

УДК 502/504:626.845

А. П. ЛИХАЦЕВИЧ

Республиканское унитарное предприятие «Институт мелиорации», Республика Беларусь

**ПРАВИЛА ТРАНСФОРМАЦИИ РЕЖИМА ДОЖДЕВАНИЯ
ОТ ОПЫТНОГО УЧАСТКА К ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПЛОЩАДЯМ**

С использованием теории физического подобия установлены критерии подобия водных режимов сельскохозяйственных культур. Разработаны правила сравнения водных режимов и режимов орошения на разных по величине площадях. Сформулировано правило симметричности сроков полива небольшого участка и крупной производственной площади.

Водный режим, теория подобия, критерии подобия, режим орошения.

Criteria of similarity of water regimes of agricultural crops are established by using a theory of physical similarity. There are developed comparison rules of water regimes and irrigation regimes on different areas. The symmetry rule of irrigation terms of a small site and a large production area is formulated.

Water regime, theory of similarity, criteria of similarity, regime of irrigation.

Согласно А. Н. Костякову, поливы на орошаемой площади должны быть установлены по величине и по времени так, чтобы и верхний, и нижний запасы влаги в активном слое почвы (между которыми колеблется создаваемый поливами новый режим влаги) не превосходили допустимых величин. Опираясь на данную формулировку, можно доводить величину поливной нормы до объема воды, удерживаемого почвой при насыщении от нижнего до верхнего пределов регулирования, но только в том случае, если на полив площади затрачивается не более одних суток. Для того чтобы на значительной площади поддерживать водный режим в заданных пределах, необходим более продолжительный полив, который следует начинать при влажности большей, чем нижний предел регулирования почвенных влагозапасов.

В качестве экспериментального подтверждения сказанному еще в 1980 г. были опубликованы результаты полевых исследований по динамике почвенных влагозапасов на площади с более чем недельной продолжительностью полива (В. Г. Чарный и С. И. Тимохин, УкрНИИГиМ). Теоретическое обобщение данного материала начал А. В. Шевченко (1981) и продолжил В. П. Остапчик

(1984). В этот период решением данной задачи занимались Н. В. Данильченко, Н. В. Ягудин, В. Г. Быков (1982) и др. Полученные выводы вошли в практическое пособие [1], на их основе в 1987 г. был предложен способ полива дождеванием (авторское свидетельство № 1556591), а также выполнено математическое моделирование полива конкретными дождевальными машинами и продолжает совершенствоваться теория режима орошения сельскохозяйственных культур [2, 3].

Чтобы согласовать режимы орошения на разных по величине площадях, можно применить обобщенную физическую теорию, включающую правила соответствия моделируемых систем. Это так называемая теория подобия. Исследуемый процесс можно оценить с помощью обобщенных переменных, называемых критериями подобия. Причем существует стандартный способ установления структуры и количества критериев подобия — так называемая π -теорема, реализуемая с помощью дифференциальных уравнений исследуемого процесса [4].

В частности, режим орошения является средством оптимизации неблагоприятного естественного (природного) баланса влаги и призван восполнить

его приходную часть до требуемого уровня. Поэтому, прежде чем говорить о подобии режимов орошения, следует установить условия подобия водных режимов сельскохозяйственных культур.

Исходным количественным выражением водного баланса почвы можно принять известное уравнение, отражающее закон сохранения вещества в ограниченном объеме пространства (на орошаемой площади) [5]:

$$\frac{\partial w(z, t)}{\partial t} = -\frac{\partial q(z, t)}{\partial z} - \frac{\partial s(z, t)}{\partial z}, \quad (1)$$

где $w(z, t)$ — объемная влажность почвы; $q(z, t)$ — интенсивность потока внутри расчетного слоя; $s(z, t)$ — интенсивность забора воды корнями растений; z — вертикальная координата; t — координата времени.

Число критериев подобия, охватывающих все многообразие условий, описываемых уравнением (1), в соответствии с теорией будет равно трем. Для их идентификации составим безразмерные комбинации размерных величин, входящих в (1), представив их в виде прообразов искомым критериев подобия и обозначив символом λ :

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \mu(q)\mu(t)/\mu(z); \\ \lambda_2 &= \mu(s)\mu(t)/\mu(z); \lambda_3 — \dots, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mu(q)$, $\mu(t)$, $\mu(z)$, $\mu(s)$ — показатели (масштабы) интенсивности водного потока в почве, времени, пространства и интенсивности тока воды к корням растений, определяющие условия однозначности решения (1).

Установленная структура первых двух критериев подобия водных режимов (2) ориентирована на период некоторой продолжительности и не позволяет характеризовать водный режим растений в конкретный момент времени, для которого наилучшей относительной характеристикой водного режима λ_3 является безразмерный симплекс [3]:

$$\lambda_3 = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}. \quad (3)$$

Отношение (3) является хорошо известным комплексным показателем водного режима растений. Над его обоснованием работали П. С. Коссович (1904), Ф. Е. Колясев (1939), О. С. Позднышев (1940) и др. Позднее практически все авторы, исследующие водный режим сельскохозяйственных

культур, представляли отношение (3) как универсальный показатель естественной влагообеспеченности.

Проанализируем структуру первых двух критериев подобия водных режимов сельскохозяйственных культур (2). Введем следующее ограничение: в качестве расчетного выберем наиболее напряженный период вегетации, продолжительность которого для опытного участка равна так называемому минимальному межполивному интервалу, а для производственной площади — минимальной продолжительности полива всей орошаемой площади (при отсутствии атмосферных осадков и водообмена с нижележащими почвенными слоями).

Для расчетного периода справедливо равенство

$$\mu(q, s) = \varepsilon_{cp}(T_p), \quad (4)$$

где $\varepsilon_{cp}(T_p)$ — средняя суточная за расчетный период интенсивность эвапотранспирации с орошаемого участка; T_p — продолжительность расчетного периода.

С учетом (4) из двух безразмерных комплексов (2) получаем суммирующий показатель:

$$\lambda_{1,2} = \varepsilon_{cp}(T_p)\mu(t)/\mu(z). \quad (5)$$

Полученная обобщающая характеристика (5) позволяет уменьшить общее число критериев подобия водных режимов сельскохозяйственных культур для выделенного расчетного периода, представив их соотношениями (3) и (5).

Элементы формулы (5) требуют идентификации, которая возможна лишь после выбора масштабов времени и пространства (длины), в границах которых рассматривается водный баланс орошаемого участка.

Заметим, что $\dim W = \dim z$. Причем известно, что $dW = wdz$. Основываясь на этом равенстве (учитывая безразмерность w), можно признать справедливым следующее соотношение:

$$\mu(z) = \mu(W), \quad (6)$$

где $\mu(W)$ — масштаб почвенных влагозапасов.

Следовательно, показатель (5) можно записать так:

$$\lambda_{1,2} = \varepsilon_{cp}(T_p)\mu(t)/\mu(W). \quad (7)$$

Не вызывает сомнений тот факт,

что масштабы водопотребления и влагозапасов должны быть увязаны между собой, поскольку призваны характеризовать один и тот же объект — систему «растение — среда обитания». Анализируя с данных позиций взаимосвязь $\varepsilon(W)$, приходим к выводу, что справедливо соотношение

$$\mu(W) = W_{\text{ВП}} - W_{\text{НП}}, \quad (8)$$

где $W_{\text{ВП}}$, $W_{\text{НП}}$ — соответственно верхний и нижний пределы, в которых срабатываются на рассматриваемой площади почвенные влагозапасы, формируя водопотребление E .

В общем случае для расчетного периода нижний предел почвенной влажности может быть любым: не только биологически оптимальным, но и допускающим недобор продукции (при соответствующем снижении затрат на полив, выполнении экологических ограничений или при отсутствии орошения). Поэтому при выборе масштаба времени в (7) необходимо предусмотреть и возможность применения устанавливаемого критерия подобия для анализа водного режима сельскохозяйственной культуры не только при орошении, но и в естественных условиях. Решить данную задачу можно, используя в качестве масштаба времени естественную меру времени — сутки, т.е.

$$\mu(t) = \tau = 1 \text{ сут.} \quad (9)$$

Таким образом, в качестве масштаба водопотребления принимаем суточную эвапотранспирацию сельскохозяйственной культуры:

$$\varepsilon_{\text{ср}}(T_p) \mu(t) = \tau \varepsilon_{\text{ср}}, \quad (10)$$

где $\varepsilon_{\text{ср}}$ — интенсивность эвапотранспирации сельскохозяйственной культуры, среднесуточная за период, в течение которого влагозапасы колеблются в пределах $W_{\text{ВП}} \dots W_{\text{НП}}$.

Определив масштабы элементов водного баланса, приходим к выводу, что безразмерный комплекс (7) можно представить так:

$$\lambda_{1,2} = \tau \varepsilon_{\text{ср}} (W_{\text{ВП}} - W_{\text{НП}})^{-1}, \quad (11)$$

где $W_{\text{НП}}$ — наименьшая влагоемкость — верхний предел равновесного влагосодержания почвы при отсутствии подпора от уровня грунтовых вод.

Полученный обобщенный показатель (11) численно равен величине, обратной продолжительности сработки почвенной влаги от наименьшей влаго-

емкости до некоторого нижнего уровня влагонасыщения почвы $W_{\text{НП}}$.

Таким образом, в результате выполненного анализа можно выделить два критерия подобия водных режимов сельскохозяйственных культур:

критерий текущей влагообеспеченности (для оценки влагообеспеченности растений в любой момент времени)

$$\lambda_e = \varepsilon / \varepsilon_m; \quad (12)$$

критерий влагообеспеченности рассматриваемой части вегетационного периода (например, или поливного периода, или межполивного интервала, или др.)

$$\lambda_w = \frac{\tau \varepsilon_{\text{ср}}}{W_{\text{ВП}} - W_{\text{НП}}}, \quad (13)$$

где $W_{\text{ВП}}$, $W_{\text{НП}}$ — соответственно верхний и нижний пределы колебания почвенных влагозапасов в течение расчетного периода; $\varepsilon_{\text{ср}}$ — фактическая среднесуточная интенсивность эвапотранспирации сельскохозяйственной культуры за рассматриваемый расчетный период.

Для того чтобы от водного режима (как целого) перейти к режиму орошения (как к его части), необходимо сформулировать условие перехода. Сделать это, по мнению автора, несложно, поскольку нет сомнений в том, что *режимы орошения могут быть подобны тогда и только тогда, когда подобны создаваемые с их помощью водные режимы*. Именно в этой формулировке заключен принцип подобия режимов орошения сельскохозяйственных культур.

Для подтверждения подобия водных режимов сельскохозяйственных культур достаточно совпадения средних за отдельные промежутки времени (межполивные интервалы) и в целом за оросительный период критериев вегетационной влагообеспеченности (13). Критерий текущей влагообеспеченности сельскохозяйственных культур (12) показывает относительный уровень водопотребления растений в любой момент времени.

Подобие водных режимов на опытном участке и на производственной площади будет возможно, если значения критериев влагообеспеченности поливного цикла сельскохозяйственной культуры за расчетный интервал на опытном поле $\lambda_{\text{Wоп}}$ и на производствен-

ной площади $\lambda_{W_{\text{впр}}}$ будут равны. Если же выполняется дополнительное условие $\lambda_{W_{\text{вон}}} \leq \lambda_{W_{\text{впр}}}$, то водный режим сельскохозяйственной культуры на производственной площади будет гарантированно не хуже водного режима на опытном поле. Следовательно, при прочих равных факторах формирования урожая можно рассчитывать на ту же, что и в опытах, прибавку урожая от полива.

Если же $\lambda_{W_{\text{вон}}} > \lambda_{W_{\text{впр}}}$, то водный режим на производственной площади хуже, чем на опытном поле, соответственно и прибавка урожая от полива будет меньше, чем в опытах.

Для условий орошения показано, что при определении критерия влагообеспеченности поливного цикла для небольшого (опытного) участка, продолжительность орошения которого не превышает одни сутки, справедливо уравнение [3]

$$\lambda_{W_{\text{вон}}} = \frac{\tau}{T_{\text{нм}} + \tau}, \quad (14)$$

где $T_{\text{нм}}$ — норматив продолжительности сработки почвенной влаги (межполивной интервал для опытного участка) в пределах диапазона регулирования почвенных влагозапасов.

Распространив схему (14) на производственную площадь, слагаемую разнородным почвенным покровом, получим [3]:

$$\lambda_{W_{\text{впр}}} = \frac{\tau}{T_{\text{п}}} \left(\frac{\tau}{T_{\text{пр1}} + \tau} + \frac{\tau}{T_{\text{пр1}} + 2\tau} + \dots + \frac{\tau}{T_{\text{пр1}} + T_{\text{п}}} \right), \quad (15)$$

где $T_{\text{п}}$ — продолжительность полива производственной площади; $T_{\text{пр1}}$ — потенциальная продолжительность сработки почвенных влагозапасов до предполивного уровня на первой позиции полива производственной площади (потенциальная потому, что начало сработки предполагается от потенциального уровня равновесного содержания влаги — наименьшей влагоемкости).

При установлении характеристик режима орошения необходимо учитывать следующее правило [3]:

$$T_{\text{п}} \leq T_{\text{нм}}. \quad (16)$$

Кроме того, следует отметить важнейшую деталь. До сих пор обсуждались только показатели водного режима растений W , ε , E . Именно они составляют основу установленных критериев подобия водных режимов (12),

(13). В качестве правила, связывающего данные показатели с основной характеристикой режима орошения — поливной нормой, следует использовать следующее соотношение [3]:

$$m = \varepsilon_{\text{ср}} T_{\text{нм}} \leq W_{\text{вп}} - W_{\text{нп}}. \quad (17)$$

Приведем пример применения предложенных формул (14) и (15) при сравнении критериев влагообеспеченности поливного цикла опытного участка и производственной площади. Примем следующие количественные значения исходных параметров: $T_{\text{нм}} = 9$ сут; $T_{\text{п}} = 8$ сут. Требуется определить начало полива производственной площади нормой (17), при которой водные режимы почв и режимы орошения на производственной площади и на опытном участке будут подобны.

Прежде всего, вычислим критерий влагообеспеченности поливного цикла для опытного участка по (14):

$$\lambda_{W_{\text{вон}}} = \frac{1}{9 + 1} = 0,100.$$

Аналогичный критерий для производственной площади, согласно (15), будет равен:

$$\begin{aligned} \lambda_{W_{\text{впр}}} &= \frac{1}{8} \left(\frac{1}{6 + 1} + \frac{1}{6 + 2} + \frac{1}{9} + \frac{1}{10} + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{11} + \frac{1}{12} + \frac{1}{6 + 7} + \frac{1}{6 + 8} \right) = \\ &= \frac{1}{8} (0,143 + 0,125 + 0,111 + 0,100 + \\ &+ 0,091 + 0,083 + 0,077 + 0,071) = \frac{0,801}{8} = 0,100. \end{aligned}$$

Для того чтобы в рассмотренном примере режим орошения производственной площади был подобен режиму орошения опытного участка, полив производственной площади необходимо начинать на седьмые сутки, а заканчивать на четырнадцатые (опытный участок был полит на десятые сутки от начала сработки почвенных влагозапасов с уровня наименьшей влагоемкости).

Только при соблюдении установленных условий водные режимы на производственной площади и опытном участке будут подобны (как и режимы орошения). А это означает, что урожайность орошаемой сельскохозяйственной

культуры (на опытном участке) и средняя урожайность на всей производственной площади при прочих равных условиях также будет одинаковой.

Расчет по формуле (15) требует предварительного подбора номера суток, с которого следует начинать формирование данного ряда. Вспомогательное правило: середина полива производственной площади должна приходиться на номер даты начала полива опытного участка, другими словами — *сроки полива производственной площади должны быть симметричны относительно срока полива опытного участка*. Только в этом случае можно добиться подобия их водных режимов.

Сформулированное правило симметричности сроков полива при соблюдении условия подобия водных режимов (равенства критериев влагообеспеченности поливного цикла) существенно упрощает применение формулы (15).

Выводы

Опираясь на критерии влагообеспеченности поливного цикла сельскохозяйственной культуры, определенные для опытного участка (14) и производственной площади (15), можно установить границы подобия их режимов орошения. В свою очередь, данные границы определяют правила трансформации режима орошения от любого опытного

участка к производственным площадям.

Список литературы

1. Информационно-советующая система управления орошением [Текст] / В. П. Остапчик [и др.]. — Киев : Урожай, 1989. — 248 с.

2. **Мирошниченко, В. И.** Математическая модель полива ЭДМФ «Кубань» и перспективы использования ее при программном выращивании урожая [Текст] / В. И. Мирошниченко, В. П. Фокин // Программирование урожая и интенсивное использование мелиорированных земель. — Новочеркасск : ЮжНИИГиМ, 1987. — С. 89–94.

3. **Лихацевич, А. П.** Дождевание сельскохозяйственных культур : основы режима при неустойчивой естественной влагообеспеченности [Текст] / А. П. Лихацевич. — Минск : Белорусская наука, 2005. — 278 с.

4. **Сена, Л. А.** Единицы физических величин и их размерности [Текст] / Л. А. Сена. — М. : Наука, 1988. — 432 с.

5. **Химин, Н. М.** Оценка точности уравнений водного баланса орошаемого поля [Текст] / Н. М. Химин // Мелиорация и водное хозяйство. — 1991. — № 2. — С. 28–30.

Материал поступил в редакцию 03.03.2008.

Лихацевич Анатолий Павлович, доктор техн. наук, профессор, зав. лабораторией эксплуатации мелиоративных систем

Тел. +375 (017) 292-47-14, 292-49-41

E-mail: niimel@mail.ru