.
13. Пыленок, П. И. Природоохранные мелиоративные режимы и технологии / П. Пыленок, И. В. Сидоров. – М. : Россельхозакадемия. – 2004. – 323 с.
14. Образцов, А. С. Системный подход : применение в земледелии / А. С. Образцов. – М. : Агропромиздат. – 1990. – 303 с.

Поступила 17.11.2016 г.