

??

УДК 631.671.1

## ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ВОДНЫХ РЕЖИМОВ ПОЧВЫ

**А.П.Лихацевич**, доктор технических наук  
РУП «Институт мелиорации»

**Ключевые слова:** гидравлическое моделирование, водный режим почвы, показатели подобия, испаряемость.

### Введение

Одним из важнейших видов мелиорации почв является регулирование их водного режима (гидромелиорация) [1]. Гидромелиорация не является единовременным приемом, процесс регулирования растянут во времени. Учитывая пространственно-временную изменчивость составных элементов водного баланса, зависящую в том числе от свойств почв, очевидна необходимость установления показателей, с применением которых можно объективно оценивать и сравнивать водные режимы почв при разной влаготеплообеспеченности. Это тем более важно при адаптации результатов исследований, проведенных на небольших участках, к большим производственным площадям.

Известным приемом, позволяющим решить поставленную задачу, является моделирование водного режима почв, выполняемое в полном соответствии с общими законами подобия физических систем. Основываясь на этих законах, можно утверждать, что два водных режима будут подобны, если для них соблюдаются условия подобия кинематических и динамических характеристик [2]. Следовательно, для достижения достаточной близости двух водных режимов почв необходимо обеспечить подобие начальных и граничных условий, а также равенство показателей динамического подобия, включающих основные факторы, формирующие водный режим.

### Установление показателей подобия водных режимов почв

Воспользуемся общим подходом, в котором для упрощения анализа предварительно полагаем неизвестной структуру функциональной связи между факторами, обуславливающими изменение водного режима почв. В таком случае для определения структуры показателей подобия можно воспользоваться теоремой Букингэма (π-теоремой) [2].

Запишем в общем виде функцию изменения водного режима почвы за расчетный период:

$$f(Z, P, \Delta W, Q, V, \dots) = 0 \quad (1)$$

где  $Z$  – характеристика иссушающей способности приземного слоя атмосферы;  $P$  – атмосферные осадки;  $\Delta W$  – изменение почвенных влагозапасов;  $Q$  – внутрисочвенный

влагообмен;  $V$  – потери атмосферных осадков на поверхностный сток. Все характеристики водного режима почвы в (1) представляются за расчетный период.

Исходное уравнение (1) включает « $n$ » размерных физических величин, размерность которых определяется через « $m$ » основных величин. В соответствии с  $\pi$ -теоремой данное уравнение может быть преобразовано в зависимость между « $n-m$ » независимыми безразмерными соотношениями, составленными из  $(m+1)$  показателей из числа входящих в уравнение (1) [2, 3].

Уравнение водного баланса общего вида может включать много больше параметров, чем приведено в (1). Нами же задействовано только пять характеристик, которые мы считаем главными при формировании водного режима почв в условиях Беларуси. Причем обратим внимание на то, что все составные элементы водного баланса в (1) имеют одну и ту же размерность ( $[L] = m^3/га$  или  $мм$ , где  $[L]$  – размерность длины). Следовательно, в соответствии с  $\pi$ -теоремой функцию (1) можно преобразовать в систему с четырьмя независимыми безразмерными соотношениями, каждое из которых будет состоять из двух показателей [2, 3].

Принципиальным является выбор из пяти показателей, входящих в уравнение (1), одного основного, который будет являться мерой во всех четырех безразмерных соотношениях, вытекающих из (1). Анализ показывает, что основным фактором, определяющим динамику водного режима почв, является иссушающая способность приземного слоя атмосферы. Именно этот «космический» фактор является ключевым, независимым от всех остальных.

Таким образом, показатель, характеризующий иссушающую способность приземного слоя атмосферы, в соответствии с  $\pi$ -теоремой должен входить во все безразмерные соотношения, в которых в качестве второй характеристики поочередно используются все другие параметры исходного уравнения (1) [2]. Следовательно, искомую систему уравнений составят четыре соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= Z^{x_1} P; \\ \lambda_2 &= Z^{x_2} \Delta W; \\ \lambda_3 &= Z^{x_3} Q; \\ \lambda_4 &= Z^{x_4} V. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В соответствии с рекомендациями теории гидравлического моделирования показатель степени у вторых множителей правой части уравнений (2) принят равным единице. В свою очередь показатели степени первого множителя определяются из условия, чтобы левые части ( $\lambda$ ) системы уравнений (2) были безразмерными [2].

Следуя принятой схеме с учетом размерностей исходных величин можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= L^{x_1} L; \\ \lambda_2 &= L^{x_2} L; \\ \lambda_3 &= L^{x_3} L; \\ \lambda_4 &= L^{x_4} L. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Приравнявая нулю размерности соотношений (3), получаем

$$x_1 + 1 = x_2 + 1 = x_3 + 1 = x_4 + 1 = 0.$$

Следовательно

$$x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = -1. \quad (4)$$

Полученное значение (4) однозначно указывает на структуру искомым безразмерных соотношений (2)

$$\lambda_1 = \frac{P}{Z}; \quad \lambda_2 = \frac{\Delta W}{Z}; \quad \lambda_3 = \frac{Q}{Z}; \quad \lambda_4 = \frac{V}{Z}. \quad (5)$$

Представим водный режим почвы (1) в простейшей балансовой форме

$$\pm \Delta W = P - V - E \pm Q. \quad (6)$$

где  $\pm \Delta W$  – изменение запасов почвенной влаги за расчетный период;

$E$  – эвапотранспирация (суммарное испарение).

С помощью безразмерных параметров (5) балансовое уравнение (6) можно привести к виду

$$\frac{\pm \Delta W}{Z} = \frac{P}{Z} \left( 1 - \frac{V}{P} \right) - \frac{E}{Z} \pm \frac{Q}{Z}. \quad (7)$$

В.И. Сухарев и Ю.И. Сухарев исследовали безразмерные соотношения, входящие в уравнение (7), с учетом в приходной части водного баланса оросительной нормы (дополнительно к атмосферным осадкам) и установили, что эти соотношения в нечерноземном и черноземном регионах Российской Федерации имеют довольно устойчивые значения в пределах одной природно-климатической зоны. На основании результатов исследований авторы предложили использовать эти соотношения в качестве комплексных критериев мелиоративных режимов орошаемых земель [4]. Можно показать, что данный вывод распространяется на все сельскохозяйственные земли, включая орошаемые, осушенные и не требующие мелиорации.

Запишем уравнение (7), используя установленные показатели подобия (5),

$$\pm \lambda_2 = \lambda_1 (1 - \sigma) - \lambda_E \pm \lambda_3. \quad (8)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного стока;  $\lambda_E$  – показатель влагообеспеченности растений

$$\lambda_E = \frac{E}{Z}. \quad (9)$$

В установленных безразмерных соотношениях (5) основным параметром является характеристика иссушающей способности атмосферы, в качестве которой в зависимости от решаемой задачи могут использоваться следующие показатели:

– *потенциал испаряемости*, который эквивалентен теплоэнергетическим ресурсам климата (равен слою воды, который мог бы испариться при расходовании на процесс испарения всех тепловых ресурсов, всей энергии, приходящей к деятельной поверхности земли). Данный показатель был впервые введен в исследовательскую практику Э.М. Ольдекопом (1911) под названием «максимально возможное испарение». Заметим, что такое по величине «максимально возможное испарение» невозможно ни при каких обстоятельствах, поскольку часть энергетических ресурсов, приходящих к поверхности земли (деятельной поверхности), не расходуется на испарение, а тратится на теплообмен в атмосфере и почве. Поэтому термин «максимально возможное испарение» не соответствует физической природе процесса. В качестве альтернативы вводим новый термин «потенциал испаряемости», имеющий тот же физический смысл. Тем не менее, данный показатель с названием, предложенным Э.М. Ольдекопом, «прижился» и используется в исследовательской практике до настоящего времени. Например, методику расчета водно-теплового баланса территории с применением водного эквивалента теплоэнергетических ресурсов климата, разработал в 60-е гг. 20 в. советский ученый В.С. Мезенцев. До настоящего времени методика используется его учениками и последователями в Российской Федерации и в Беларуси;

– *испаряемость*, под которой при данных погодных условиях понимается (по А.Р. Константинову) величина суммарного испарения луга или любой сельскохозяйственной культуры с сомкнутой вегетирующей массой (с сомкнутым травостоем) при оптимальном увлажнении корнеобитаемого слоя почвы. Испаряемость иногда называют потенциалом водопотребления фитоценоза;

– *максимальное суммарное испарение (максимальная эвапотранспирация, максимальное водопотребление)* растений, которое равно суммарному испарению конкретной сельскохозяйственной культуры при оптимальном водно-воздушном режиме почвы. То есть, в отличие от испаряемости (потенциального водопотребления) здесь нет требования о сомкнутом травостое, а рассматривается суммарное испарение при фактическом состоянии вегетирующей массы и оптимальном водно-воздушном режиме корнеобитаемого слоя почвы в любую фазу развития растений.

Ясно, что испаряемость по величине никогда не может сравняться с потенциалом испаряемости (водным эквивалентом теплоэнергетических ресурсов климата). Испаряемость всегда меньше потенциала испаряемости именно на ту часть энергетических ресурсов, приходящих к поверхности земли, которая тратится на теплообмен в атмосфере и почве. В свою очередь, максимальное суммарное испарение сельскохозяйственной культуры может быть численно равно испаряемости (в фазу вегетации с сомкнутой вегети-

рующей массой). Поэтому справедливо ограничение

$$E_m \leq E_0 < E_{p0}, \quad (10)$$

где  $E_m$  – максимальное суммарное испарение (максимальная эвапотранспирация, максимальное водопотребление растений);  $E_0$  – испаряемость;  $E_{p0}$  – потенциал испаряемости.

Отношение атмосферных осадков к потенциалу испаряемости характеризует *водноэнергетический баланс территории* и может использоваться для обобщенной оценки ее влаготеплообеспеченности. В свою очередь, отношение атмосферных осадков к испаряемости отражает *водно-тепловой баланс сельскохозяйственных земель*, а отношение атмосферных осадков к максимальному суммарному испарению характеризует *влаготеплообеспеченность конкретной сельскохозяйственной культуры*.

Ясно, что анализируемые соотношения имеют зональный характер. В соответствии с их физическим смыслом отношение атмосферных осадков к потенциалу испаряемости можно назвать *показателем водообеспеченности территории* (не зависящим от типа подстилающей поверхности), то же отношение к испаряемости – *показателем водообеспеченности сельскохозяйственных земель*, а то же отношение к максимальному суммарному испарению конкретной сельскохозяйственной культуры – *показателем водообеспеченности сельскохозяйственной культуры*

$$\lambda_p = \frac{P}{Z}. \quad (11)$$

Таким образом, применительно к сельскохозяйственным землям (включающим весь комплекс сельскохозяйственных культур региона, возделываемых на разных типах почв) наиболее информативным обобщенным показателем иссушающей способности атмосферы является испаряемость, которая в трактовке А.Р. Константинова представляет собой максимальную потребность сельскохозяйственных земель в воде (именно реальную потребность, а не некий гипотетический, эквивалентный теплоэнергетическим ресурсам климата и реально никогда не достижимый потенциал испаряемости).

Однако следует отметить, что в принципе теоретически возможно и практически полезно установить обобщенную функциональную связь между потенциалом испаряемости, испаряемостью и максимальным суммарным испарением конкретных сельскохозяйственных культур, используя характеристики почвенно-климатических условий и биологических свойств растений. В некоторой степени данная работа частично проведена В.С. Мезенцевым, его учениками и другими пользователями методики гидролого-климатических расчетов (в Беларуси данный подход развивается в работах В.Е. Валуева, А.А. Волчека и др.).

Второй показатель подобия водных режимов корнеобитаемого слоя назовем *показателем влагоемкости почвы*. Он равен отношению изменения содержания почвенной влаги в корнеобитаемом слое за расчетный период к характеристике иссушающей способно-

сти атмосферы, в качестве которой в данном случае принимается либо испаряемость, либо максимальное суммарное испарение за тот же период

$$\lambda_w = \frac{\Delta W}{Z}, \quad (12)$$

где  $\Delta W$  – изменение содержания почвенной влаги в почве за расчетный период.

Показатель влагоемкости почвы характеризует почвенно-гидрологические условия, складывающиеся в корнеобитаемом слое в течение расчетного периода применительно к сельскохозяйственным землям в целом (в знаменателе – испаряемость), либо к конкретной сельскохозяйственной культуре (в знаменателе – максимальное суммарное испарение).

Третий показатель, характеризующий водный режим почвы, можно назвать *показателем внутрипочвенного влагообмена*

$$\lambda_o = \frac{Q}{Z}, \quad (13)$$

где  $Q$  – влагообмен между корнеобитаемым и нижележащими почвенными слоями (и грунтовыми водами) за расчетный период.

Показатель (13) характеризует участие в водопотреблении сельскохозяйственных земель (или сельскохозяйственной культуры) внутрипочвенного влагообмена (между корнеобитаемым и нижележащими почвенными слоями), в значительной мере зависящего от глубины грунтовых вод, регулирование уровня которых и является основной целью сельскохозяйственной гидротехнической мелиорации в Беларуси.

Четвертый показатель подобия учитывает непродуктивную часть атмосферных осадков. Он равен относительным потерям атмосферных осадков на поверхностный сток, зависящим от морфологии подстилающей поверхности (уклона поверхности земли и его протяженности, типа почвы, ее сложения, наличия и вида растительности на ней и т.п.), и характеризует местные условия (в том числе степень эрозионной опасности дождя). В отличие от приведенных выше показателей подобия водных режимов почв его мерой в соответствии с (7), (8) являются атмосферные осадки

$$y = \frac{V}{P}, \quad (14)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного стока;  $V$  – поверхностный сток за расчетный период.

Выше мы использовали для характеристики подобия водных режимов почв термин «показатель», а не «критерий». Заметим, что принятый в теории физических величин и их размерностей термин «критерий» предполагает знание численных значений «критерия», характеризующих граничные условия перехода рассматриваемого процесса в разные качественные состояния. В общем случае, когда эти условия не оговорены, более корректно употреблять термины «показатель», «коэффициент». Выбор любого из названных терминов зависит от решаемой задачи.

**Результаты и обсуждение**

Для подтверждения актуальности гидромелиорации обычно используется показатель водообеспеченности сельскохозяйственных земель (11). Причем в качестве характеристики иссушающей способности атмосферы предлагаются разные модификации расчета величины, пропорциональной испаряемости. Например, для оценки естественной увлажненности земель Шашко Д.И. использовал отношение естественных осадков к сумме среднесуточных дефицитов влажности воздуха за расчетный период, назвав эту величину *показателем атмосферного увлажнения*

$$K_d = \frac{P}{\Sigma d},$$

где  $\Sigma d$  – сумма среднесуточных значений дефицитов влажности воздуха за расчетный период.

Величина показателя атмосферного увлажнения, равная за год 0,45, соответствует, по данным Д.И. Шашко, полосе сбалансированных годовых осадков и испарения (северная граница лесостепи), поэтому он предложил уточненную форму показателя атмосферного увлажнения

$$K_d = \frac{P}{0,45 \Sigma d}.$$

Данная формула применяется в Российской Федерации для характеристики климатических условий при составлении бассейновых схем гидромелиорации.

Для оценки гидротермических условий Г.Т. Селянинов рекомендовал использовать так называемый *гидротермический коэффициент*

$$K_T = \frac{P}{10 T},$$

где  $T$  – сумма среднесуточных температур выше  $10^\circ$  (расчетным является весь вегетационный период).

В общем виде, по Г.Т. Селянину, при значениях  $K_T > 1,5$  необходимы осушительные мелиорации, при  $K_T < 1,5$  такие мелиорации не требуются, а рассматривается необходимость дополнительного увлажнения.

Н.Н. Иванов характеризовал климатические и гидрологические условия, приняв в качестве показателя иссушающей способности атмосферы величину испарения с открытой водной поверхности. Он назвал отношение, подобное (11), *коэффициентом увлажнения*

$$K_y = \frac{P}{E_B},$$

где  $E_B$  – количество влаги, которое в данных климатических и погодных условиях испаряется за расчетный период с открытой водной поверхности.

Для определения месячной величины испарения с открытой водной поверхности применяется эмпирическая формула Н.Н. Иванова

$$E_B = 0,0018 (25 + t)^2(100 - a),$$

где  $t$  – средняя месячная температура воздуха;  $a$  – средняя месячная относительная влажность воздуха.

Показатель  $E_B$  часто называют «испаряемостью», но его величина, рассчитанная по приведенной формуле, в некоторые периоды вегетации растений существенно меньше максимального суммарного испарения и поэтому не может объективно и точно характеризовать водный режим сельскохозяйственных земель или конкретной сельскохозяйственной культуры. Как отмечает А.М. Алпатьев, «испарение с открытой водной поверхности не отражает сезонного хода испарения с оптимально увлажненного фитоценоза, оно обычно нарастает медленнее, чем испаряющая способность приземного слоя атмосферы и испарение с поверхности фитоценоза». В итоге потребность в воде оптимально увлажненной сельскохозяйственной культуры в период максимального накопления растительной массы значительно выше испарения с водной поверхности в тот же период (приблизительно на 15-35%). Поэтому данный показатель следует называть не «испаряемостью», а более корректно в соответствии с его физической сущностью – *испарение с открытой водной поверхности*. Вместе с тем коэффициент увлажнения Н.Н. Иванова отличается простотой определения и часто используется для приближенной оценки водообеспеченности территорий. Например, установлено, что в разных природных зонах коэффициент увлажнения имеет следующие величины: пустыня < 0,1; полупустыня – 0,1-0,2; сухие степи – 0,2-0,3; степи – 0,3-0,5; северные степи – 0,5-0,7; лесостепь – 0,7-0,9 и т. д.

Классик мелиоративной науки А.Н. Костяков для оценки водообеспеченности регионов использовал показатель, названный им *коэффициентом влагообеспеченности*

$$K_{\sigma} = \frac{P}{E_o} \left( 1 - \frac{V}{P} \right) = \lambda_p \cdot 1 - \sigma -$$

Как видим, в формуле А.Н. Костякова объединены два показателя подобию водных режимов почв – водообеспеченности сельскохозяйственных земель (11) и поверхностного стока (14). Согласно А.Н. Костякову, коэффициент влагообеспеченности в избыточно влажной зоне превышает 1,2; при неустойчивом увлажнении он колеблется в пределах 1,2 - 0,8; а в засушливой зоне его значение меньше 0,8.

Предложены и другие варианты показателя водообеспеченности сельскохозяйственных земель, которые используются при обосновании и первичной экспертизе необходимости осушительных или увлажнительных мелиораций. Мы привели наиболее известные [1].

Показатель водообеспеченности сельскохозяйственных земель, как правило, характеризует граничные условия и относительно устойчив в границах определенной природно-климатической зоны [4]. Другие показатели подобию водных режимов почв – поч-

венной влагоемкости (12), внутрипочвенного влагообмена (13) и поверхностного стока (14) – характеризуют местные условия формирования водного баланса и могут применяться при обосновании необходимых режимов увлажнительных (оросительных) мелиораций. В зависимости от решаемой задачи каждый из них может представлять либо начальные условия, либо являться показателем динамического подобия. Обобщающим показателем водно-теплового баланса растений является отношение фактического суммарного испарения к его максимально возможной величине или к испаряемости (9).

Условие подобия водных режимов (водных балансов) почв в целом может быть представлено в стандартной форме [2, 3]

$$l_p, l_w, l_o, y = idem \quad (15)$$

Сравнивая значения показателей водных режимов почв (11)-(14) и устанавливая условия, при которых выполняется равенство (15), можно объективно оценивать водные режимы почв при разной влаготеплообеспеченности. Поэтому показатели оценки и сравнения водных режимов почв (11)-(14) рекомендуется использовать для научно обоснованной адаптации результатов экспериментов, полученных в модельных (стационарных) опытах, к натурным (производственным) условиям регулирования водного режима. Во вторых, показатели (11)-(14) можно применить для количественной оценки водного режима мелиорированных антропогенно преобразованных почв на разных стадиях их эволюции в процессе длительного сельскохозяйственного использования [5].

### Литература

1. Зайдельман, Ф. Р. Мелиорация почв: Учебник. – 3-е изд., испр. и доп. – М: Изд-во МГУ, 2003. – 448 с.
2. Справочник по гидравлическим расчетам. Под ред. П.Г. Киселева. Изд. 4-е, переработ. и доп. – М.: Энергия, 1972. – С. 300-303.
3. Сена, Л. А. Единицы физических величин и их размерности / Л. А. Сена. – М.: Наука, 1988. – 432 с.
4. Сухарев, В.И. Соотношения между элементами водного баланса почв в зоне неустойчивого увлажнения / Сухарев В.И., Сухарев Ю.И. // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2006. – №2. – С. 27-30.
5. Лихацевич, А. П. Условия подобия водных режимов сельскохозяйственных культур / А.П. Лихацевич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2008. – №4. – С. 44-48.

### Summary

#### A.P. Likhatchevich Basis for soil water regimes model operation

Ascertained: Similarity indices for soil water regimes according to the laws of similarity of physical systems based on the hydraulic model operational experience. Water supply index of farming soils characterizes boundary (regional) conditions and is applied for foundation of the requirement of using water conservation. The indices of soil water capacity, internal soil water exchange and surface flow are characterized as local factors of making up water balance and may be used at foundation of the required relationships of reclamation and humidification (irrigation) land developments. Depending on the task to be accomplished each local factor may serve as for evaluation of initial conditions, or to be presented as an index of dynamic similarity. The evaluation and comparison indices of soil water regimes of root-inhabited soil layer is recommended to be used for research-founded adaptation of experimental results obtained in the process of model (stationary) experiments to natural (operating) conditions of water balance control, as well for evaluation of water relationships of reclaimed soils that considerably change their water-physical properties in the process of long-term farming exploitation.

Поступила 21 декабря 2009 г.