

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

А. Р. КОНСТАНТИНОВ, А. С. СУББОТИН

МЕТОДЫ НОРМИРОВАНИЯ ОРОШЕНИЯ

Учебное пособие

Под редакцией доцента Л. П. Серяковой

Рецензенты:

К. Е. Иванов, проф. Ленинградского государственного университета им. А. А. Жданова.

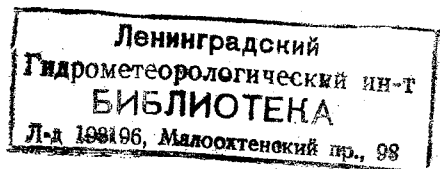
А. П. Вершинин, ст. научн. сотр. Государственного гидрологического института.

Одобрено Ученым советом

Ленинградского гидрометеорологического института

В учебном пособии рассмотрен один из важнейших вопросов мелиорации: назначение норм и сроков поливов. Проанализированы достоинства, недостатки и условия применения всех основных отечественных и зарубежных методов нормирования орошения. Приведены наиболее обоснованные физико-математические модели процессов энерго- и массообмена на орошаемых полях, а также модели программирования урожайности.

Пособие рассчитано на студентов гидрологической специальности гидрометеорологических институтов и университетов. Оно может быть полезно студентам гидромелиоративных вузов, а также агрономам и мелиораторам.



ВВЕДЕНИЕ

Методы нормирования орошения — суть методы расчета поливных режимов, главную часть которых составляют расчеты норм и сроков поливов. В основу этих методов могут быть положены: данные опытных поливов, гидрометеорологическая информация, биофизиологические показатели растений, величины планируемой урожайности и ряд других факторов.

Для успешной эксплуатации орошаемых земель необходимо решить вопросы их рационального размещения по территории страны с учетом климатических условий и источников водоснабжения, всемерно механизировать процессы орошения и выращивания сельскохозяйственных культур на поливных землях и, наконец, определить оптимальные оросительные и поливные режимы. Если проблемы рационального размещения и механизации в полной мере возникли лишь в последние годы, то вопрос оптимизации поливных режимов практиками решался уже на протяжении десятилетий и столетий в прошлом, но еще и сейчас решение этого вопроса нуждается в дальнейшем значительном совершенствовании.

Поливные режимы в зоне неустойчивого естественного увлажнения гораздо в большей степени меняются от года к году, чем по территории. Поэтому для конкретных сухих лет «типовые» поливные нормы оказываются заниженными, а для влажных — завышенными. В том и другом случае имеет место снижение урожая: в засушливые годы из-за заниженных (против оптимальных) влагозапасов почвы, а во влажные — из-за переувлажнения почвы и нарушения ее аэрации. Кроме того, избыточная вода приводит к заболачиванию орошаемых земель и их вторичному засолению. В этом состоит одна из причин большого количества выходящих из строя орошаемых земель, площади которых иногда сопоставимы с долей площадей, вновь вводимых за то же время орошаемых полей.

Большой вклад в развитие методов нормирования орошения внесли русские и советские ученые.

В конце прошлого — начале нашего столетия замечательный русский физик-климатолог П. И. Броунов установил критические периоды в жизни растений, в течение которых недостаточное

водообеспечение особенно сильно снижает урожай. Эти крайне важные положения для оптимизации поливных режимов и до сих пор используются во многих работах.

К. А. Тимирязев, изучая роль воды в жизни растений, показал механизм приспособления растений к условиям недостаточного водоснабжения и пути регулирования потребности растений в воде в процессе выведения новых высокоурожайных сортов при орошении.

В. Р. Вильямс обосновал мероприятия по повышению урожайности почв богарных и мелиорируемых земель, показал, что все факторы жизни сельскохозяйственных растений равнозначны и незаменимы. Интенсивность влияния на урожайность каждого из факторов возрастает с приближением к оптимуму других факторов. Эти положения используются при разработке комплексной агротехники на мелиорируемых землях и при планировании урожайности.

Тесную связь эффективности питания и удобрений с водообеспеченностью растений установил Д. Н. Прянишников. С ростом водопотребления растений эффективность удобрений возрастает; при малой удобренности почв эффективность орошения снижается.

Н. А. Максимов исследовал закономерности роста и развития отдельных органов (органогенеза) растений при разных условиях их водообеспечения. Эти исследования позволили объяснить механизм водопотребления растений, его связь с внешними условиями и природу критических периодов жизни растений.

Водный режим почв, динамику и формы почвенной влаги успешно исследовали А. Ф. Лебедев, В. В. Докучаев, А. А. Измайльский, П. А. Костычев, Г. Н. Высоцкий, П. С. Коссович, А. С. Вериго, Л. А. Разумова, А. А. Роде и др. Огромный вклад в развитие мелиоративной науки внес А. Н. Костяков. Его капитальный труд «Основы мелиораций» и по сей день является настольной книгой советских и многих зарубежных мелиораторов. Много ценного в этом отношении сделал также Б. А. Шумаков.

Из ученых агрометеорологов наиболее весомый вклад в развитие мелиоративной науки (главным образом в вопросы оптимизации поливных и оросительных режимов) внес А. М. Алпатыев своим трудом «Влагооборот культурных растений». Усовершенствованию и развитию его взглядов посвящены многие работы настоящего времени.

Несмотря на большое количество работ, связанных с исследованием микроклимата, водного режима почв и режима орошения, существующие методы определения поливного режима (главным образом норм и сроков поливов), как мы увидим ниже, носят преимущественно локальный характер, т. е. применимы, в основном, для тех условий, для которых они были получены опытным путем. Количественный учет конкретных метеорологических условий или вовсе не производится (расчеты проводятся для средних

многолетних условий, либо для среднезасушливых лет), или делается это недостаточно обоснованно. Вследствие этого применяемые поливные режимы часто не создают оптимальных условий для роста возделываемых сельскохозяйственных культур.

Поэтому главная задача мелиоративной гидрологии как науки состоит в усовершенствовании и оптимизации существующих методов нормирования орошения. Свою долю в это дело должны внести и специалисты гидрологи, получившие в ВУЗе необходимые знания для работы в рассматриваемой области водного хозяйства.

В 1979 г. авторами опубликована первая часть учебного пособия по курсу мелиоративной гидрологии «Водный и тепловой режим орошаемых полей». Настоящее издание «Методы нормирования орошения» является второй частью учебного пособия по курсу мелиоративной гидрологии. Предложенное в учебном пособии разделение по главам методов нормирования орошения является в значительной мере условным, не претендует на основополагающую классификацию и принято для удобства изложения курса.

Глава I. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПОВЫХ ПОЛИВНЫХ И ОРОСИТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

Определение поливного режима заключается в назначении срока и величины конкретного полива; при этом количество воды, поданной на орошаемые поля, носит название поливной нормы. Эта норма измеряется в $\text{м}^3/\text{га}$ или мм слоя.

Оросительный режим характеризуется числом поливов, произведенных за весь вегетационный период, и общим количеством воды, поданной на орошение за этот период. Указанное количество воды носит название оросительной нормы. Оросительная норма имеет такую же размерность, как поливная норма. Очевидно, что сумма поливных норм за вегетационный период составляет оросительную норму.

Типовым поливным или оросительным режимом называется режим, составленный заблаговременно до текущего поливного периода. При разработке такого режима используются непосредственный опыт орошения за предшествующие годы и некоторые характеристики засушливости климата.

1.1. Методы определения режима орошения по опытным данным и характеристикам засушливости климата

В отечественной и зарубежной мелиоративной практике исторически первым практическим приемом составления наиболее подходящего режима орошения явился прием, основанный на

использовании опыта орошения предшествующих лет, а также результатов специальных экспериментов по сравнению между собой различных поливных режимов. По поводу этого приема один из ученых ветеранов-мелиораторов нашей страны С. Д. Лысогоров в 1971 г. писал, что в практике орошаемого земледелия оросительные нормы чаще всего устанавливаются в результате обобщения данных исследований режима орошения, проведенных опытными учреждениями в местных условиях: берут фактическую оросительную норму, соответствующую наилучшему урожаю по величине и экономическим показателям. Оросительные нормы дифференцируют по группам лет с различной степенью сухости. Очевидно, что рассматриваемый прием носит сугубо эмпирический характер, дающий локальные ограниченные в пространстве результаты. Тем не менее этот прием нормирования орошения способствовал существенному развитию эффективности мелиорации и находит применение вплоть до настоящего времени.

Определенные опытным путем годами сложившиеся режимы орошения приурочены обычно к календарным датам или фазам развития растений. Учет последнего обстоятельства позволяет в первом приближении связать поливы с биологическими особенностями культуры и гидрометеорологическими условиями конкретного года, так как именно от этих условий зависит время наступления очередной фазы. Наиболее широко опытное определение поливного режима используется на Украине.

В приложении 1 приводятся рекомендации института орошаемого земледелия (УкрНИИОЗа) по режиму орошения основных сельскохозяйственных культур на юге республики (Ингулецкая оросительная система). Номера поливов 01 и 02 относятся к влагозарядке. Из таблицы видна большая дифференциация режима орошения по культурам: размеры отдельных поливов меняются от 25 до 80 мм; количество поливов — от 3 до 11, а оросительная норма — от 180 до 520 мм. Сроки поливов приурочены к календарным датам. Связь сроков поливов с календарными датами, а не с фазами развития делают рассматриваемую схему менее гибкой, слабо учитывающей метеорологические особенности конкретного года.

Подобные способы определения поливного режима применяются и в степной части РСФСР. Так, для двух зон Ростовской области со сравнительно высоким стоянием уровня грунтовых вод режим орошения озимой пшеницы представлен в приложении 2. При этом учитываются календарные даты или фазы развития пшеницы, способы полива и глубина залегания грунтовых вод (к первой зоне относятся Азовский, Аксайский, Багаевский, Семикаракорский и Сальский районы, а ко второй зоне — Цимлянский, Мартыновский, Зимовниковский, Пролетарский, Орловский и Песчанокопский районы).

Одновременная характеристика сроков полива календарными датами и фазами развития неоднозначна, так как в разные по

погодным условиям года время наступления фаз меняется в пределах от дней до нескольких недель. В этих случаях остается неясным, что делать при несовпадении указанных сроков поливных дат с соответствующими фазами.

Другим сравнительно широко распространенным преимущественно в средней Азии методом расчета оросительных норм является метод, в котором качественно учитываются типы и механический состав почв (путем предварительного районирования, приложение 3), вид культуры K_1 и почвенно-мелиоративные условия K_2 , в том числе и уровень грунтовых вод (при залегании грунтовых вод глубже 3 м их влиянием на режим орошения пренебрегают, при уровне 2—3 м это явление считается слабым). Оросительная норма M (мм) рассчитывается по формуле:

$$M = 10K_1K_2(E_0 - H), \quad (1)$$

где H — осадки; E_0 — испаряемость, рассчитываемая по формуле Н. Н. Иванова (22), в которую, как известно, входит относительная влажность воздуха. Ее среднее значение за период апрель — сентябрь для отдельных зон устанавливается по эмпирической связи в зависимости от температуры воздуха, которая в свою очередь прогнозируется.

Наиболее распространенной орошаемой культурой в Средней Азии является хлопчатник. Значение K_1 для него сравнительно мало меняется по зонам (0,6—0,7), тогда как значение K_2 (задается таблицей) меняется в больших пределах (0,50—1,12). Узким местом рассматриваемого метода расчета является недоучет отличия погодных условий конкретного года от соответствующих климатических характеристик. Кроме того, величины коэффициентов K_1 и K_2 определены интуитивно, они сугубо локальны, а рассчитанная величина испаряемости не точна из-за несовершенства исходной формулы, ориентировочности прогнозируемых значений относительной влажности воздуха и полного отсутствия или весьма грубого учета зависимости испаряемости от доли площади орошаемых полей в общей площади района мелиорации.

Многие годы уточнением режима орошения сельскохозяйственных культур на территории Казахстана занимался Н. С. Горюнов, предложивший типовые режимы орошения для кукурузы, сахарной свеклы, риса, хлопчатника, зерновых колосовых, пожнивных культур, картофеля, капусты. Так, для позднеспелых сортов кукурузы им предложен поливной режим согласно приложению 4.

Обстоятельные исследования влагообеспеченности поливных и оросительных норм земель Белоруссии выполнены И. Г. Голценко. Поливная норма им определяется по формуле

$$m = 0,1Ah_y(W_n - W_{II}) - H, \quad (2)$$

где m — поливная норма, мм; A — скважность или порозность почвы (в долях от единицы объема почвы); h_y — глубина увлаж-

нения, m ; W_v — верхний предел оптимальной влажности (наименьшая полевая влагоемкость), мм; W_n — нижний предел оптимальной влажности (влажность до полива), мм; H — осадки во время полива, мм. Оросительная норма определяется суммированием поливных норм, характерных для определенной зоны, культуры и почв.

В результате расчетов автором предложено типовое распределение числа поливов для основных культур на территории Белоруссии (приложение 5).

Однако поливные и оросительные режимы, вычисленные на основе рассмотренных выше методик, недостаточно учитывают погодные условия конкретных лет, от которых зависит потребность растений в воде, поэтому более правильно было бы использовать такие методики лишь для ориентировочных оценок норм и сроков поливов.

Более надежными являются методики определения поливных режимов, учитывающие степень влагообеспеченности каждого конкретного года из ряда предшествующих лет. Оросительные и поливные режимы, полученные по таким методикам для территории Украины, приводятся, например, И. Н. Длотовским и Л. А. Филиппенко.

Первым автором оросительная норма приравнивалась к дефициту водопотребления, определяемому как разность между испаряемостью и фактическим водопотреблением за вегетационный период на богарных полях при фиксированной (существующей) урожайности. Испаряемость также рассчитывалась по формуле Н. Н. Иванова, а фактическое водопотребление — по сумме осадков и разности начальных и конечных влагозапасов почвы. Оросительные нормы были определены для 11 сельскохозяйственных культур за годы с 95, 75, 50, 25 и 10%-ной обеспеченностью по осадкам.

При расчете оросительных норм на ближайшую перспективу они принимались пропорциональными росту урожайности, а размер урожайности на орошаемых полях к 1980 г. по отдельным зонам УССР взят в соответствии с предварительными проработками автора методики. Так, урожайность озимой пшеницы в степной и лесостепной зонах принималась равной 50 ц/га, в других зонах 40 ц/га, кукурузы на зерно соответственно 90 и 80 ц/га и т. д. В результате расчетов получены оросительные нормы для 87 пунктов, расположенных в южной и северной степи, лесостепи, Полесье, Прикарпатье и Закарпатье УССР. В качестве примера приводим в приложении 6 таблицу оросительных норм по культурам в среднесухом году (75% обеспеченности) для южной степи. Как видно из содержания таблицы, значения норм для разных культур меняются по зонам в весьма широких пределах (от 30 до 400 мм).

На рис. 1 дана картограмма изолиний оросительных норм озимой пшеницы для среднесухого года. Она указывает на рост

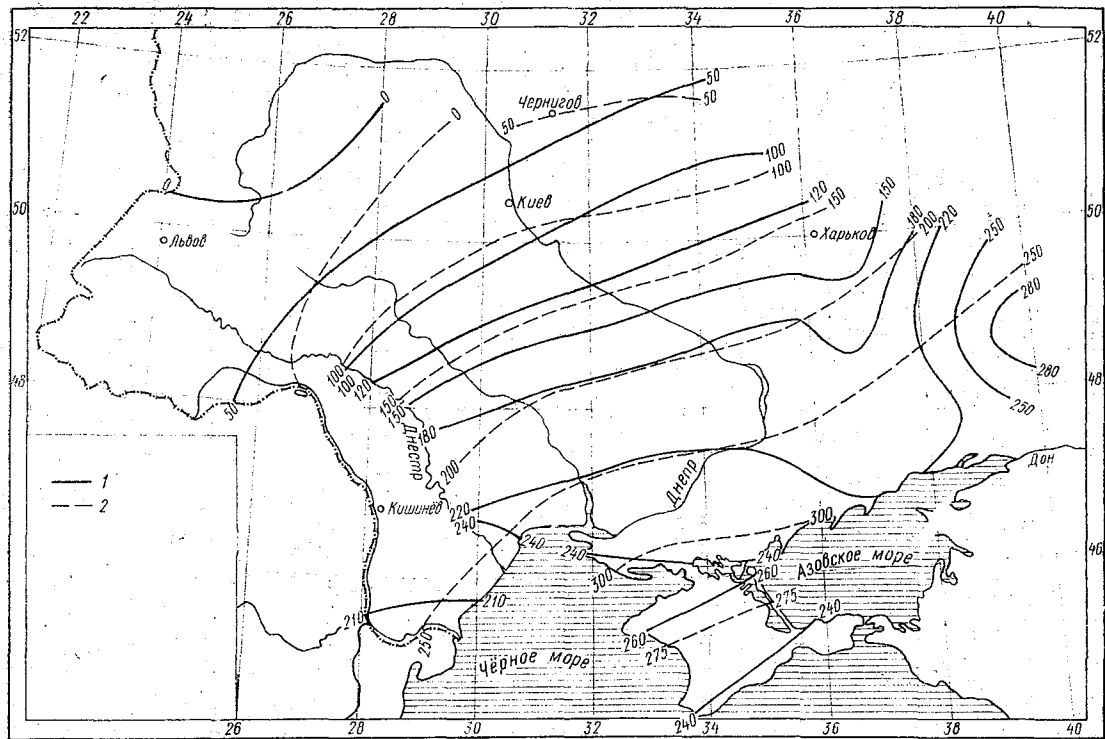


Рис. 1. Оросительные нормы озимой пшеницы на территории Украинской ССР (мм):
 1 — по данным И. Н. Длотовского; 2 — по данным Л. А. Филиппенко

оросительных норм с северо-запада на юго-восток республики от 0 до 280 мм.

Слабыми звеньями методики Н. И. Длотовского являются недостаточно оправданное принятие водопотребления пропорциональным дефициту упругости водяного пара, а также допущение прямой пропорциональности водопотребления планируемой урожайности.

Весьма ценными являются данные по поливному режиму за отдельные межфазные периоды различных культур для лет 25, 50 и 75% обеспеченности по осадкам, полученные Л. А. Филиппенко. Так же, как и И. Н. Длотовский, Л. А. Филиппенко приравнивала поливные нормы к величине дефицитов водопотребления, которые вычислялись как разность между оптимальным и фактическим водопотреблением (испарением). Методика расчета водопотребления, использованная Л. А. Филиппенко, основывается на биофизическом представлении о водопотреблении растений, базирующемся на понятии о так называемых «биологических кривых водопотребления», речь о которых пойдет ниже.

В приложении 7 приведены в качестве примера рассчитанные Л. А. Филиппенко оросительные нормы озимой пшеницы для всей территории Украинской ССР. Как видно из содержания таблицы, оросительная норма для среднесухих лет (75% обеспеченности) меняется от 25 до 280 мм. Соответствующие изолинии норм, нанесенные на картограмму (см. рис. 1), близки к изолиниям, полученным И. Н. Длотовским.

По такой же методике А. Р. Константиновым проведен расчет поливных (по фазам развития) и оросительных норм озимой пшеницы на территории ЕТС за весь период вегетации (приложение 8).

Из таблицы видно, что диапазон колебаний оросительных норм лежит в пределах от 0 до 380 мм в год. На территории Прибалтики, Белорусской ССР, Северо-Западного. Центрального и частично Уральского районов оросительные нормы колеблются от 0 до 50 мм. Они увеличиваются до 160 мм в лесостепной и степной частях Украины, в Краснодарском и Ставропольском краях. Свыше 200 мм оросительные нормы составляют в некоторых областях Центрально-Черноземной полосы, в районах Среднего и Нижнего Заволжья, Кавказа и Закавказья. Более наглядное представление о распределении оросительных норм дает карта, представленная на рис. 2.

Другую методику расчета дефицита водопотребления, а тем самым и оросительных норм предложил С. И. Харченко. Как и в предыдущей методике, здесь за дефицит (d) также принята разность между оптимальным ($E_{\text{опт}}$) и фактическим ($E_{\text{ф}}$) испарением (водопотреблением), однако способы определения водопотребления отличаются от использованных А. Р. Константиновым и Л. А. Филиппенко.

10

В методике С. И. Харченко значение $E_{\text{опт}}$ принимается пропорциональным величине испаряемости E_0

$$E_{\text{опт}} = k_v E_0, \quad (3)$$

где коэффициент k_v зависит от порядкового номера декады после сева соответствующей культуры и принимается одинаковым по группам культур: а) для зерновых (озимая и яровая пшеница, ячмень, гречиха и др.) и трав (люцерна и др.); б) для широколистных пропашных (кукуруза, подсолнечник, хлопчатник, свекла и др.); в) отдельно для ранне- и позднеспелых сортов риса. Испаряемость рассчитывается по известным методам И. И. Будыко и А. Р. Константинова.

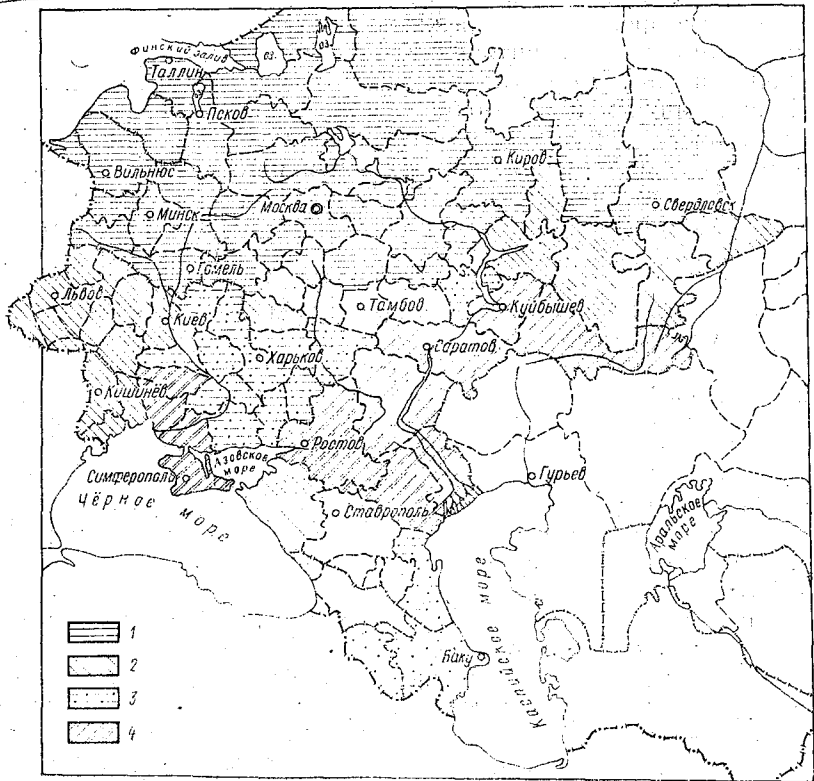


Рис. 2. Недостаток в водопотреблении (оросительная норма) озимой пшеницы:

1 < 500 м³/га; 2 — 500—1500 м³/га; 3 — 1500—2500 м³/га; 4 > 2500 м³/га

Фактическое испарение предлагается определять методом теплового или водного баланса. В последнем случае рекомендуется использовать некоторые дополнительные зависимости по расчету влагообмена корнеобитаемого слоя почвы с нижележащими слоями, что является важным достоинством рассматриваемой методики. Так, капиллярное подпитывание корнеобитаемой зоны

грунтовыми водами рассчитывается по формуле

$$K = \frac{E_0}{e^{mh_{\text{гр}}}} \quad (4)$$

где $h_{\text{гр}}$ — средняя глубина залегания уровня грунтовых вод, (м); m — параметр, зависящий от почвенных характеристик и фаз развития растений. (Для его определения С. И. Харченко дает специальную таблицу).

Учет подпитывания делает методику пригодной для расчета режима орошения полей с высоким уровнем стояния грунтовых вод. Используя свою методику, С. И. Харченко рассчитал дефицит водопотребления различной обеспеченности и соответствующие им типовые и оросительные режимы для основных сельскохозяйственных культур на территории Казахской ССР, Среднеазиатских республик и ЕТС. По результатам расчетов построены карты.

К замечаниям по методике следует отнести недостаточно полный учет биологических особенностей водопотребления культур с помощью коэффициента (k_v) в формуле (3). В методике принят одинаковый ход водопотребления яровых и озимых зерновых и трав, хотя на самом деле k_v по-видимому изменяется. В ряде экспериментальных работ для этих культур приводятся биологические характеристики водопотребления, которые намного (на десятки процентов) отличаются одна от другой по фазам развития культур. Эти характеристики получены на основании обширных экспериментальных данных и с биологической точки зрения их правильность не подлежит сомнению.

Если у зерновых и пропашных культур водопотребление от фазы к фазе меняется достаточно резко, то у трав такая дифференциация прослеживается сравнительно слабо, тогда как она резко (скачкообразно) меняется при укосе. Принятие порядкового номера декады после сева для трав второго и последующих годов вообще теряет свой первоначальный смысл. Как в этом случае поступать при расчетах — не ясно.

Хотя у озимых и яровых зерновых культур (например, у пшеницы) фазы развития одинаковы, однако перезимовка первых оказывает существенное влияние на соотношение интенсивности водопотребления в начальные фазы их развития (третий лист — кущение — выход в трубку). В этот период быстро растет водопотребление яровой пшеницы, тогда как водопотребление озимой пшеницы перед перезимовкой (третий лист — кущение) и непосредственно после нее (кущение — выход в трубку) растет медленно.

Сама по себе характеристика интенсивности роста водопотребления порядковым номером декады после сева недостаточно точна, поскольку продолжительность межфазных периодов развития культур и всего периода вегетации в целом тесно связана с погодными условиями конкретного года. В сухие и жаркие годы эта продолжительность сокращается на 10—30%, а во влажные и

холодные — примерно на столько же увеличивается. Поэтому один и тот же порядковый номер декады в разные годы может приходиться на разные межфазные периоды. Изложенное выше говорит о том, что учет биологических особенностей водопотребления в этой методике посредством введения коэффициента k_p является недостаточно точным.

Рассматриваемый метод обладает и еще одним недостатком, заключающимся в следующем. Метод исходит в своей основе из прямой пропорциональности водопотребления влагозапасам почвы во всем диапазоне изменения последних. Однако линейная зависимость водопотребления от влагозапасов почвы справедлива лишь при неизменном механизме перемещения почвенной влаги. На самом же деле в природе с ростом влагозапасов почвы происходит переход одной формы передвижения влаги в другую, сопровождающийся существенным ростом интенсивности переноса.

Наиболее низкая интенсивность передвижения почвенной влаги, происходящая в форме водяного пара, отмечается при влажности почвы, равной максимальной гигроскопичности (МГ). При «влажности завядания» (ВЗ) заметную роль начинает играть значительно более интенсивное пленочное передвижение влаги, которое при «влажности разрыва капилляров» (РК) переходит в наиболее интенсивное перемещение — капиллярное. Это качественное изменение форм передвижения влаги с ростом увлажненности почвы приводит к тому, что водопотребление растет быстрее, чем изменяются влагозапасы почвы. Прямая пропорциональность между влагозапасами и водопотреблением нарушается (рис. 3). В пре-

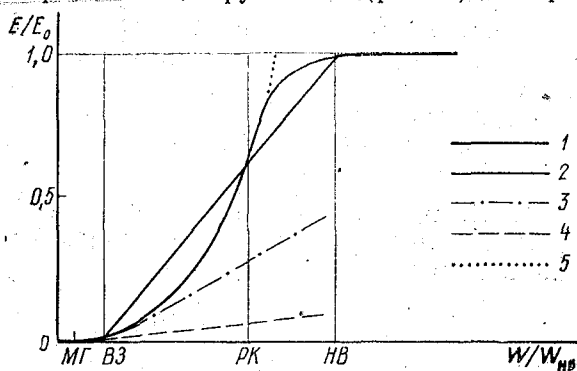


Рис. 3. Схема зависимости относительного водопотребления $\frac{E}{E_0}$ от влагозапасов почвы (% от $W_{нв}$):

1 — фактическое водопотребление; 2 — ход зависимости, принятый за основу в тепловоднобалансовом методе; 3, 4, 5 — интенсивность парового, пленочного и капиллярного передвижения влаги

делах от влажности разрыва капилляров до наименьшей влагоемкости (НВ) интенсивность роста водопотребления снижается, вследствие постепенного приближения испарения к своему пределу — испаряемости. В указанном интервале увлажнения почвы, характерном для орошаемых условий, использование прямой пропорциональности между влагозапасами и водопотреблением приводит к завышению последнего, а тем самым и к завышению поливных и оросительных норм.

Результаты расчетов режимов орошения, полученные по приведенным выше методикам, могут быть использованы проектными и планирующими организациями, но они практически неприменимы для диспетчерской корректировки поливного режима в конкретном году. Это происходит оттого, что даже лучшие из рассмотренных методик рекомендуют режимы орошения для лет с фиксированной обеспеченностью дефицита водопотребления, в то время как, во-первых, гидрометеорологические условия конкретного года могут отличаться от условий, заложенных в расчетах и, во-вторых, в настоящее время отсутствует возможность надежного прогноза тепловлагообеспеченности текущего года, что исключает необходимую для получения наивысших урожаев точную разработку поливного режима (в основном сроков поливов) даже с небольшой заблаговременностью.

1.2. Методы расчета режима орошения по планируемой урожайности

Наиболее полные исследования связи режима орошения с урожайностью проводил один из создателей научных основ отечественной мелиорации А. Н. Костяков. Он полагал, что поливной и оросительный режимы, обеспечивающие планируемую урожайность, должны соответствовать: а) потребности растений в воде в каждую фазу развития и высоким урожаям культуры при определенной агротехнике; б) необходимому регулированию водного, теплового, питательного и солевого режимов почвы; в) нарастающему повышению плодородия почвы орошаемых земель, не допускающему эрозии, заболачивания и засоления почвы и г) плановым урожайности, организации и производительности труда.

А. Н. Костяковым была предложена формула для расчета оросительных норм (M , мм) по плановой урожайности, нашедшая впоследствии широкое применение

$$M = 10 \kappa_{\text{в}} U, \quad (5)$$

где U — плановая (или требуемая) урожайность ц/га; $\kappa_{\text{в}}$ — коэффициент водопотребления, мм/ц. Автору формулы (5) уже в 20—30-х гг. было известно, что $\kappa_{\text{в}}$ зависит от вида культуры, ее фазы, климатических условий, уровней урожайности, плодородия почвы и агротехники. Полагалось, что при данных климатических условиях за весь вегетационный период величина M , определяемая по формуле (5), с повышением плодородия почвы и увеличением урожаев возрастает не пропорционально росту урожайности, а более замедленно. Эти важные замечания некоторыми авторами

последующих методик, отпочковавшихся от методики А. Н. Костякова, были преданы забвению, поскольку многие из них принимали прямую пропорциональность между водопотреблением и урожайностью вплоть до области оптимального увлажнения и на фоне высокого уровня агротехники.

Практически коэффициент k_v определяется для заданной территории путем сопоставления за предыдущие годы урожайности с расходом воды. Иногда это делалось отдельно для засушливых и влажных лет. Оросительные нормы при этом определяются как разность между необходимым водопотреблением и имеющимися запасами влаги в почве, с учетом выпадающих осадков, а сроки поливов приурочивают к различным фазам развития растений, исходя из средних климатических условий и накопленного опыта.

Рассмотренная методика А. Н. Костякова и ее модификации сослужили хорошую службу сельскому хозяйству на орошаемых землях, так как положили основу получения высоких урожаев и показали необходимость научного подхода к определению оросительных норм и поливного режима. Слабым местом этих методик является принятие упомянутого выше положения о прямой пропорциональности водопотребления величине урожайности.

Действительно, при прочих равных условиях, с ростом урожайности пропорционально растет и водопотребление растений. Как будет показано ниже, если сравнивать между собой, например, прирост растительной массы ΔM и водопотребление культуры E за одинаковые межфазные периоды Φ_i , то прямая пропорциональность между E и ΔM в первом приближении сохраняется. Если же проводить подобное сравнение за весь вегетационный период, как это делается для определения оросительных норм, то возникают существенные отклонения от прямой пропорциональности.

На рис. 4 в качестве примера приведена полученная в экспериментальных исследованиях связь среднесуточного водопотребления кукурузы E за период вегетации с урожаем зерна и силосной массы. Пропорциональность между этими величинами имеет место лишь при малой и средней интенсивности водопотребления, что обычно соответствует малым и средним влагозапасам почвы. При влагозапасах почвы, близких к оптимальным (что характерно для орошаемых полей), когда водопотребление (E) стремится к испаряемости (E_0), прямая пропорциональность между E и $У$ нарушается из-за разной величины коэффициента водопотребления. Это происходит потому, что величина k_v зависит как от метеорологических условий, характеризуемых величиной E_0 , так и от интенсивности трансформации метеорологических величин внутри травостоя, т. е. фитоклимата обитания растений. При малом и среднем водопотреблении (а следовательно, при малых и средних влагозапасах почвы) наземная растительная масса не получает хорошего развития, листва, как правило, не полностью

смыкается и не затеняет почву. В этом случае лучи солнца и ветер проникают сквозь растительный покров вплоть до поверхности почвы, увеличивают ее иссушение, благодаря чему наступает

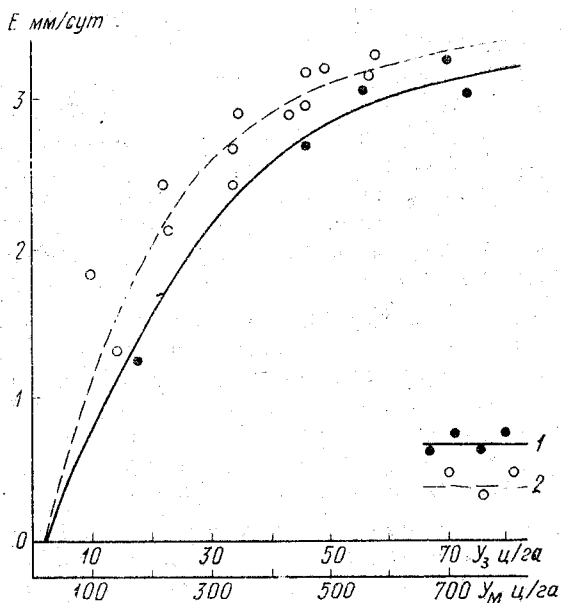


Рис. 4. Зависимость урожая кукурузы от средне-суточного водопотребления:

1 — для силосной массы; 2 — для зерна

сотни процентов. Водопотребление в этом случае достигает своего предела, обеспеченного количеством приходящего тепла, и выше подняться не может, тогда как урожайность может сколь угодно расти по мере повышения почвенного плодородия.

Поскольку сами коэффициенты водопотребления зависят от погодных условий, постольку использование их нормативных значений, определенных для средних условий климата, применительно к погодным условиям отдельных лет неизбежно приводит к несоответствию оросительных норм водопотреблению растений, обуславливая тем самым отклонение фактических влагозапасов от оптимальных. Кроме того, величины урожайности, наряду с погодными условиями и влагозапасами почвы, зависят от ее плодородия и уровня агротехники, весьма изменчивых по территории. Все это говорит об ограниченных возможностях применения рассматриваемых методик как в пространстве (из-за изменчивости почвенного плодородия), так и во времени (в основном из-за изменчивости уровня агротехники). Таким образом, принятие водопотребления пропорциональным урожайности может быть использовано при расчете поливного режима, но оно не является достаточно надежным основанием для расчета оросительных норм.

угнетение растений, снижается прирост растительной массы и урожайность. Коэффициент водопотребления растений в этом случае оказывается значительным по величине.

При высоком водопотреблении (а следовательно, при влаготемпературном, близких к оптимальным), когда его величина приближается к E_0 , создается наиболее благоприятный микроклимат внутри сомкнутого травостоя. Коэффициент водопотребления снижается до минимальных значений, увеличивая продуктивность сельскохозяйственных полей на десятки и даже

Несмотря на отмеченные недостатки рассматриваемая методика находит некоторое применение. В частности, расчет режима орошения с учетом урожайности, планируемой на предстоящие годы, выполнил И. Н. Длотовский, о чем было кратко сказано в параграфе 1.1.

Интересные агроклиматические расчеты эффективности орошения проделал Д. И. Шашко с целью оценки целесообразности орошения в разных зонах. За меру увлажнения территории он принял отношение годовых сумм осадков к испаряемости, а за меру биологической продуктивности — биоклиматический потенциал БКП, синтезирующий в себе влияние на биологическую продуктивность тепла и влаги, определяемых из условия

$$\text{БКП} = k_6 \frac{\sum T > 10^\circ}{1000^\circ} \quad (6)$$

где k_6 — коэффициент биологической продуктивности растений, зависящий от условий влагообеспеченности; $\sum T > 10^\circ$ — сумма биологически активных температур (выше 10°). Правомерность формулы (6) автор подтверждает многочисленными экспериментальными данными.

Исходя из учения К. А. Тимирязева о поглощении растениями солнечной энергии и применяя фактические данные по относительному освоению солнечной энергии растениями при разном увлажнении, Д. И. Шашко указал на большую продуктивность одинаковых по размеру поливов в зонах с большим теплообеспечением. Построен график связи себестоимости центнера зерна в зависимости от уровня урожайности в различных зонах. График подтверждает вывод о большей экономической эффективности орошения в засушливых зонах и может служить основой для планирования урожайности на мелиорируемых землях.

Интересный статистический метод расчета оросительных и поливных норм изложен в работах Л. А. Разумовой и Н. Б. Мещаниновой. Для определения оросительных норм ими устанавливается связь урожая (яровой пшеницы и кукурузы) с суммарным расходом воды за период вегетации в виде

$$Y = a\delta W + b, \quad (7)$$

где $\delta W = W_1 - W_2 + H$ — суммарный расход влаги за период вегетации при орошении; W_1 , W_2 и H — средние многолетние начальные и конечные влагозапасы почвы, а также осадки за период посев — восковая спелость; a и b — эмпирические коэффициенты. При расчете оросительных норм за конкретный год учитываются отличия фактических величин W_1 , W_2 и H от средних многолетних.

Оросительные нормы M определяются как разность между суммарными расходами воды при орошении, обеспечивающими

получение заданного урожая Y , и суммарными расходами в естественных условиях увлажнения:

$$M = \delta W - \delta W', \quad (8)$$

где $\delta W' = W'_1 - W'_2 + H'$, а «штрих» обозначает условия естественного увлажнения.

Способ расчета оросительных норм при отсутствии средних многолетних данных о влагозапасах почвы W'_1 и W'_2 существенно осложняется. В этом случае декадные изменения влагозапасов почвы рассчитываются по эмпирическим зависимостям, учитывающим начальные влагозапасы, температуру воздуха T и осадки H , измеренные на метеостанциях. При расчете норм и сроков полива величины W_1 и W_2 определяются с помощью эмпирических зависимостей, полученных в условиях орошаемых полей и учитывающих кроме W , T и H , еще фазу развития культуры, механический состав почв и количество дней, прошедших с начала роста стебля.

В основе методики Л. А. Разумовой и Н. Б. Мещаниновой лежит линейная связь урожайности с водопотреблением (7), которая, как уже говорилось (см. рис. 3), справедлива лишь при ограниченном водопотреблении (при $E < E_0$). При $E \rightarrow E_0$, что типично для орошаемых полей, эта связь перестает быть линейной, о чем дополнительно свидетельствует и приведенный на рис. 5

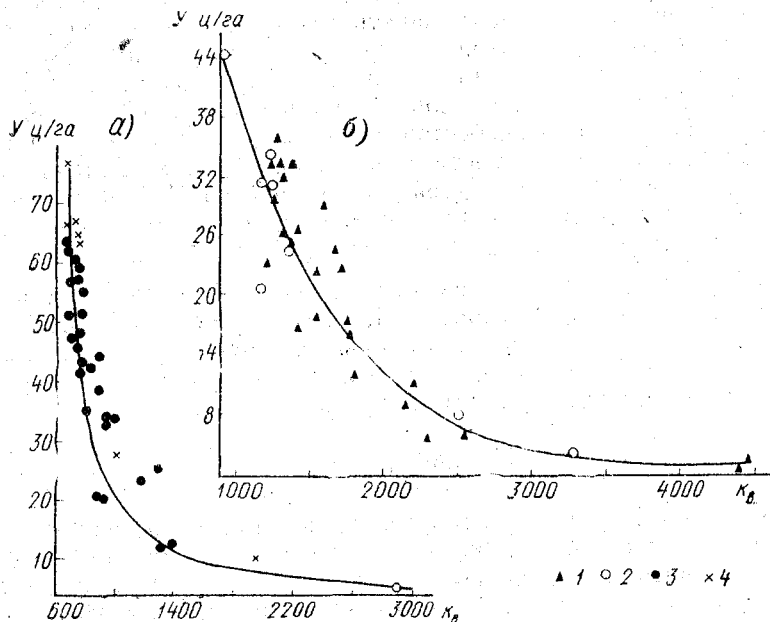


Рис. 5. Связь урожайев зерна кукурузы (а) и яровой пшеницы (б) с коэффициентом водопотребления (K_B):

1 — Кулундинская степь; 2 — Оренбургская степь;
3 — Поволжье; 4 — Северный Кавказ

график, полученный авторами рассматриваемой методики. Поэтому для высоких урожаев рассчитанные с помощью этой методики оросительные нормы должны завышаться, а водопотребление может даже превосходить величину E_0 , что для больших площадей лишено физического смысла.

Учет величины подпитывания корнеобитаемого слоя почвы грунтовыми водами в рассматриваемой методике производится по рекомендациям И. А. Шарова, согласно которым интенсивность подпитывания зависит от механического состава почв и глубины залегания грунтовых вод. Глубина распространения корневой системы, изменяющаяся от фазы к фазе развития растений, при этом, к сожалению, не учитывается.

Глава II. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМ И СРОКОВ ПОЛИВОВ

Рассмотренные в предыдущей главе методы определения режима орошения позволяют установить норму и срок полива для некоторых заранее заданных или спрогнозированных условий (например, дефицита водопотребления определенной обеспеченности или плановой урожайности). Однако для эффективного использования орошаемых площадей мелиораторам необходимо корректировать режимы орошений в зависимости от конкретной гидрометеорологической обстановки и фактической потребности растений в почвенной влаге. Такая корректировка обычно проводится или по данным о влагозапасах почвы или по физиологическим характеристикам растений.

2.1. Определение норм и сроков поливов по метеорологическим данным и влагозапасам почвы

Многочисленными исследованиями установлено, что наилучшие условия для развития растений имеют место в том случае, когда влажность почвы не превышает наименьшей влагоемкости и не опускается менее так называемого нижнего оптимума увлажнения, который обычно принимается равным 40—60% от наименьшей влагоемкости. Исходя из этой предпосылки, мелиораторами сделаны два важных практических вывода:

— срок полива назначается тогда, когда влажность почвы на орошаемом поле уменьшится настолько, что станет близкой или равной нижнему оптимуму увлажнения;

— величина поливной нормы m вычисляется по выражению

$$m = W_{\text{нв}} - W_{\text{но}}, \quad (9)$$

где $W_{\text{нв}}$ — влагозапас расчетного слоя почвы (мм) при влажности, равной наименьшей влагоемкости; $W_{\text{но}}$ — то же при влажности, равной нижнему оптимуму увлажнения (мощность расчет-

ного слоя зависит от глубины распространения корневой системы, которая в свою очередь определяется видом культуры и фазой ее развития). Таким образом, для определения и срока полива и поливной нормы необходимо иметь сведения о влагозапасах почвы.

В первой части учебного пособия по мелиоративной гидрологии [2] отмечалось, что в настоящее время, в связи с несовершенством техники измерения, инструментальные определения влагозапасов не могут обеспечить того объема информации, который требуется для массовой корректировки поливных режимов. Поэтому влагозапасы почвы и их изменения предпочтительнее определять вычислением по уравнению водного баланса орошаемого поля.

В зависимости от выбора границ, очерчивающих участок суши, для которого записывается уравнение, а также от конкретных природных условий (например, наличия или отсутствия фильтрации с поверхности в грунтовые воды), это уравнение может содержать различное число членов. Так, для корнеобитаемой зоны поля при отсутствии поверхностного притока и стока воды и относительно глубоком залегании грунтовых вод (2,5—3 м), исключаящем их сколько-нибудь значительный водообмен с корнеобитаемой зоной, уравнение имеет вид:

$$W_k = W_n - E + H, \quad (10)$$

где W_k и W_n — соответственно влагозапасы в конце и начале периода, для которого рассчитывается баланс; E — испарение (водопотребление); H — осадки (размерность всех величин, мм).

Если расчеты по этому уравнению производить с момента окончания предыдущего полива или с весны, когда почва обычно бывает достаточно увлажнена, то очевидно, что $W_n = W_{но}$, и для определения W_k необходимо получить сведения только о E и H . Выполняя вычисления, например, каждые пять дней, можно обнаружить, когда W_k приблизится по величине к $W_{но}$. Это будет указанием на необходимость назначения даты очередного полива.

Следовательно, корректировка поливного режима во многих случаях сводится к определению осадков и испарения (водопотребления). Основные способы измерения и расчета этих элементов водного баланса рассмотрены в первой части учебного пособия. Ниже приводятся эмпирические формулы и методы определения испарения и продолжительности межполивного периода.

2.1.1. Расчет испарения с сельскохозяйственных полей и продолжительности межполивного периода по температуре и влажности воздуха

В ряде методик при расчете водопотребления культур погодные условия характеризуются в основном средней температурой воздуха или ее различными модификациями.

Одной из первых у нас в стране для расчета суммарного водопотребления И. А. Шаровым была предложена формула

$$E=0,1(\kappa\Sigma T+4n), \quad (11)$$

где E — количество воды, расходуемое на транспирацию и испарение с почвы за период вегетации, мм; κ — эмпирический параметр, характеризующий расход воды на испарение, приходящийся на 1° среднесуточной температуры воздуха (для хлопковых полей Средней Азии, например, $\kappa=2$); ΣT — сумма среднесуточных температур за вегетационный период; n — число дней вегетационного периода. Эта формула достаточно широко применялась в 40—50-х гг. в проектных расчетах.

Для расчета суммарного расхода воды за вегетационный период в районе Северного Кавказа (при влажности почвы не менее 65—70% наименьшей влагоемкости) К. Г. Льгов предлагает формулу

$$E=0,19\Sigma T, \quad (12)$$

в которой те же обозначения, что и в предыдущей формуле.

Для тех же условий при расчете интервалов времени между поливами Г. К. Льгов предлагает формулу.

$$\tau = \frac{W + \alpha H_{\text{эф}}}{10\kappa T}, \quad (13)$$

где τ — время до очередного полива (сут.); W — продуктивные влагозапасы, мм; $H_{\text{эф}}$ — эффективные осадки (от дождей со слоем более 5 мм), мм; α — коэффициент использования осадков, равный 0,6—0,7; κ — расход воды на испарение, приходящийся на 1° температуры воздуха для данного периода развития растений; T — среднесуточная температура, по прогнозу.

Эта методика позволяет рассчитывать как оросительные, так и поливные нормы. Она нашла достаточно широкое применение на территории Северного Кавказа и на некоторых прилегающих территориях.

В рассматриваемой и многих других работах не совсем правомерно пренебрегается влиянием на водопотребление растений осадков, суммой меньшей 5 мм. Происходит это потому, что пророст влагозапасов почвы от таких осадков обычно лежит в пределах точности измерения влагозапасов почвы и поэтому не всегда может быть обнаружен экспериментально. Кроме того, часть этих осадков расходуется на смачивание поверхности растений, а также стекает в почву по стеблям растений, не попадая в междурядья, где обычно берутся почвенные образцы на влажность. Однако надо помнить, что вода, расходуемая на смачивание растений, не пропадает даром, а испаряясь, снижает температуру растений и повышает влажность воздуха как внутри травостоя, так и над ним. Эта же вода повышает тургор листьев растений. Пока она не испарилась, транспирация растений примерно на ту же

величину сокращается; из-за повышенной влажности воздуха внутри травостоя транспирация и испарение, с затененной почвы также снижаются. Все это говорит о том, что пренебрежение суммами осадков меньше 5 мм недостаточно обосновано.

В работах Д. Б. Циприса продолжительность промежутка времени между поливами τ (сутки) определяется из эмпирического соотношения

$$\tau = \tau_0 + 0,2H - 0,2T, \quad (14)$$

где H — осадки (свыше 5 мм) за период между поливами; T — среднесуточная температура воздуха, а $\tau_0 \approx 5-7$ суток — средняя продолжительность межполивного периода.

Вследствие доведения методики до практических рекомендаций, простоты и сравнительно малой трудоемкости, она нашла применение для расчетов поливного и оросительного режимов в Ленинградской области и в некоторых других районах Нечерноземья.

Эмпирическая формула для расчета водопотребления приводится в работах американских ученых Х. Ф. Блейни и У. Д. Кридла

$$E = \kappa_b Q \frac{46T + 813}{100}, \quad (15)$$

где κ_b — эмпирический коэффициент, зависящий от биологических свойств растений; Q — средняя месячная продолжительность дня (в % от средней продолжительности за год); T — средняя месячная температура воздуха.

Ф. Ф. Давитая и Ю. С. Мельником предложен метод расчета водопотребления некоторых культур на предстоящий вегетационный период путем предварительного прогноза их теплообеспеченности. Этот прогноз основан на корреляционной связи «части с целым», т. е. даты перехода температуры воздуха через 10° весной с суммой температур выше 10° за весь вегетационный период. Сумма этих температур для ЕТС связывается с радиационным балансом эмпирическим соотношением

$$R = 12,1 \cdot 10^{-3} \sum T_{>10^\circ} + 9,9. \quad (16)$$

По величине R рассчитывается водопотребление:

$$E = \kappa_b \frac{R}{L}, \quad (17)$$

где коэффициент κ_b , как и ранее, учитывает биологические свойства культуры. По поводу этого метода следует заметить, что величина R , рассчитанная по уравнению (16), характерна для богарных условий, тогда как на орошаемых полях в связи с уменьшением альбедо поверхности, величина R возрастает до R_0 , характерной для увлажненной поверхности поля.

В работах Т. И. Турманидзе также предложен метод расчета ожидаемого водопотребления сельхозкультур по сумме темпера-

тур от даты перехода температуры через 10° весной до конца августа. С суммой температур связывается сумма дефицитов упругости водяного пара, произведение которой на коэффициент «потребности в воде» характеризует величину водопотребления.

В широко распространенной в США методике расчета оросительных норм (Ц. У. Торнтвайт и др.), месячная величина водопотребления определяется по формуле

$$E = 1,6 \left(\frac{10T}{T} \right)^a, \quad (18)$$

где T — средняя месячная температура воздуха; величина $I = f_1(T)$ определяется суммой средних месячных индексов тепла; $a = f_2(T)$ — эмпирический коэффициент, одинаковый для всех сельскохозяйственных культур. Определение величин I и a , кроме эмпирических формул, может быть осуществлено с помощью вспомогательных номограмм и таблиц.

Выше приведены лишь некоторые из наиболее распространенных формул, в которых водопотребление растений, а следовательно, и режим орошения связывается в основном с температурой воздуха. Такой подход не может дать надежных результатов в различных регионах страны, ибо температура воздуха не исчерпывает собою влияние условий погоды на испарение и испаряемость. Известно, например, что средние годовые суммы температуры воздуха на Черноморском побережье Кавказа и в пустыне Средней Азии примерно одинаковы, тогда как испаряемость, а тем более испарение, отличаются друг от друга на сотни процентов. В южно-степной части Украины, на Кубани и Нижнем Поволжье суммы температур также близки между собою, а величины испарения и испаряемости различаются на десятки процентов. Даже в условиях одного пункта, в зависимости от осадков конкретного года, величина испарения и испаряемости при приблизительно одинаковой температуре различается на 10—30%.

Все это говорит о том, что рассмотренные методики являются недостаточно точными. В первом приближении (с ошибками 10—30%) ими можно пользоваться лишь в тех регионах, для которых были получены исходные эмпирические зависимости. Авторы некоторых из этих методик отдают себе отчет в этом и ограничивают зону использования своей методики узким регионом, например, Ленинградской областью, территорией Грузии, Средней Азии или штата Небраски.

Во многих методиках расчета поливного режима величину водопотребления сельскохозяйственных культур принимают пропорциональной дефициту упругости водяного пара d , рассчитанному по температуре и влажности воздуха, измеренным в психометрических будках на метеостанции

$$d(T) = e_{\text{нас}}(T) - e_{\text{изм}}, \quad (19)$$

где $e_{\text{нас}}$ — упругость насыщения водяного пара при температуре воздуха; $e_{\text{изм}}$ — упругость водяного пара, полученная по измере-

ниям температуры сухого и смоченного термометров в будке. При этом упускается из виду, что испарение и испаряемость пропорциональны дефициту упругости водяного пара, рассчитанному не по температуре воздуха $d(T)$, а по температуре испаряющей поверхности $d(T_n)$. Эти температуры существенно отличаются одна от другой. Величины рассчитанных дефицитов $d(T)$ и $d(T_n)$ различаются до ± 6 гПа для водяной поверхности, до 30—40 гПа для поверхности почвы, лишенной растительности и до 10—12 гПа для луга и полей, занятых сельскохозяйственными культурами.

Использование при определении водопотребления величин $d(T)$ вместо $d(T_n)$ приводит к значительному завышению водопотребления сельскохозяйственных культур, а тем самым и поливных норм в засушливых районах страны и их некоторому занижению в зоне избыточного увлажнения. С целью устранения отмеченного недостатка А. Р. Константиновым и Л. Е. Пасечнюк подготовлены рекомендации по введению необходимых поправок в $d(T)$, используя при этом лишь данные наблюдений на метеостанциях.

В ряде работ водопотребление в условиях орошения (следовательно, E близко к E_0) выражается эмпирической связью одновременно с температурой и относительной влажностью воздуха r (%). Так, в работах Д. А. Штойко водопотребление (в мм за расчетный период) до смыкания травостоя и после налива зерна рассчитывается по одной формуле, а в остальной период вегетации — по другой формуле

$$\begin{aligned} E &= 0,1\Sigma T (0,1 - 0,01r) \\ E &= 0,1\Sigma T [0,1T - (1 - 0,01r)], \end{aligned} \quad (20)$$

из которых следует не подтвержденное экспериментально свойство фитоценозов скачкообразно изменять свое водопотребление в процессе онтогенеза.

В работе Т. Клятта (ГДР) водопотребление в условиях орошения рассчитывается по формуле

$$E = 0,033 (2T + 0,2T^2) + 0,04(80 - r), \quad (21)$$

а в работе Н. Н. Иванова испарение с водной поверхности (которое часто отождествляют с испаряемостью) за тот же период определяется из соотношения

$$E = 0,00074 (25 + T^2) (100 - r). \quad (22)$$

При этом формула (21) в неявном виде, а (22) в явном выражает пропорциональность водопотребления дефициту упругости водяного пара, поскольку величина $25 + T^2$ в диапазоне наиболее часто встречающихся в природе температур воздуха пропорциональна упругости насыщения воздуха при этой температуре.

2.1.2. Расчет испарения с сельскохозяйственных полей и поливных норм по комплексу метеорологических данных и «уравнению связи»

Оригинальный метод нормирования орошения предложен метеорологами, которые уже на протяжении ряда лет исследуют трансформацию метеорологических условий на сельскохозяйственных полях под влиянием орошения. На основании этих исследований в ГГО предложена методика, связанная с расчетом величины дополнительного испарения ΔE , обусловленного поливом

$$\Delta E = E - E', \quad (23)$$

где E и E' — величины суммарного испарения с поля в орошаемых условиях и на богаре. Поливная норма m при этом определяется как

$$m = \Delta E + \Delta E_w, \quad (24)$$

где ΔE_w — расход поливной воды на пополнение влагозапасов почвы.

Для практического использования методики величина дополнительного испарения ΔE связывается с относительной влажностью воздуха внутри травостоя (на уровне деятельной поверхности $z_d = z_b + z_0$, где z_b и z_0 — высоты слоя вытеснения и шероховатости). Эмпирическим путем определяются оптимальные значения относительной влажности воздуха r в разные фазы развития культуры, что позволяет с помощью специальных номограмм рассчитать оросительные и поливные нормы с учетом скорости ветра, температуры и влажности воздуха, измеренным на метеостанции, расположенной вне зоны орошения. В отличие от других эта методика позволяет учитывать влияние на водопотребление растений размера орошаемого поля. Все это говорит о том, что физически эта методика достаточно строго обоснована. Требуется лишь дополнительно оценить в производственных условиях ее точность и трудоемкость. Следует также заметить, что оптимальные характеристики микроклимата внутри травостоя (включая и относительную влажность воздуха) в процессе развития растений, например, озимой пшеницы, не остаются постоянными. Ход подобной зависимости для различных сельскохозяйственных культур требует дополнительных исследований.

Ряд метеорологов: Т. Е. Гагарина, Г. П. Дубинский, Л. П. Серякова и др. определяют поливные и оросительные нормы с помощью метода теплового баланса сельскохозяйственного поля

$$R = LE + P + Q, \quad (25)$$

где R — радиационный баланс; LE — затрата тепла на испарение (L — скрытая теплота испарения); P — турбулентный теплообмен и Q — теплообмен в почве. В работе упомянутых авторов показано, что в условиях орошения величины P и Q близки к нулю. На богаре величиной Q также ввиду ее малости пренебрегают, а по зна-

чению P рассчитывают поливную норму m , испаряющуюся за счет тепла, которое тратилось бы на турбулентный теплообмен

$$m = k_6 \frac{P}{L}. \quad (26)$$

С помощью такого простого физического метода (с некоторыми дополнительными деталями) Т. Е. Гагарина характеризовала поливную и оросительный режим картофеля поля, а Г. П. Дубинский — зерновых культур. К числу замечаний по этому методу относится неполное соблюдение на орошаемых полях равенства $P=0$, поскольку в начале вегетации (когда еще не сомкнут травостой) и особенно в конце ее (период созревания) часть тепла радиационного баланса неизбежно расходуется на турбулентный теплообмен почвы и растений с атмосферой.

Л. П. Серякова по экспериментальным данным установила близость расхода воды на испарение с орошаемых полей к испаряемости. Это обстоятельство послужило основанием для расчета поливных и оросительных норм по величине испаряемости E_0 , достаточно точно вычисляемой по метеорологическим данным. Дефицит водопотребления определялся как разность между испаряемостью и фактическим испарением с богарных земель. Таким образом были построены карты норм орошения некоторых сельскохозяйственных культур, которые дают представление о территориальной изменчивости этих величин в засушливой зоне страны.

Для расчета оросительных норм на основе уравнения водного баланса (10) ряд климатологов и гидрологов используют «уравнение связи» теплового и водного балансов, которое имеет много разновидностей. В СССР наибольшее распространение получил гидролого-климатический метод расчета суммарного испарения (E) с орошаемых полей В. С. Мезенцева

$$E = E_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{kH + W_1 - W_2}{E_0} \right)^n \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (27)$$

где E_0 — испаряемость; H — осадки; k — коэффициент недоучета осадков; $n = -\frac{0,301}{\lg \frac{E}{E_0}}$ — параметр, связанный с рельефом местности

(для равнинной территории $n=3$, а для расчлененного рельефа $n=2$); W_1 и W_2 — влагозапасы метрового слоя почвы на начало и конец периода, для которого вычисляется испарение. Величина E_0 при этом получается как сумма положительных частей радиационного баланса R^+ , турбулентного теплообмена P^+ и разности теплозапасов деятельного слоя почвы на начало Q_1 и конец Q_2 периода, т. е.

$$E_0 = \frac{10}{L} (R^+ + P^+ + Q_1 - Q_2). \quad (28)$$

Трудности определения величин R^+ и P^+ привели к попытке

определения E_0 с помощью простых эмпирических зависимостей

$$E_0 = 21,5 (1-r) e_{\text{нас}} (T) \quad (29)$$

или

$$E_0 = 0,2 \Sigma T_{>10} + 340. \quad (30)$$

Здесь, как и ранее, r — относительная влажность воздуха; $e_{\text{нас}} (T)$ — упругость насыщения при температуре T ; $\Sigma T_{>10}$ — сумма температур воздуха выше 10° . Внутригодовое распределение E_0 принимается пропорциональным годовому распределению дефицита упругости водяного пара.

В целом метод достаточно обоснован, нашел широкое практическое применение в Сибири, Северном Казахстане и Дальнем Востоке. До сих пор лишь неясной остается правомерность формулы (28), поскольку лишь гипотетический случай сочетания только положительных R и P не реален, так как за положительной частью R^+ и P^+ , как в суточном, так и сезонном ходе метеоэлементов в природе неизбежно следуют периоды R^- и P^- , которые снижают суммы положительных значений R и P , накопленных за предыдущий период. Однако эти замечания не уменьшают практической ценности методики, поскольку искусственное увеличение E на 10—30% не меняет существа дела и не вносит заметных ошибок в рассчитанные с помощью этой методики оросительные и поливные нормы. Высказанные выше замечания относительно методики расчета E и E_0 по температуре и дефициту влажности воздуха в полной мере относятся и к этой методике.

На основании анализа составляющих уравнения водного баланса многих водосборов Азии, Африки, Европы и Северной Америки Л. Тюрком (Франция) выведена формула, связывающая испарение E с осадками H и испаряемостью E_0 .

$$E = H \left[A + \left(\frac{H}{E_0} \right)^n \right] \frac{1}{n}. \quad (31)$$

Здесь $A=0,9$ — параметр «аридности» (засушливости), изменяется от 0,77 до 1,22; $n=2,0$. Годовая величина E_0 определяется из соотношения

$$E_0 = 300 + 25 T + 0,05 T^3, \quad (32)$$

где T — среднегодовая температура воздуха. Для расчета водопотребления растений в условиях орошения формула (21) принимает вид

$$E = (H + \Delta W + V) \left[1 + \left(\frac{H + \Delta W}{E_0} + \frac{V}{2E_0} \right)^n \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (33)$$

где V — дополнительное водопотребление, обусловленное вегетирующей растительностью. При этом величина E_0 за короткие

промежутки определяется по формуле

$$E_0 = \frac{T+n}{16} \sqrt{S_p}, \quad (34)$$

в которой S_p — суммарная радиация, а n — количество декад от 20-го дня после высева, до конца периода, за который вычисляется испарение.

Значение V рассчитывается по формуле

$$V = 25 \sqrt{\frac{k_b M}{n}}, \quad (35)$$

где M — конечный вес сухого вещества; k_b — эмпирический коэффициент, представляющий отношение коэффициентов транспирации данного вида растительности к коэффициенту транспирации зерновых культур. Его величина для кукурузы и свеклы равна 0,67, картофеля — 0,84, гороха, клевера и других бобовых — 1,17, люцерны и луговых злаков — 1,33.

В последующих работах того же автора предложены более простые формулы для расчета испарения при оптимальном увлажнении и сомкнутом травостое

$$E = 0,13 \frac{T}{T+15} (S_p + 50) \quad (36)$$

и

$$E = 0,13 \frac{T}{T+15} \left[I_0 \left(0,18 + 0,62 \frac{\tau_{\text{фак}}}{\tau} \right) + 50 \right], \quad (37)$$

где — S_p — суммарная радиация; I_0 — солнечная постоянная; $\tau_{\text{фак}}$ — фактическая суточная продолжительность солнечного сияния; τ — астрономическая продолжительность солнечного сияния.

Несмотря на локальность связей (34) — (37) они нашли достаточно широкое применение в ряде западных стран и аридных регионах. К недостаткам рассматриваемых связей следует отнести отсутствие необходимой строгости формул для расчета испарения и испаряемости, а также неполный учет с помощью k_b биологических особенностей водопотребления растений в разные фазы их развития.

Принятие водопотребления пропорциональным продолжительности дня или солнечного сияния не всегда оправдано, поскольку испарение и транспирация определяются теплоэнергетическими ресурсами, которые учитываются в разных способах расчета испарения по разному (через сумму температуры воздуха, испаряемость, суммарную солнечную радиацию или радиационный баланс). В значениях теплоэнергетических ресурсов косвенно уже реализовалась продолжительность светлой части суток. Учет продолжительности дня уточняет расчеты не столько водопотребления, сколько прироста биомассы, так как интенсивность процесса фотосинтеза меньше зависит от количества приходящей радиации

(поглощается при этом лишь малая часть ее) и больше — от продолжительности самого процесса фотосинтеза, проходящего лишь в светлую часть суток.

2.1.3. Тепло-воднобалансовые методы расчета испарения с сельскохозяйственных полей и поливного режима

В настоящее время все большее применение находят комплексные методы расчета испарения, использующие одновременно элементы водного и теплового балансов деятельного слоя суши. Из зарубежных работ к ним в первую очередь относится метод Х. Л. Пенмана, нашедший достаточно широкое применение в ряде аридных стран. Согласно этому методу величина суммарного испарения с сельскохозяйственных полей определяется как

$$E = \kappa_v E_0, \quad (38)$$

где κ_v — переходный коэффициент, равный 0,8 летом, 0,6 — зимой и 0,7 осенью и весной; E_0 — величина испарения с водной поверхности, определяемая по формуле

$$E_0 = (aR + vE_a) (a + v)^{-1}, \quad (39)$$

в которой a — наклон кривой насыщения водяного пара при заданной температуре воздуха; R — радиационный баланс деятельного слоя воды; v — психрометрическая постоянная и E_a , равная

$$E_a = 0,35 (0,5 + 0,537u) (e_{\text{нас}} - e) \quad (40)$$

(u — скорость ветра на высоте 2 м).

Радиационный баланс рассчитывается по эмпирической формуле

$$R = 0,95 S_p \left(0,18 + 0,55 \frac{\tau_{\text{фак}}}{\tau} \right) - \sigma T^4 (0,56 - 0,09 \nu e) \left(0,10 + 0,90 \frac{\tau_{\text{фак}}}{\tau} \right) \quad (41)$$

где S_p — солнечная постоянная; $\frac{\tau_{\text{фак}}}{\tau}$ — отношение фактической

к возможной продолжительности солнечного сияния; σ — постоянная Стефана — Больцмана.

Таким образом, для расчета водопотребления культур по рассматриваемому методу необходимо иметь данные о скорости ветра, температуре и влажности воздуха, а также продолжительности солнечного сияния на поле. Существующая густота сети метеорологических станций, недостаточная для надежной характеристики перечисленных элементов на отдельных полях и массивах. Для обоснованных расчетов требуется постановка дополнительных наблюдений. Это обстоятельство усложняет практическое использование метода. Кроме того, формулы (39) — (41) являются эмпирическими и как все эмпирические формулы по своей сути локальны.

Близким по смыслу к методу Пянмана является распространенный ныне за рубежом метод Харгривса (США), в основе которого лежит следующая формула для расчета испарения с суши:

$$E = 0,075 \frac{ST}{L}, \quad (42)$$

где S — суммарная радиация; T — средняя температура (по Фаренгейту) за расчетный период; L — скрытая теплота испарения. При отсутствии суммарной радиации ее величина может быть рассчитана по формуле

$$S = 0,075 S_{\text{рас}} \kappa_s (100 - r)^{1/2}, \quad (43)$$

где $S_{\text{рас}}$ — суммарная радиация для данной широты и долготы с учетом высоты над уровнем моря; κ_s — эмпирический коэффициент, который обычно принимают равным 10,5; r — относительная влажность воздуха.

В этом методе вызывает сомнение правомерность обоих расчетных формул, поскольку в (42) не учитываются ни влагозапасы почвы, ни влажность воздуха. В таком виде формула может иметь смысл лишь для предельно увлажненной почвы или оптимально увлажненного сомкнутого травостоя. В (43) не учитывается облачность, без характеристики которой трудно рассчитывать фактическую суммарную радиацию. Отсутствие учета биологических особенностей культуры делает этот метод еще менее достоверным.

С. И. Харченко предложил так называемый тепло-воднобалансовый метод, с помощью которого можно определять запас продуктивной влаги на орошаемое поле в конце расчетного периода (месяца или фазы развития растений) и, таким образом, принимать решение о необходимости производства очередного полива. Формула имеет такой вид:

$$W_2 = \frac{W_1 (1 - \beta E_0 / 2\gamma) + X + M + K}{1 + \beta E_0 / 2\gamma}, \quad (44)$$

где W_1 и W_2 — запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы в начале и конце расчетного периода в мм; X — сумма осадков за расчетный период в мм; E_0 — испаряемость за тот же период в мм; K — расход грунтовых вод в зону аэрации в мм; M — оросительные воды, попавшие на поле за расчетный период в мм; β — параметр, учитывающий фазы развития растений; γ — свободная пористость метрового слоя почвы.

Способы вычисления E_0 и K рассмотрены в 1.1, где приведены формулы (3) и (4). В целом тепло-воднобалансовому методу определения влагозапаса присущи те же достоинства и недостатки, которыми обладает разработанная С. И. Харченко методика расчета дефицита водопотребления, изложенная в 1.1.

2.1.4. Методы расчета испарения и сроков поливов
с использованием биологических кривых водопотребления

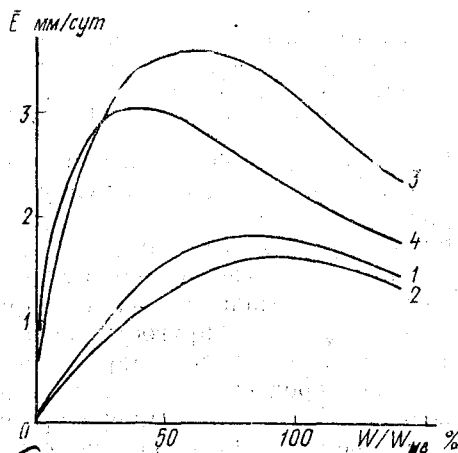
Эти методы основаны на существовании связи внешних условий произрастания растений с некоторыми биофизическими параметрами растений. К таким параметрам относится прежде всего биологическое водопотребление, характеризуемое коэффициентом водопотребления $\kappa_{\text{в}}$. Этот коэффициент указывает долю, которую составляет фактическое водопотребление, т. е. испарение $E_{\text{ф}}$ от потенциального, равно испаряемости E_0 .

$$\kappa_{\text{в}} = \frac{E_{\text{ф}}}{E_0}, \quad (45)$$

Следовательно, фактическое водопотребление при прочих равных условиях пропорционально испаряемости. Под «прочими условиями» подразумеваются прежде всего влагозапасы почвы W , вид сельскохозяйственной культуры K , ее сорт S , фаза развития Φ и состояние сельскохозяйственной культуры C , т. е. густота, степень повреждения болезнями и т. п.

Последовательное изменение величины $\kappa_{\text{в}} = f(W, K, S, \Phi, C)$ в онтогенезе (в процессе развития) называется биологической кривой водопотребления данной культуры, которая строится по эмпирическим данным, характеризующим водопотребление, влагозапасы почвы и фазы развития культуры.

Ограниченность экспериментальных данных по водопотреблению пока что не позволяет дифференцировать эти кривые по сортам выбранной культуры и ее состоянию. На рис. 6 и 7 приведены биологические кривые озимой пшеницы. Эти кривые используются для определения испарения (водопотребления) полей озимой пшеницы, что делается в следующей последовательности.



По фактическим наблюдениям за культурой устанавливают фазу ее развития на интересующий момент времени Φ . На этот же момент определяют измерениями или расчетом по уравнению водного баланса влагозапасы почвы W . Зная W и Φ , снимают с биологической кривой водопотребления значение $\kappa_{\text{в}}$.

Рис. 6. Связь водопотребления озимой пшеницы E (при среднем E_0) с продуктивными влагозапасами почвы W по межфазным периодам:

1—4 — последовательные фазы развития пшеницы

Одним из известных способов определяют испаряемость E_0 и затем вычисляют испарение по формуле

$$E = \kappa_v E_0. \quad (46)$$

Пропорциональность испарения испаряемости делает биологическую кривую неизменной для данной культуры в различных климатических условиях (при постоянстве ее сорта и близком к среднему состоянию культуры).

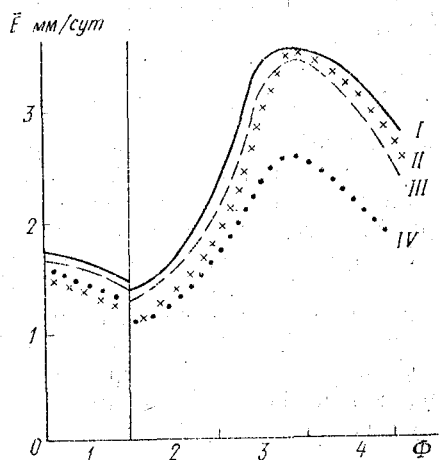


Рис. 7. Биологические кривые озимой пшеницы при разных влагозапасах почвы:

1—4 — межфазные периоды; I — оптимальные влагозапасы; II — 50% НВ; III — НВ; IV — 150% НВ

период на сумму дефицитов упругости водяного пара Σd за те же периоды. При этом дефицит упругости рассчитывается по температуре воздуха.

Если опустить декадные, а рассматривать лишь межфазные периоды, то понятие о биологической кривой становится более строгим и однозначным. Однако принятие испарения пропорциональным дефициту упругости водяного пара не является вполне точным. На самом деле испарение пропорционально испаряемости, которая непосредственно связана с дефицитом упругости водяного пара, рассчитанным по температуре испаряющей поверхности. При замене в формуле (45) испаряемости дефицитом упругости возникают большие и трудно учитываемые ошибки в расчете испарения и, следовательно, поливного и оросительного режимов. Дело в том, что разница между упомянутыми дефицитами (рассчитанными по температуре воздуха и по температуре испаряющей поверхности) зависит от погодных и климатических условий. Поэтому для разных типов погоды и разных климатических зон значение коэффициента κ_v , определенного из эксперимента как функция от Σd

Более подробное рассмотрение истории развития биологических кривых водопотребления и использование их для расчета испарения и поливного режима целесообразно начать с основополагающих работ А. М. Алпатьева. В них впервые сформулировано понятие о биологических кривых водопотребления, которые представляют собой ряд коэффициентов κ_v , изменяющихся в онтогенезе от декады или стадии к стадии вегетации и вычисляемых путем деления валового расхода воды E (транспирация плюс испарение с почвы при оптимальной влажности) за декадный или межфазный

различно. Вследствие этого коэффициент k_v в расчетах из биологического искусственно превращается в биоклиматический, вместо постоянного (для культуры, фазы) он становится изменчивым в пространстве и времени из-за изменчивости погодных и климатических условий. Таким образом, замена способов определения дефицитов упругости оборачивается на практике существенным снижением точности расчетов поливных и оросительных режимов, превращением единого метода расчета в разрозненные локальные способы, что повышает трудоемкость и расходы на экспериментальное определение локальных значений k_v .

Практическая реализация метода с использованием биологических кривых наиболее полно представлена в работах С. М. Алпатьева и В. П. Остапчика.

Предлагаемый ими метод может быть использован при расчете испарения с орошаемых полей в период вегетации при влажности корнеобитаемого слоя почвы выше 65% от НВ. Расчет испарения производится по формуле

$$E = k \sum d, \quad (47)$$

где E — как и ранее, испарение (мм); k_v — коэффициент водопотребления; $\sum d$ — сумма среднесуточных дефицитов упругости водяного пара, вычисленных по измерениям в психрометрической будке.

Коэффициент k_v зависит от вида культуры и фазы ее развития. В рассматриваемом методе для удобства практического использования фаза заменяется суммой среднесуточных температур воздуха от всходов до момента расчета испарения. Эта замена сделана исходя из предположения, что сумма среднесуточных температур достаточно полно характеризует собой скорость наступления и смены фаз вегетационного периода. Такое положение достаточно близко соответствует действительности, но оно носит локальный характер. В соответствии с исследованиями агрометеорологов продолжительность межфазных периодов зависит как от температуры, так и от влажности воздуха и почвы. Она преимущественно сокращается с ростом температуры и сухости воздуха. Поэтому одна температура воздуха не в состоянии с достаточной точностью характеризовать время наступления различных межфазных периодов, к которым обычно приурочиваются поливы. Ошибки при этом в зоне недостаточного увлажнения составляют многие дни, а порой и недели, что на практике может привести к фактическому игнорированию учета фазового развития культуры при орошении.

На основании рассматриваемого метода составлены алгоритмы и программа расчета на ЭВМ испарения и режимов орошения, приведено районирование ЕТС по коэффициенту увлажнения. Метод нашел практическое применение в южных районах ЕТС. Его использование подтвердило различие коэффициентов водопотребления в разных районах зоны орошения. Как и следовало ожидать, в сильно засушливых районах (южные степи Украины,

Заволжья, Казахстана) метод завышает оросительные нормы до 20—50%, а в нечерноземной зоне — занижает.

Учитывая эти результаты, многие ученые мелиораторы занялись усовершенствованием метода, главным образом, уточнением локальных значений коэффициентов водопотребления. Среди них в первую очередь следует отметить основоположника расчета оросительного режима с использованием биологических кривых водопотребления А. М. Алпатыева и его учеников. Ими были обоснованы преимущественно средние многолетние значения k_v для некоторых районов страны, выходящих за пределы территории Украины.

Проверкой метода и уточнением значений k_v занимались также Н. С. Горюнов по территории Казахстана, М. Г. Голченко — для Белоруссии, З. А. Струнников — для Северо-Запада СССР и др. В. И. Алексеевым и Н. В. Данильченко разработан метод так называемого «дефицита испарения», основанный на использовании значений k_v , с помощью которого проведено районирование оросительных норм для основных сельскохозяйственных культур территории Северного Казахстана и южного Заволжья. В. Б. Местечкин на основе анализа уже известных значений k_v важнейших сельскохозяйственных культур разработал схему пространственной интерполяции значений k_v для всей орошаемой зоны СССР. Это дало возможность несколько унифицировать применение биоклиматических коэффициентов. На основании этого метода были рассчитаны месячные и вегетационные значения дефицитов водопотребления основных сельскохозяйственных культур, определены нормы и сроки поливов, даны статистические характеристики, построены карты изолиний дефицита водопотребления.

Эти исследования заметно улучшают условия применения рассматриваемого метода, основанного на коэффициентах потребления (построенных с использованием дефицита упругости водяного пара (рассчитанного по температуре воздуха). Но радикальное усовершенствование метода состоит в построении зависимости k_v от дефицита упругости водяного пара, рассчитанного по температуре испаряющей поверхности или от испаряемости, непосредственно влияющей на величину водопотребления.

Пример практического использования коэффициентов водопотребления для расчета поливных режимов конкретного года приводится М. Джонсоном (США). Он описывает способ обслуживания (расчет и оповещение с разной заблаговременностью о нормах и сроках поливов) фермеров Аризоны и прилегающих штатов с применением компьютеров. По данным наблюдений метеостанций о радиации, температуре и влажности воздуха и осадкам ЭВМ ежедневно рассчитывает испаряемость и водопотребление культур (сахарная свекла, люцерна и др.). С учетом биологических коэффициентов определяют дефицит водопотребления, а с учетом почвенных констант и глубины корневой системы — дефицит влажности почвы, приравниваемый к размеру полива. Тенденция изме-

нения этих характеристик определяется путем использования прогноза погоды на ближайшие дни. Почвенные характеристики снимаются заблаговременно, а раз в две недели проводятся контрольные измерения влажности почвы.

Испаряемость рассчитывается методом теплового баланса и по формуле Пенмана. Суммарное испарение рассчитывается по формуле, аналогичной (38), а значение K_v определяется из соотношения

$$K_v = \frac{1 + \beta_0 (R + Q)}{1 + \beta (R_0 + Q_0)}, \quad (48)$$

где $\beta = \frac{P}{LE}$ — отношение Боуэна; R^* — радиационный баланс деятельного слоя поля; P — турбулентный теплообмен; L — скрытая теплота парообразования; Q — теплообмен в почве. Индекс «0» означает характеристики, относящиеся к полю с заданной культурой, а без индекса — к подобным характеристикам на метеостанции. Параметры, определяющие коэффициент культуры K_v , зависят от фазы ее развития и влагозапасов почвы.

Расход почвенной влаги или дефицит влажности почвы оцениваются как

$$\Delta W = \Sigma E - \Sigma H_0, \quad (49)$$

где H_0 — эффективные осадки. Непосредственно после полива $\Delta W = 0$. Количество дней до следующего полива N определяется из условия:

$$N = \frac{\Delta W_0 - \Delta W}{E_0} \quad (N = 0 \text{ при } \Delta W_0 \leq \Delta W), \quad (50)$$

где E_0 — средняя испаряемость за три предыдущих дня и три последующих (по прогнозу); ΔW_0 — поливная норма.

Рекомендации по поливам отдельных полей высылаются фермерам по почте два раза в неделю летом и один раз — весной и осенью. Количество обслуживаемых фирмой полей быстро возрастает. Стоимость обслуживания составляет примерно 1 доллар за акр орошаемого поля. С ростом площади относительная стоимость обслуживания снижается.

2.1.5. Учет влагозапасов почвы с целью определения поливных режимов при программировании урожайности*

Рассмотрим вопросы использования методов программирования урожайности для расчетов поливного режима. Наиболее полно научные принципы программирования урожайности изложены в работах И. С. Шатилова. Исходя из определения, что программирование урожайности равнозначно разработке комплекса взаимосвязанных мероприятий (агротехнического, агрометео-

* Материал данного раздела не обязательный. Дается для сведения.

рологического, селекционного, гидромелиоративного и организационного характера, направленных на получение заданной величины урожая, он считает необходимым основывать эти мероприятия на фундаментальных законах земледелия и растениеводства. К указанным законам относятся:

— закон равнозначности и незаменимости факторов жизни растений (тепло, вода, свет, пища и т. п.);

— закон ограничивающего фактора (уровень урожайности определяется фактором, находящимся в минимуме);

— закон оптимума (только оптимальное соотношение между факторами максимизирует продукционный процесс);

— закон возврата (необходимость восполнения в почве питательных веществ, идущих на формирование растительной массы);

— закон плодосмены (чередование культур лучше, чем монокультура).

К этим законам иногда добавляют еще необходимость учета наличия критических периодов развития растений в их водотеплопотребности и потребности в минеральном питании.

С учетом этих законов И. С. Шатилов разработал специальные принципы, которыми следует руководствоваться при программировании урожайности, в том числе и на орошаемых землях.

Первый из этих принципов состоит в необходимости установления показателя продуктивности фитомассы, определяемый, главным образом, климатическими условиями (включая и их естественную влагообеспеченность).

Известно, что на земном шаре в различных почвенно-климатических условиях урожайность изменяется от 3 до 500 ц/га. Для оценки сельскохозяйственного бонитета региона может быть использован любой теоретический или экспериментальный метод расчета биомассы и, в частности, упомянутый в предыдущем параграфе метод расчета биоклиматического потенциала Д. И. Шашко или локальная эмпирическая формула А. М. Рябчикова

$$k_p = \frac{W\tau}{36R}, \quad (51)$$

где k_p — биогидрометрический потенциал продуктивности; W — среднегодовое увлажнение богарных полей; τ — продолжительность сезона вегетации; R — радиационный баланс. Определив балл продуктивности фитомассы, по специальному графику находят количество биомассы. Имеются и другие более надежные методы расчета биомассы, рассматриваемые в специальной литературе.

Второй принцип программирования урожайности заключается в предварительном определении максимально возможного значения коэффициента использования растением фотосинтетически активной радиации (ФАР). Известно, что примерно 90% растительной массы формируется за счет солнечной энергии и угле-

кислоты CO_2 , находящейся в атмосфере. Обычно ФАР составляет 45—52% от суммарной радиации, а на формирование растительной массы расходуется обычно 0,5—3,0% ФАР. Поэтому одной из основных задач земледелия на богарных и мелиорируемых землях является создание условий для растений, стимулирующих максимальное поглощение ФАР.

Третий принцип программирования урожайности состоит в предварительном определении потенциальных ресурсов культуры или сорта при ФАР, характерной для места их произрастания.

Четвертый принцип заключается в оценке селекционных особенностей культуры и сорта в направлении максимизации поглощения ФАР. Интенсивность этого поглощения зависит кроме суммарной площади листьев еще от угла их наклона и распределения по высоте. Горизонтально ориентированные листья, расположенные в верхнем ярусе, перекрывают доступ солнечным лучам к нижерасположенной листве. Это сокращает их фотосинтетический потенциал, а с ней и продуктивность биомассы.

Пятый принцип программирования урожайности состоит в последовательном комплексном использовании законов и закономерностей земледелия и растениеводства.

Шестой принцип заключается в разработке системы удобрений с учетом плодородия почвы и потребности растений в минеральном питании.

Седьмой принцип состоит в разработке оптимального комплекса агротехнических мероприятий, обеспечивающих программированный урожай. Сюда относятся агротехнические приемы (вспашка, боронование, культивации и т. п.), их сроки, нормы высева и т. д.

Восьмой принцип программирования урожайности заключается в обеспечении растений оптимальными влагозапасами почвы. В богарных условиях величину программированной урожайности следует определять в зависимости от сложившихся гидрометеорологических условий и естественных влагозапасов. На мелиорированных землях оптимальные влагозапасы определяются в результате обобщения предшествующего опыта и должны поддерживаться в заданном диапазоне соответствующими мероприятиями (поливами на орошаемых полях и понижением уровня грунтовых вод на осушаемых).

Девятый принцип связан с исключением влияния на растения их болезней и вредителей.

Десятый и последний принцип предусматривает возможно большее использование при программировании урожайности комплексных эмпирических и математических моделей продукционного процесса и счетно-решающих устройств.

Интересную схему программирования урожайности на мелиорируемых землях, полнее всего удовлетворяющую общим принципам И. С. Шатилова, предложили А. А. Климов, Г. П. Устенко, Г. Е. Листопад и А. Ф. Иванов. Под программированием урожай-

ности они понимают предопределение и направление процессов формирования урожая по заранее составленной программе с учетом физико-географических, почвенно-климатических факторов и биологических особенностей растений. Учитывая, что растения поглощают огромное количество солнечной энергии, которую в процессе фотосинтеза преобразуют в химическую энергию органических соединений, авторы вполне правомерно считают солнечную энергию основной движущей силой создания биомассы и поддержания транспирации. Поэтому оценке возможного поглощения ФАР авторы уделяют особое внимание, положив в основу расчетов максимального образования органических веществ фотосинтетическую деятельность растений.

Исходя из общего выражения функциональной зависимости урожая от определяющих факторов x_i ,

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (52)$$

авторы заменяют комплексное взаимосвязанное выражение (52) частными алгебраическими уравнениями и аппроксимациями, имея в виду, что корреляционные связи между x_i -ми аргументами отсутствуют. На такой шаг авторы вынуждены пойти для построения практически удобной расчетной схемы. В результате ими создан так называемый «полибинальный метод функционального моделирования сложных многофакторных сельскохозяйственных производственных процессов», позволяющих отыскивать их оптимальные решения.

Сущность метода состоит в том, что математическое выражение зависимости урожая от каждого отдельного фактора (ФАР, удобрения, влагозапасы почвы, CO_2 , площадь листьев, почвенная характеристика, потенциальная эффективность растений) представляется одновременно действующими парными функциями (биналами), одна из которых является доминантной — обуславливает течение процесса в заданном направлении, а вторая, являясь «рецессивной», усиливает, стабилизирует, либо ослабляет действие доминантной функции. Произведение биналов образует полибинал, который в аналитической форме выражает урожай как результирующую функцию влияния на него определяющих факторов.

Далее авторы считают, что при программировании урожая пшеницы, кукурузы, люцерны и других орошаемых сельскохозяйственных культур вполне приемлемые результаты дает математическое моделирование на базе экспонентно-степенных биналов. При учете десяти упомянутых выше факторов, обуславливающих урожай, и принимая бинал CO_2 равным единице, стационарная часть программной схемы возделывания кукурузы на силос в этом случае представляется в виде

$$Y = AV^{e_1} \Phi^{e_2} S^{e_3} N^{e_4} P^{e_5} K^{e_6} T^{e_7} W^{e_8} j^{e_9} \exp \{ - (C_1 V + C_2 \Phi) \} \quad (53)$$

или в сокращенном виде

$$Y = A \exp \left[- \left(\sum_{i=1}^9 c_i x_i \right) \right] \prod_{i=1}^9 x_i^{\theta_i} \quad (54)$$

где A — интегральная константа преобразования размерностей

входящих аргументов $A = Y \left(\prod_{i=1}^9 x_i^{\theta_i} e^{-c_i x_i} \right)^{-1}$; Y — максимально воз-

можная урожайность силосной массы кукурузы в заданных почвен-

но-климатических условиях; $\prod_{i=1}^9 x_i^{\theta_i} e^{-c_i x_i}$ — произведение биналов при

оптимальном значении всех факторов; V — потенциальная эффективность сорта (в отн. ед.); Φ — ФАР; S — площадь листьев (отн. ед.); N, P, K — азотно-фосфорно-калийные удобрения (ц/га·д·в); T — биологически активная температура ($^{\circ}\text{C}$); W — продуктивные влагозапасы в долях от НПВ — основной, целенаправленно изменяемый фактор на мелиорированных землях; j — комплексный показатель «структурной почвенно-корневой упорядоченности» (отн. ед.).

Значение показателя степени θ_i при W , определяется авторами из обобщения практики мелиораторов.

Для перевода стационарной расчетной схемы в динамическую авторами вводится временной бинал τ .

$$\tau = \alpha \Delta t^{\theta_k} \exp(-E_k \Delta t), \quad (55)$$

где α — коэффициент пропорциональности; Δt — продолжительность этапов органогенеза или фаз развития в сутках. При этом дифференциальная форма динамической схемы может быть представлена в виде

$$\frac{dY}{dt} = \alpha \Delta t^{\theta_k} \exp(-E_k \Delta t) \left[A \prod_{i=1}^9 x_i^{\theta_i} \exp \left(- \sum_{i=1}^9 c_i x_i \right) \right]. \quad (56)$$

Полагая в общем случае $x = f(t)$, получим

$$Y = \alpha A \int \Delta t^{\theta_k} \exp(-E_k \Delta t) \left[\prod_{i=1}^9 x_i^{\theta_i} \exp \left(- \sum_{i=1}^9 c_i x_i \right) \right]. \quad (57)$$

Коэффициенты θ_k и E_k зависят от вида культуры, сорта, почвенно-климатических и других условий, влияющих на продолжительность вегетационного периода. Значения коэффициентов θ_i и c_i зависят от этапа органогенеза, минимальная продолжительность которого принимается равной $t_n - t_{n-1}$. Приращение биомассы

ΔY на n -ом этапе органогенеза составит

$$\Delta Y = A \prod_{i=1}^9 x_i^{\theta_i} \exp \left(- \sum_{i=1}^9 c_i x_i \right) \int_{t_{n-1}}^{t_n} \Delta t^{\theta_k} \exp \left(- E_k \Delta t \right) dt. \quad (58)$$

Общее накопление биомассы за весь вегетационный период выразится естественно как

$$Y = \sum_{i=0}^{i=n} \Delta Y. \quad (59)$$

Описанная выше схема программирования урожайности получила широкую известность и, вследствие положительных результатов многолетних авторских испытаний, рекомендуется ими для практического использования.

Вместе с тем уместно остановиться на недостатках изложенной схемы программирования урожайности. Эта схема не вполне правомерно называется ее авторами математической моделью возделывания культур, поскольку, с математической точки зрения, предложенная ими расчетная схема не всегда достаточно корректна.

Модель как органическое целое, в отличие от схемы, обязана учитывать внутренние взаимосвязи между определяющими урожайность факторами. В предложенной схеме этого не сделано, что с математической точки зрения недопустимо, поскольку теснота природных связей между значениями отдельных из учитываемых факторов доходит до 0,6 и более, так что учет этих связей делает основную формулу (53) не всегда приемлемой для практических расчетов.

Есть в расчетной схеме и другие недостатки, не носящие, однако, принципиального характера. К их числу относится непригодность в существующем виде схемы для расчета хозяйственно ценных частей урожая (зерна кукурузы и др. зерновых культур), особенно важных для практики. Некоторые факторы введены в расчетную схему весьма приближенным образом (коэффициенты «структурной почвенной упорядоченности» j , v_k , E_k и др.), не всегда ясен их физический смысл и способ количественной оценки. Их значение, несомненно, меняется в пространстве и времени. Тем самым схема становится эмпирической и локальной.

Вполне современную модель-схему планирования и расчета урожайности с разной заблаговременностью разработали В. А. Коробов и Б. И. Бугера. Методика базируется на использовании статистического аппарата производственных функций на примере анализа и прогнозирования урожайности озимой пшеницы в северной зоне Краснодарского края. Под производственной функцией авторами понимается экономико-математическая модель, концентрирующая в себе основные количественные закономерности и

связи между одной или несколькими зависимыми переменными величинами и комплексом анализируемых аргументов.

В качестве модели урожайности Y выбрана трансцендентная производственная функция, имеющая следующий вид:

$$Y = a \prod_{i=1}^m x_i^{\beta_i} e^{-\gamma_i x_i}, \quad (60)$$

где x_i — объем затрат i -го фактора; e — основание натуральных логарифмов; a , β_i , γ_i — параметры функции. В экономико-математической литературе такая функция называется кинетической. Она удобна тем, что позволяет сравнительно легко определять параметры с помощью известных методов и алгоритмов (с помощью логарифмирования она приводится к линейному виду), используя при этом метод наименьших квадратов.

Из факторов, оказывающих непосредственное влияние на урожайность, авторами в соответствии с исходной информацией выбраны в основном гидрометеорологические и экономические:

- затраты труда на 1 га посева (чел. дн.);
- количество комбайнов на 1000 га;
- количество тракторов в хозяйствах на 1000 га посева;
- объем весенних удобрений (минеральных + органических, ц/га);
- количество осадков за август-сентябрь (с «весом» = 0,5);
- глубина промачивания почвы на начало марта (мм);
- число дней от возобновления вегетации до выхода в трубку;
- количество осадков весенне-летнего периода;
- сумма отрицательных температур за период перезимовки;
- количество дней с оттепелями;
- число дней от всходов до прекращения вегетации;
- число дней с суховеями;
- число дней с дождями в период уборки;
- материально-денежные затраты на 1 га посева озимых (руб.);
- процент хороших предшественников. В обследование были включены 80 колхозов за 1965—1966 гг. (всего 160 «годохозяйств»).

После расчета параметров и исключения малозначимых из них была построена кинетическая формула урожайности в виде

$$Y = a \prod_{i=1}^8 x_i^{\beta_i} e^{\gamma_i x_i} = 108 x_1^{1,50} e^{-0,9 \cdot 10^{-3} x_1} \times x_2^{1,46} e^{-0,38 x_2} \times x_3^{0,25} e^{-0,1 x_3} \times x_4^{0,66} e^{0,05 x_4} \times x_5^{4,7} e^{0,05 x_5} \times x_6^{40,1} e^{0,59 x_6} \times x_7^{-51,8} e^{-1,51 x_7} \times x_8^{1,43} e^{0,06 x_8}. \quad (61)$$

Индекс i соответствует номеру учитываемого выше фактора. Для мелиорируемых полей количество осадков за весенне-летний период увеличивается за счет поливов.

Недостатком метода является отсутствие учета корреляционных связей между определяющими урожайность факторами, что существенно снижает точность расчетов.

И все же проведенное авторами построение и анализ производственных функций (включая кинетические функции) содействовали выработке научно обоснованных производственных решений и получению достаточно точных прогнозов, способствовавших повышению эффективности планирования в области сельского хозяйства на богарных и мелиорируемых землях.

Некоторые биологические аспекты программирования урожая рассмотрены А. И. Усковым. В основу расчетов им положена структура урожая по элементам продуктивности, густота растений, число стеблей, колосков, зерен, их вес. Анализируется фотосинтетическая деятельность с учетом прироста и выхода зеленой и сухой массы, поступление ФАР и продуктивность фотосинтеза, а также транспирация растений. Расчеты проводятся по экспериментальным данным, полученным для кукурузы сорта ВИР 156 на орошаемых полях Северного Кавказа, а также пшеницы сорта Безостая и Мироновская на Ставропольщине. В упрощенной форме ставится также вопрос о динамической программировании. Схема локальна, но при хорошей проверке по экспериментальным данным может быть рекомендована для практического использования в том регионе, на экспериментальных данных которого она построена.

С. Д. Лысогоров и В. Ф. Сухорков предложили эмпирическую схему программирования урожайности кукурузы на зеленый корм и зерна озимой пшеницы, учитывающую оросительную норму, удобрения (навоз + $N_{80}P_{80}$) и глубину вспашки (при разной предельной влажности почвы). Результаты представлены в виде регрессионных уравнений связи урожайности с упомянутыми факторами. Исходными данными послужили результаты многофакторных опытов, проведенных на южном черноземе Ингулецкой оросительной системы (УССР). Малое количество учитываемых факторов (при равенстве прочих условий) делает расчетную схему сугубо локальной, о чем говорят и сами авторы расчетной схемы.

Частные вопросы планирования урожаев орошаемых культурных пастбищ рассмотрены М. К. Каюмовым и В. А. Тюльдюковым. Используя принципы программирования урожайности, предложены И. С. Шатиловым, они рассчитали необходимое количество доз удобрений с учетом их выноса для получения планируемой урожайности.

2.2. Методы оценки потребности растений в воде с использованием их физиологических характеристик

Биофизиологические характеристики состояния растений являются наиболее надежными показателями потребности растений

з увлажнении. К числу таких характеристик относятся концентрация клеточного сока, осмотическое давление, сосущая сила, степень открытия устьиц, тургор и т. д. Они по-разному и с разной теснотой связаны с водопотреблением и оводненностью растений. Эти связи при возможности, измерения упомянутых характеристик позволяют с определенной точностью судить о потребности растений в воде.

Исследованиями связи физиологических характеристик растений с их состоянием, водопотреблением и продуктивностью занимались многие ученые у нас в стране и за рубежом. Фундаментальные основы этих исследований заложены в работах таких крупных физиологов растений, как К. А. Тимирязев, Н. А. Максимов, Т. А. Генкель, А. А. Ничипорович, физиологическими исследованиями применительно к орошаемым культурам успешно занимались Н. С. Перенов, В. С. Шардаков, И. Н. Шабалин, О. Г. Граматикати, Л. Н. Бабушкин и многие другие ученые.

Ряд исследователей предлагают использовать физиологические показатели растений для косвенной характеристики влагозапасов почвы. Зная диапазон оптимальных влагозапасов почвы, можно таким образом приближенно судить о размере и сроке очередного полива.

Следует заметить, что одна влажность почвы не в состоянии в полной мере характеризовать водопотребление растений, зависящее, кроме вида растений, еще от напряженности метеорологических элементов, засухоустойчивости сорта и состояния растений, мощности и глубины корневой системы. В этом смысле физиологические характеристики состояния растений являются более надежными показателями их водопотребления. Ряд физиологических характеристик растений может быть определен по внешним признакам их состояния (потеря тургора, скручивание листьев, пожелтение и т. д.), которые можно заметить при массовых автомобильных обследованиях полей, с вертолета, самолета или спутника. Но эти изменения наступают слишком поздно и свидетельствуют об уже наступившем угнетении растений, порой необратимом даже при немедленном поливе. Поэтому встает вопрос о возможности непосредственного измерения перечисленных выше параметров в онтогенезе при разном состоянии растений и по величине этих характеристик судить о водообеспеченности растений.

Возможность суждения о состоянии водообеспеченности растений по их физиологическим показателям высказал академик Н. А. Максимов, считавший, что «засуху не следует представлять просто как определенную степень сухости и жароты воздуха и как малое содержание воды в почве. Правильнее назвать засухой такую комбинацию атмосферных и почвенных условий, при которой происходит глубокое и длительное нарушение водного режима растений. Засуха может быть только там, где есть растения; мы знаем ее только через действие на растения».

Важнейшей характеристикой водопотребления растений является степень оводненности его листьев, стеблей и пр., ибо обезвоживание растительной ткани вызывает нарушение белкового и углеводного обмена, изменение осмотических свойств клеток и т. д. Оно задерживает рост растений, уменьшает их листовую поверхность, тормозит процесс фотосинтеза и тем самым снижает продуктивность растений. Уровень оводненности растительной ткани определяется соотношением поступления воды через корневую систему и расходом через листья и стебли (транспирация). В ночные часы интенсивность поглощения воды растением превалирует над интенсивностью расхода. В утренние и дневные часы это соотношение меняется на обратное. Разница между максимальным насыщением тканей водой и ее содержанием в полуденные часы получила название полуденного водного дефицита. Поэтому у ряда исследователей в качестве показателя реакции растений на засуху взят водный дефицит растительной ткани, который наряду с транспирацией является прямым показателем водного баланса растений.

Именно такой метод был применен Т. А. Чекиной. Ею же была уточнена техника измерения водного дефицита листьев на примере растений кукурузы. Метод заключается в высечке из листьев небольших дисков, которые взвешиваются и на некоторое время погружаются в воду для достижения полной насыщенности. После повторного взвешивания определяется прибавка в весе, процент которой от насыщенного веса представляет собою величину водного дефицита.

В приложении 9 для примера приводятся данные о тесноте связи между водным дефицитом листьев кукурузы и состоянием воздуха, характеризуемым температурой, дефицитом упругости водяного пара и относительной влажностью воздуха. Значение парного коэффициента корреляции, изменяющееся в среднем от 0,6 до 0,8 указывает на устойчивую связь между рассматриваемыми параметрами.

Процесс поступления воды из почвы разной влажности в растения осуществляется с разной интенсивностью. При малых влагозапасах возрастает водоудерживающая способность почвы, которая затрудняет поступление воды в корни, что не позволяет в ночные часы полностью компенсировать водный дефицит растительной ткани, образовавшийся в дневные часы суток. В растениях возникает остаточный водный дефицит d_0 , зависящий от влагозапасов почвы (рис. 8). Теснота связи d_0 с W характеризуется значением коэффициента корреляции $r = -0,871$. Такая связь позволяет с достаточной для практических целей точностью судить о водообеспеченности растений.

Судить о водности листьев можно не только по высечкам, но и по степени относительного насыщения клеток водой d , определяемой по формуле В. С. Шардакова

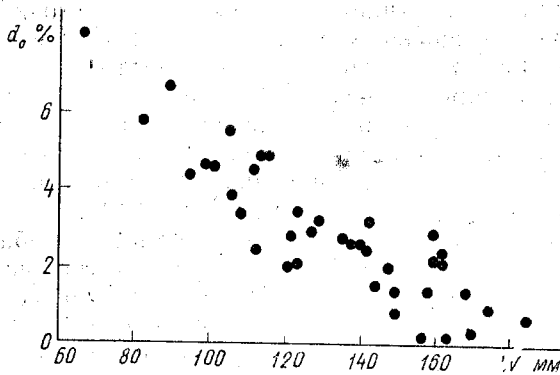


Рис. 8. Зависимость водного дефицита растений (d_o , %) от влагозапасов почвы (W , мм)

$$d = \frac{P_{oc} - S}{P_{oc}}, \quad (62)$$

где P_{oc} — осмотическое давление; S — сосущая сила в атм. Имеются экспериментальные данные о степени насыщенности клеток водой, соответствующей оптимальным влагозапасам почвы. Это обстоятельство позволяет использовать формулу (62) для приближенного диагностирования срока и нормы полива. При этом необходимо предварительное измерение таких физиологических характеристик растений, как осмотическое давление клеточного сока и его сосущей силы.

Крупный ученый-мелиоратор С. Д. Лысогоров считает, что «опытные работники довольно успешно используют внешние признаки влагообеспеченности растений, соответствующие особенностям культуры и сигнализирующие о необходимости полива. Физиологические показатели (величина сосущей силы и др.) более надежны и дают лучшие результаты, чем определение срока полива по заранее намеченной схеме».

Исследованию связи норм и сроков поливов с сосущей силой листьев посвящены работы Н. С. Петина, П. Д. Колесниковой, М. Д. Кущеренко, И. Н. Шабалина, Л. П. Яблокова, Л. М. Толстой и многих других ученых. Так, из исследований Н. С. Петина следует, что для каждой культуры и фазы ее развития существуют свои соб-

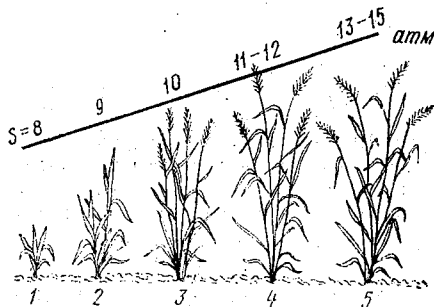


Рис. 9. Изменение предельных значений сосущей силы клеток листьев озимой пшеницы по фазам ее развития:

1-5 — фазы

для каждой культуры и фазы ее развития существуют свои соб-

ственные предельные величины сосущей силы клеточного сока и соответствующие им значения влажности почвы. Например, для средних фаз развития кукурузы предельные значения сосущей силы составляет 5—6, сахарной свеклы 7—8, пшеницы 10—12, хлопчатника 14—15 атм. На рис. 9 для наглядности приведен график изменения предельных значений сосущей силы листьев по фазам развития и соответствующие значения влагозапасов почвы для озимой пшеницы.

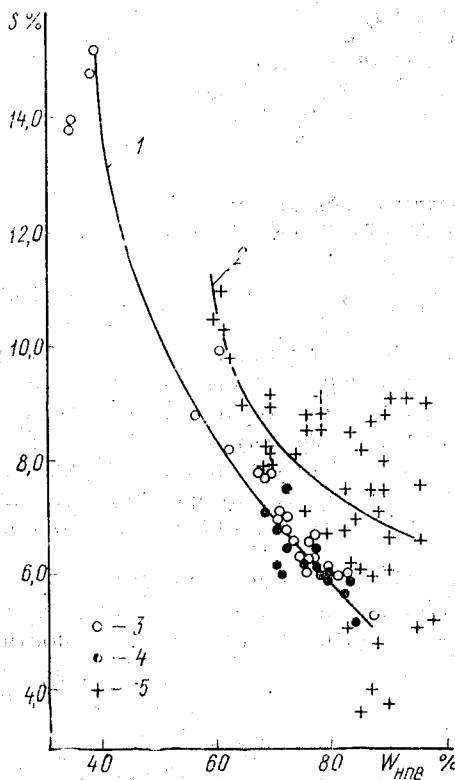


Рис. 10. Зависимость концентрации клеточного сока (S%) листьев помидоров (1) и кукурузы (2) от влажности почвы (выраженной в % от наименьшей влажности); 3 — помидоры посевные; 4 — помидоры рассадные; 5 — кукуруза

ния η от 0,6 до 0,95. Для многих практических расчетов влагозапасов почвы с целью оценки сроков и норм поливов такая точность может оказаться достаточной.

Подобная связь предложена В. В. Свириной, построившей зависимость концентрации клеточного сока в листьях кукурузы со среднесуточным дефицитом испарения $\Delta E = E_0 - E_\phi$ (рис. 11). Тесная связь ($r = 0,85$) позволяет сделать вывод, что concentra-

Остается добавить, что сосущая сила листьев измеряется путем ее сравнения с осмотическим давлением раствора сахарозы разной концентрации, в которой помещают высечки растения. При сохранении неизменности концентрации раствора имеет место равенство $S = P_{ос}$, при ее росте $S > P_{ос}$, а уменьшении $S < P_{ос}$.

Концентрация клеточного сока, отжатого из листьев, определяется с помощью рефрактометров по индексу преломления света в растворе.

Исследования связи концентрации клеточного сока растений с влагозапасами почвы проводили С. А. Гильденев, Г. М. Титев, Л. А. Филиппов, И. Н. Шабалин и Л. П. Яблокова, М. И. Битарев и многие другие. Примерный вид таких связей для помидоров (1) и кукурузы (2) приведен на рис. 10. Теснота связей колеблется от $r = 0,5$ до $r = 0,85$, а корреляционного отноше-

цию клеточного сока можно определять по суточным дефицитам испарения, рассчитываемым по данным наблюдений метеостанций. И наоборот, по концентрации клеточного сока можно судить о дефиците испарения, тесно связанного с водным балансом почвы.

Некоторые предлагают оценивать оводненность растений по степени открытости устьиц — мельчайших отверстий в кожице листьев и стеблей (кутикуле) растений. Устьицам принадлежит очень важная роль в регулировании фотосинтеза и транспирации. Последняя возрастает с увеличением ширины щели вначале очень быстро, а затем медленнее. При максимальной открытости устьиц их регулирующая способность наименьшая. Устьичные движения регулируются тремя системами факторов, вызывающими гидропассивные, гидроактивные и световые движения.

Гидропассивные движения происходят при полной или почти полной насыщенности клеток водой. При этом устьичные щели замыкаются за счет тургорного движения примыкающих к устьицам клеток (эпидермиса). При небольшой потере воды (3—4%) устьица начинают открываться, так как тургор клеток эпидермиса падает и снижает давление на замыкающие клетки. При дальнейшей потере воды происходит процесс в примыкающих клетках, приводящий к их замыканию — гидроактивные движения. Свет способствует раскрытию, а темнота — закрытию устьиц.

Таким образом, степень открытия устьиц определяется оводненностью растений, связанной с дефицитом их испарения и в конечном счете — с влагозапасами почвы. В. В. Свириной проведены исследования связи устьичных движений со степенью недостатка влаги, характеризуемой суточными дефицитами испарения. Степень открытия устьиц определялась качественно (методом Молиша), путем соприкосновения с поверхностью листьев лакмуса, интенсивность окраски которого пропорциональна степени открытия устьиц.

Было установлено, что при средних дефицитах испарения больше 1,5 мм и запасах влаги 62% НВ во второй половине дня наблюдается закрытие устьиц листьев кукурузы. В 19 ч отмечается естественное закрытие устьиц в связи с наступлением темноты. При дефицитах испарения 1,6—3,0 мм и тех же запасах влаги наблюдается в течение дня полное или частичное открытие устьиц. При еще больших дефицитах испарения степень сомкнутости устьиц снова снижается. Для практического использования этот метод требует технической доработки.

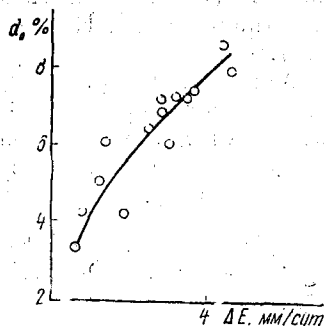


Рис. 11. Связь концентрации клеточного сока ($S\%$) в листьях кукурузы со среднесуточным дефицитом испарения (ΔE)

Кроме перечисленных физиологических методов определения степени обеспеченности растений водой предложено немало других способов, связанных с учетом развития растений и прироста биомассы (Ф. М. Куперман, П. П. Языков, и др.), по температуре листьев (Н. И. Салтыков и др.), по величине электрического сопротивления (Г. Н. Федорова, И. Д. Кушнеренко и Г. П. Курчова).

Оригинальным является биофизический метод определения оптимального срока полива, разработанный В. С. Бадаляном. Автор метода вводит понятие «общая напряженность среды» Σ , которая состоит из двух величин — относительного дефицита доступности почвенной влаги dx и относительного испарения $E' = \frac{E}{E_0}$, где E — фактическое испарение, а E_0 — испаряемость, определяемая по средним многолетним данным для выбранного района.

$$dx = \frac{W - W_3}{W_{\text{нв}} - W_3} \cdot 10^2, \quad (63)$$

где $W_{\text{нв}}$ — наименьшая влагоемкость; W_3 — влажность завядания; W — фактический влагозапас почвы. Для определения относительной величины общей напряженности среды, связанной с датой полива, предлагается формула

$$\Sigma = 100 - dx + E'. \quad (64)$$

Этот метод вызывает, однако, сомнение в корректности комплексного учета в выражении (64) относительного влияния доступности воды и напряженности метеорологических условий, по-разному зависящих от степени увлажненности. Если испарение действительно пропорционально испаряемости, то доступность воды растениями в первом приближении пропорциональна E_0 лишь в диапазоне от влажности завядания W_3 до влажности разрыва капилляров. В диапазоне от влажности разрыва капилляров до наименьшей влагоемкости (соответствующем оптимальному диапазону влажности почвы) доступность воды растениям всеми мелиораторами в первом приближении принимается постоянной.

В заключение следует отметить, что в настоящее время физиологические методы определения обеспеченности растений водой в техническом отношении недостаточно приспособлены для массового использования и поэтому при назначении срока полива применяются реже, чем методы, основанные на сведениях о влагозапасах почвы.

Глава III. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОМАССООБМЕНА НА БОГАРНЫХ И МЕЛИОРИРУЕМЫХ ПОЛЯХ В СИСТЕМЕ ПОЧВА — РАСТЕНИЕ — АТМОСФЕРА

Изучению водного режима сельскохозяйственных полей посвящено большое количество работ, основанных на анализе эмпирических данных. Однако эмпирические зависимости, полученные в экспериментах, с трудом применимы к постановке и решению задач количественного анализа функций растительных сообществ. Поэтому в последнее время наметилась тенденция в сторону расширения теоретических исследований влагообмена в системе почва — растение — атмосфера с позиции общей теории энерго- и массообмена. Указанные исследования являются составной частью разработок, связанных с созданием математической модели жизнедеятельности растений и продуктивности сельскохозяйственных культур. Однако на пути построения достаточно строгих теоретических моделей продукционного процесса (т. е. процесса формирования биомассы) стоят значительные трудности, вызванные его многофакторностью, нелинейностью, неаддитивностью (т. е. невозможностью сложения или вычитания влияния разных факторов), взаимосвязанностью определяющих факторов и изменением реакции растений на них в процессе онтогенеза (развития).

Сложности математического описания исследуемых зависимостей встречаются с невозможностью формального решения получаемых систем дифференциальных уравнений. Иногда эти трудности удается обойти путем численного решения уравнений с помощью ЭВМ при частных начальных и граничных условиях, что снижает практическую ценность результатов.

Поэтому большое значение представляют попытки математического описания и решения некоторых частных вопросов передвижения влаги в системе почва — растение — атмосфера.

3.1. Модель влагообмена в почве

Для описания закономерностей передвижения и количественной оценки состояния воды в каждом из звеньев системы почва — растение — атмосфера целесообразно использовать термодинамический подход, в основе которого лежит учение о термодинамическом потенциале влаги. С позиций этого подхода вода передвигается в почве к поверхности корней и поступает затем через растение в атмосферу вдоль градиента водного потенциала.

Первые количественные исследования потока воды в насыщенной влагой почве, как известно, были выполнены Дарси. Согласно его исследованиям, количество воды, проходящее через единицу

сечения почвы в единицу времени, пропорционально градиенту гидравлического напора.

$$V = -\kappa \frac{\Delta\Phi}{\Delta z}, \quad (65)$$

где V — скорость потока воды; κ — гидравлическая проводимость; $\Delta\Phi$ — разность полных потенциалов, выражающая гидравлический напор; z — вертикальная координата.

Общее уравнение, описывающее движение почвенной воды в жидкой фазе получено как комбинация уравнения Дарси (в дифференциальной форме) с уравнением неразрывности. Последнее устанавливает зависимость между изменением содержания влаги q в единице объема почвы во времени t на данном участке пути и приращением скорости потока на этом же участке. Для движения в вертикальном направлении z имеем

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial V}{\partial z}. \quad (66)$$

С учетом выражения (65) уравнение (66) принимает вид

$$\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right). \quad (67)$$

В гравитационном поле при заданной температуре для полного потенциала Φ можно принять $\Phi = \psi + z$, где ψ — водный потенциал. Тогда из выражения (67) для потока, положительным направлением которого считается нисходящее направление, имеем

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial \kappa}{\partial z}. \quad (68)$$

Уравнение (68) целесообразно представить в более привычной форме уравнения диффузии

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial q}{\partial z} \right) + \frac{\partial \kappa}{\partial z},$$

где $D = \kappa \frac{\partial \psi}{\partial q}$ — диффузивность жидкой фазы почвенной воды.

Передвижение почвенной воды в ненасыщенных почвах включает передвижение как жидкой, так и парообразной фазы. Для описания влагопереноса в этом случае также применим закон Дарси, но с коэффициентом κ , являющимся функцией характеристик рассматриваемой почвы. Совместный учет передвижения воды в виде жидкости и пара с учетом влияния температуры приводит к уравнению

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T \frac{\partial \tau}{\partial z} \right) + \frac{\partial \kappa}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial q}{\partial z} \right), \quad (69)$$

где $D = D_e + D_v$; D_e — коэффициент диффузии жидкой фазы почвенной воды; D_v — коэффициент диффузии парообразной почвенной воды; $D_T = D_{T_e} + D_{T_v}$ — коэффициент диффузии, выражающий соответствующее влияние тепла на диффузию жидкой и парообразной фаз перемещающейся в почве воды.

3.2. Модель поглощения воды корневой системой

Приведенные в 3.1. уравнения являются лишь частью широкого круга моделей, применяемых на современном уровне знаний для изучения движения воды в первом звене системы почва — растение — атмосфера.

Рассмотрим теперь математическую постановку задачи поглощения влаги корнями растений. Физиологические особенности растений входят в модели в виде величин, характеризующих геометрические и термодинамические параметры корневой системы в данный момент времени.

По характеру поглощения все процессы делятся на микроскопические и макроскопические. Микроскопические модели описывают поток воды в единичный цилиндрический корень, а макроскопические — поток влаги в зоне корнеобитания в целом.

В модели Гарднера используется микроскопический подход, корень рассматривается как цилиндр бесконечной длины с одинаковым по всей длине радиусом и одинаковой способностью к поглощению воды; считается также, что почвенная вода может перемещаться только в горизонтальном направлении. Уравнение (68) в цилиндрических полярных координатах в этом случае принимает вид

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial q}{\partial r} \right), \quad (70)$$

где r — расстояние по радиусу до оси корня. Начальные и граничные условия формулируются из следующих допущений. Корень имеет доступ к влаге только в пределах цилиндрического участка в почве $r_2 \leq r \leq r_1$, где r_1 — радиус корня, r_2 — радиус коаксиального с корнем (объемлющего) цилиндра почвы. Это допущение означает, что поток воды через внешний цилиндр радиуса r_2 равен нулю. Объемное содержание влаги в рассматриваемой области в начальный момент времени считается заданной величиной. Тогда

$$D \frac{\partial q}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \Omega(t) \frac{r_2^2 - r_1^2}{2r_1}, \quad (71)$$

$$\frac{\partial q}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = 0 \quad q(r_1, t_0) = q_0, \quad (72)$$

где $\Omega(t)$ — функция, определяющая скорость поступления воды в корень; q_0 — начальная концентрация воды. Уравнение (71) с граничными и начальными условиями (72) представляет собой полную систему уравнений, позволяющих определить поступление воды в корень при введенных ограничениях. Модель Гарднера можно считать первым приближением к математической модели реального процесса.

В моделях с макроскопическим подходом зона корнеобитания характеризуется активностью поглощения воды из некоторого

объема почва — растение. В этом направлении разработан ряд моделей с разной степенью детализации факторов, определяющих процесс поглощения воды корнями. Модели, способные учесть не только высыхание почвы, но также полив и выпадение осадков, являются наиболее перспективными для целей мелиорации.

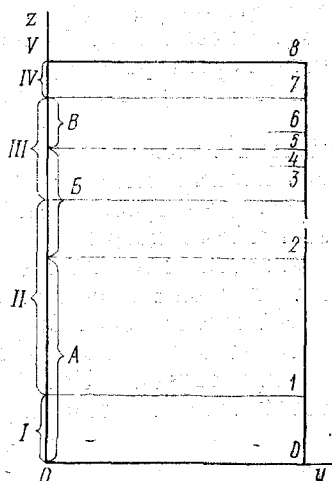


Рис. 12. Схематический разрез почвенно-грунтовой толщи (условные обозначения в тексте).

ных граничных условий. Например, условие $V_z = 0$ при $z=0$ отражает существование на уровне 0 водоупорного слоя. Область I начинается от нулевого уровня и ограничивается уровнем 1. Это зона полного насыщения, через которую проходит фильтрационный поток вдоль оси u в направлении к области разгрузки. Область II характеризуется переносом влаги при отсутствии источников и стоков. В ней грунт может быть как насыщенным, так и ненасыщенным, что определяет соответственно и вид уравнения влагопереноса. Область III характеризуется наличием в ней корневой системы, способной впитывать влагу из почвы. Область IV выходит за пределы почвенно-грунтового массива и представляет собой верхний слой почвы, в микропонижениях которого может аккумулироваться вода при ливнях и поливах, интенсивность которых превышает интенсивность инфильтрации воды в почву.

Область V представляет собой приземный слой воздуха. Движение влаги в этой области будет рассмотрено ниже. Области А, Б, В характеризуют неоднородность почвенно-грунтовой толщи в отношении характеристик, определяющих движение влаги. Число этих областей должно определяться при схематизации рассматриваемого объекта. Границы 4 и 6, так же как и граница 1, отделяют зоны полного насыщения от зон частичного насыщения. Особен-

Если детально рассматривать разрез почвенно-грунтовой толщи (рис. 12), на котором выделены характерные области и разделяющие их уровни, то для каждой из этих областей математическое описание процессов влагообмена различно. Уровни 0 и 8 являются крайними и для них записываются граничные условия, уровни 1—7 — промежуточные, для них записываются условия, позволяющие «стыковать» уравнения смежных областей. Остановимся на характеристике выделенных областей.

Нулевая область представляет собой часть общей системы, в которой процессы переноса не рассматриваются, и ее связь с областями, рассматриваемыми в краевой задаче, устанавливается в форме задан-

ностью задания условий на границе 7 является необходимость учета суммарного испарения с поля.

3.3. Модель влагообмена почвы и растений с атмосферой

Перейдем к анализу процессов влагообмена в другой из двух контактирующих сред обитания растений — приземном слое атмосферы. Под водным режимом приземного слоя атмосферы понимают совокупность пространственного и временного распределения влаги в приземном слое и турбулентный поток влаги между деятельной поверхностью и припочвенным воздухом, представляющим нижнюю часть приземного слоя. Имеются решения подобной задачи для стационарного и нестационарного водного режима, имеются точные и приближенные решения.

Ниже приводится одна из простых моделей, обладающая той особенностью, что она по своей постановке формулируется в едином ключе с задачей влагообмена в почве. В таком случае, сохраняя за влажностью приземного воздуха то же буквенное обозначение q , за вертикальной координатой z и временем t , будем иметь следующее уравнение турбулентной влагопроводности:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\kappa(z) \frac{\partial q}{\partial z} \right], \quad (73)$$

где $\kappa(z)$ представляет собой коэффициент турбулентности в приземном слое воздуха. В качестве граничных условий можно задать временной ход влажности на уровне шероховатости

$$q(z, t)_{z=z_0} = \varphi(t) \quad (74)$$

и считая, что на большой высоте в воздухе колебания влажности затухают, условие ограниченности на бесконечно большой высоте

$$q(z, t)|_{z=\infty} = \infty. \quad (75)$$

В подобного рода задачах в первом приближении принимается, что влажность в тонком слое $0-z_0$ постоянна.

Наличие растительности, учтенное таким косвенным образом, должно быть пересмотрено. Одна из возможных коррекций задачи основана на том, что вместо условия ограниченности влажности на бесконечности в качестве второго условия вводится поток влаги на уровне z_0

$$E(t) = -\rho \kappa(z) \frac{\partial q(z_0, t)}{\partial z} \quad (76)$$

где ρ — плотность воздуха; $dq(z_0, t):dz$ — градиент влажности воздуха на уровне шероховатости. В этом случае уравнение (76) применяется только для слоя, включающего растительность $z=0 \div H_p$, где H_p — средняя высота растений на изучаемом участке. Таким путем мы несколько приближаемся к реальной обстановке на сельскохозяйственных полях.

Еще более совершенным представляется следующий шаг, предполагающий учет влияния степени развития растений на режим влажности приземного воздуха путем введения в исходное дифференциальное уравнение влагопроводности (73) внутренних источников, имитирующих характером своей интенсивности динамику роста растительного сообщества. Аналитическое выражение для таких источников обычно аппроксимируется нормированными дельта-функциями.

Значительное количество работ в области теории влагообмена в растительном покрове появилось в последние годы. Так, М. И. Будыко и Л. С. Гандин для описания влагообмена между растительным покровом и межлистным пространством предлагают использовать следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \rho S D_{\theta} (q_S - q), \quad (77)$$

где $E = -\rho \kappa \frac{\partial q}{\partial z}$ — турбулентный поток влаги; ρ — плотность воздуха; κ — коэффициент турбулентного обмена в межлистном пространстве; q — удельная влажность воздуха внутри растительного покрова; S — удельная поверхность листьев; D_{θ} — коэффициент диффузии, описывающий интенсивность влагообмена между листьями и межлистным пространством; q_S — насыщающая влажность внутри листьев.

На верхней границе растительного покрова ($z = H_p$) турбулентный поток влаги (суммарное испарение) принимается пропорциональным разности влажности на уровнях H_p и z_{∞} :

$$E(H_p) = \rho D_{H_p} [q_{H_p} - q_{\infty}], \quad (78)$$

где D_{H_p} — коэффициент диффузии в слое между уровнями H_p и z_{∞} :

Турбулентный поток влаги на уровне $z = 0$ (испарение с почвы) $E(0)$ принимается пропорциональным разности насыщающей влажности на уровне $z = 0$:

$$E(0) = \rho D_1 [q_s - q_0], \quad (79)$$

где D_1 — коэффициент диффузии, учитывающий интенсивность переноса водяного пара между верхней границей «водоносного слоя почвы» и ее поверхностью. В последующих работах тех же авторов рассмотренная квазистационарная модель получает дальнейшее развитие и углубление.

Нестационарный вариант влагообмена в растительном покрове развивается в работах О. Д. Сиротенко и др. Разработанные авторами модели можно рассматривать как логическое продолжение приведенных выше решений.

В дифференциальное уравнение (77) добавляется член, учитывающий изменение влагосодержания в рассматриваемом слое атмосферы:

$$\rho = \frac{\partial q}{\partial t} = - \frac{\partial E}{\partial z} + \rho S D_0 (q_s - q). \quad (80)$$

Условия на верхней границе растительного покрова задаются аналогично (74). Процесс влагообмена в растительном покрове авторы рассматривают в органическом единстве с водным режимом почвы. Они записывают уравнение влагопроводности для почвы и решают задачу сопряженного нестационарного влагообмена. Так как влажность почвы и воздуха являются по существу величинами различной физической природы, то корректно записать условия сопряжения (в частности равенство этих величин на границе почва — воздух) весьма трудно. Первым условием сопряжения служит баланс влаги на границе почва — воздух. Второе условие на этой границе формулируется с использованием эмпирических зависимостей между влажностью воздуха q_v и равновесным влагосодержанием q_p (так называемые изотермы сорбции и десорбции). Эти зависимости хорошо описываются, например, формулой

$$q_p = v_1 q_v (v_2 - q_v), \quad (81)$$

где v_1 и v_2 — коэффициенты, зависящие от температуры и свойств субстанции. В отдельных частных случаях изотермы сорбции и десорбции могут быть аппроксимированы более простыми формулами.

3.4. Некоторые полные динамические модели водного режима территорий и продукционного процесса*

Математическая модель формирования водного режима орошаемого массива построена А. И. Сергеевым. Почва рассматривается им как многофазная многокомпонентная среда. Автором учитываются силы, воздействующие на передвижение воды, пара и тепла в этой среде. При построении математической модели водного режима орошаемой территории основные уравнения, описывающие процессы влаго- и теплообмена, генерализируются ввиду их сложности и отсутствия достаточно полной информации для решения. В результате проведенных исследований получена замкнутая система уравнений, описывающая процесс формирования водного режима территории под влиянием орошения. При этом в единой совокупности рассматривается движение влаги в зоне аэрации, динамика грунтовых вод, суммарное испарение и формирование стока возвратных вод, т. е. вод, поступающих с орошаемых полей обратно в водоисточник.

* Материал данного раздела необязательный. Дается для сведения.

Наиболее сложной частью поставленной задачи оказалось исследование влаго- и теплообмена в зоне аэрации. Путем анализа сил, определяющих движение воды в почве при ее неполном насыщении, удалось получить уравнение для потока воды в рассматриваемой среде. Была вскрыта структура коэффициента влагопроводности и всасывающего потенциала почвенной влаги в зависимости от насыщения и физических свойств почвы. Установлено, что в зависимости от природных условий и режима водоподачи режим территории определяется динамикой запасов влаги в зоне аэрации, режимом уровня грунтовых вод и изменением стока воды в коллекторно-дренажной сети.

Численное решение полученной системы уравнений при заданных параметрах орошаемого массива, а также известном поступлении воды в контур массива и погодных условий (осадки, температура, дефицит влажности воздуха) позволяет оценить динамику влажности почвы зоны аэрации и изменение уровня грунтовых вод, суммарное испарение, характер и интенсивность влагообмена зоны аэрации с грунтовыми водами.

Предложенная математическая модель дает возможность приближенно рассчитывать различные варианты параметров и типов коллекторно-дренажной сети проектируемых гидромелиоративных систем, а также применять ее для расчета и прогноза уровня грунтовых вод и стока возвратных вод на эксплуатируемых ирригационных системах, основываясь при этом на доступной гидрометеорологической информации.

В работах Е. П. Галямина и С. О. Сиптиза сделана попытка применения модели продукционного процесса для оптимизации водного режима кукурузы. Авторы считают, что процесс формирования урожая любых культур может быть описан системой конечно-разностных уравнений, отражающих баланс биомасс отдельных органов и их фотосинтезирующих поверхностей. При анализе системы используется подход, основанный на применении теории оптимального управления поливным режимом.

Для конечной биомассы надземных органов, например, кукурузы, продукционный процесс описывается системой уравнений

$$\begin{aligned}
 M(\tau+1) &= M(\tau) + a(\tau)U(W, t) m(L, Q), \\
 L(\tau+1) &= L(\tau) + H(\tau)U(W, t) m(L, Q), \\
 W(\tau+1) &= W(\tau) + H(\tau) + \varphi(\tau) - E[W(\tau)], \\
 M(0) &= M_0, \quad L(0) = L_0, \\
 W(0) &= W_0, \quad \tau \in [0, t],
 \end{aligned}
 \tag{82}$$

где $M(\tau)$ — сухая биомасса надземных частей растений в момент времени τ на единице площади поля, $\text{кг}/\text{м}^2$; $L(\tau)$ — относительная площадь листовой поверхности (листовой индекс) в момент τ ; $W(\tau)$ — влагозапасы активной зоны почвы (мм) в момент τ ;

$m(L, Q)$ — суточный прирост биомассы при биологически оптимальных значениях среды и реальной интенсивности солнечной радиации Q ; $U(W, t)$ — функция снижения прироста биомассы при отклонении влагозапасов и температуры воздуха от оптимумов; $a(\tau)$ — ростовая функция надземной биомассы, показывающая долю суточного прироста, которая распределилась между надземными органами растения; $H(\tau)$ — осадки, мм; $E[W(\tau)]$ — интенсивность испарения, мм/сут; $\varphi(\tau)$ — поливная норма, мм.

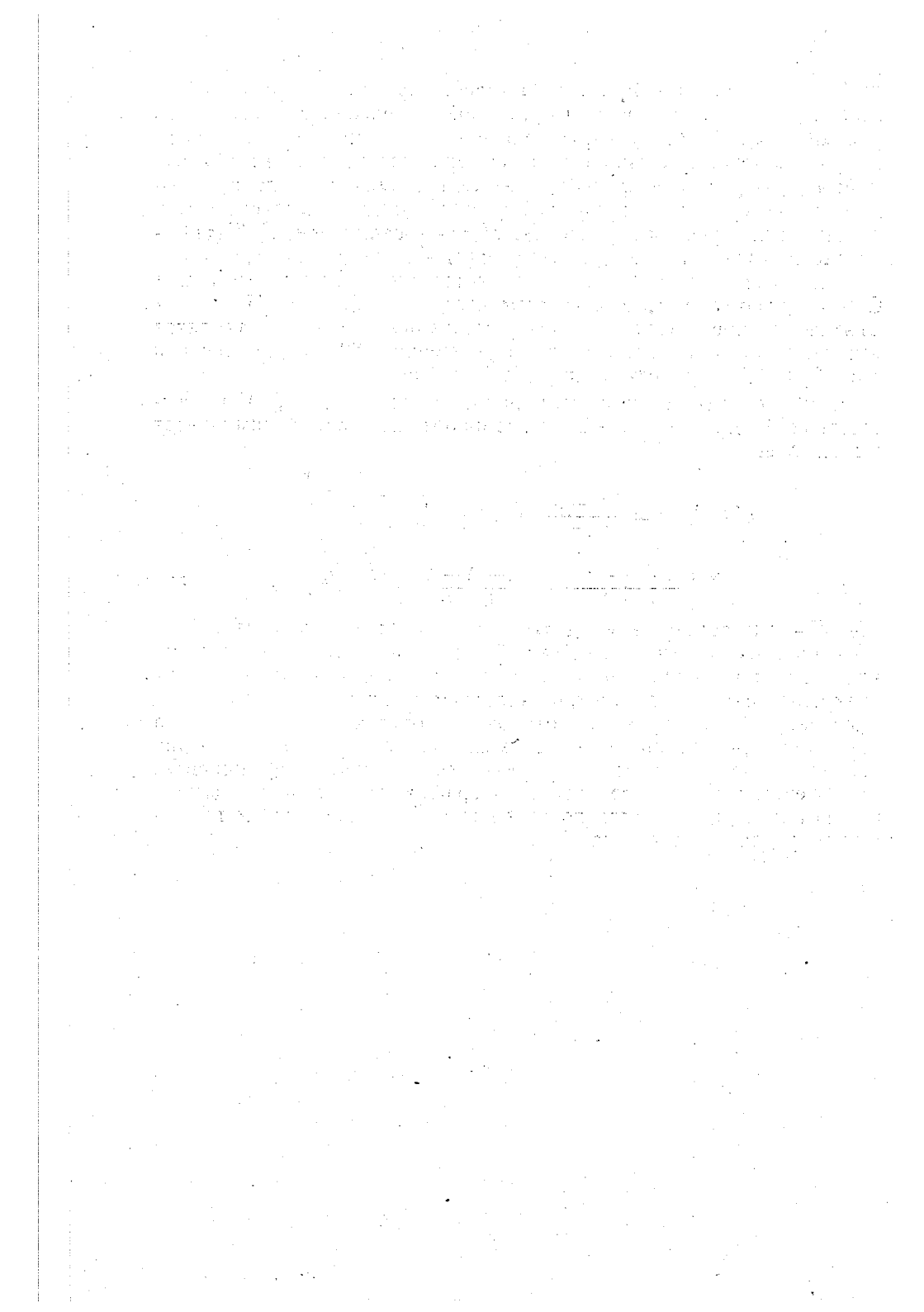
Суточный прирост биомассы является следствием ассимиляции CO_2 из воздуха с использованием солнечной энергии. Из общих физических предпосылок и экспериментальных данных находятся основные слагаемые и параметры уравнения (82), в том числе и для $M_\tau(\tau+1)$ — теоретически общей биомассы посева.

Наиболее важное для мелиорации слагаемое $U(W, t)$ в соответствии с предварительными разработками аппроксимируется выражением

$$U(W, t) = \left(\frac{W - W_H}{W_0 - W_H} \right)^\alpha \left(\frac{W - W_B}{W_0 - W_B} \right)^\alpha \frac{W_B - W_0}{W_0 - W_H} \times \\ \times \left(\frac{t - \Delta - t_H}{t_0 - t_H} \right)^\gamma \left(\frac{t - \Delta - t_B}{t_0 - t_B} \right)^\gamma \frac{t_B - t_0}{t_0 - t_H}, \quad (83)$$

где W — влагосодержание активного слоя почвы в долях $W_{\text{нв}}$; W_0 — оптимальные влагозапасы; W_B и W_H — соответственно верхняя и нижняя граница влажности, при которой прирост вещества прекращается; t — среднесуточная температура воздуха; Δ — температурная поправка на отклонение от температуры воздуха в посевах; t_B — верхний предел жизнедеятельности; t_H — нижний предел жизнедеятельности; α и γ — эмпирические коэффициенты.

В результате расчетов построен график оптимального полива, при котором урожайность по сравнению с неоптимальным графиком возросла более чем на 10%.



ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Режим орошения по календарным датам в зависимости от орошаемой культуры для Ингулецкого орошаемого массива

№ поливов	Поливная норма, мм	Оросительная норма, мм	Сроки поливов	
			от	до
1	2	3	4	5
Озимая пшеница				
01	100		10/IX	20/IX
1	60		6/V	15/V
2	60		26/V	31/V
3	60	180	6/VI	9/VI
Кукуруза на зерно				
0	100		1/X	10/X
1	70		21/VI	23/VI
2	70		3/VII	6, 5/VII
3	80		19/VII	21/VII
4	70		5/VIII	9/VIII
5	70	360	21/VIII	26/VIII
Ячмень				
0	100		10/IX	20/IX
1	60		11/V	15/V
2	60		26/V	31/V
3	60	180	6/VI	9/VI
Зернобобовые				
1	60		16/V	20/V
2	60		1/VI	3/VI
3	60	180	10/VI	15/VI
Сахарная свекла				
01	100		21/IX	30/IX
1	70		18/VI	20/VI
2	70		2/VII	3/VII
3	80		16/VII	18/VII
4	80		31/VII	5/VII
5	70	450	26/VIII	29/VIII

1	2	3	4	5
Овощные				
01	25		26/IV	5/V
02	25		1/V	10/V
1	30		16/V	20/V
2	50		1/VI	3/VI
3	50		15/VI	17/VI
4	60		29/VI	1/VII
5	60		9/VII	10/VII
6	50		22/VII	27/VII
7	50		5/VIII	9/VIII
8	50		15/VIII	21/VIII
9	40	440	26/VIII	29/VIII
Картофель весенней посадки				
1	30		1/V	5/V
2	50		16/V	20/V
3	50		1/VI	3/VI
4	50		15/VI	17/VI
5	50	230	29/VI	1/VII
Кукуруза на силос				
01	100		1/X	10/X
1	70		21/VI	23/VI
2	70		3/VII	6/VII
3	80		19/V	21/VII
4	70		5/VIII	9/VIII
5	70	360	21/VIII	26/VIII
Люцерна				
01	100		11/X	25/X
1	70		21/V	26/V
2	70		10/V	15/V
3	80		24/VI	28/VI
4	80		10/VII	15/VII
5	70		28/VII	31/VII
6	70		15/VIII	21/VIII
7	70	520	29/VIII	4/IX

Режимы орошения в зависимости от глубины стояния грунтовых вод, способов полива и фаз развития озимой пшеницы на оросительных системах Ростовской области

Глубина залегания грунтовых вод														
до 1,5 м					от 1,5 до 3 м					свыше 3 м				
№ по-лива	норма	способ	календар-ный срок	фаза разви-тия рас-тения	№ по-лива	норма	способ	календар-ный срок	фаза разви-тия рас-тения	№ по-лива	норма	способ	календар-ный срок	фаза разви-тия рас-тения
I зона														
1	800	дожде-вание	20.08—10.09	влаго-зарядка	1	1200	поверх-ностный	20.08—10.09	влаго-зарядка	1	1300	пов.	20.08—10.09	влаго-зарядка
2	300	»	20.09—10.10	начало кущения	2	400	дожде-вание	20.09—10.10	начало кущения	2	400	дожд.	20.09—10.10	начало кущения
3	300	»	15.05—25.05	выход в трубку	3	400	»	15.05—25.05	выход в трубку	3	600	»	15.05—25.05	выход в трубку
					4	400	»	10—20.06	коло-шение	4	500	»	10.06—20.06	коло-шение
II зона														
1	800	дожде-вание	1.09—20.09	влаго-зарядка	1	1200	поверх-ностный	1—20.09	влаго-зарядка	1	1500	пов.	1—20.09	влаго-зарядка
2	350	»	20.09—30.10	начало кущения	2	500	дожде-вание	20.09—30.10	начало кущения	2	600	дожд.	20.09—30.10	начало кущения
3	250	»	20—30.05	выход в трубку	3	900	»	20—30.05	выход в трубку	3	600	»	20—30.05	выход в трубку
					4	500	»	10.06—20.06	коло-шение	4	600	»	10—20.06	коло-шение

Схема гидромелиоративного районирования территории
Средней Азии

Район	Почвы	Уровень грунтовых вод, м
I	Автоморфного ряда, формирующиеся без влияния грунтовых вод Маломощно-суглинистые на песчано-галечниковых отложениях и мощные песчаные	ниже 3
II	Среднемощные суглинистые на песчано-галечниковых отложениях и мощные супесчаные	
III	Мощные суглинистые и глинистые	
IV	Переходного ряда, формирующиеся при слабом влиянии грунтовых вод	2—3
V	Суглинистые и глинистые	
VI	Гидроморфного ряда — луговые, формирующиеся при умеренном влиянии грунтовых вод	
VII	Суглинистые и глинистые	
VIII	Болотные луговые, формирующиеся при избыточном влиянии грунтовых вод Легко суглинистые	0,5—1,0
IX	Суглинистые и глинистые	

Поливной режим для позднеспелых сортов и гибридов кукурузы
на легких и средних почвах
(для юго-востока КазССР)

Поливы	Поливная норма, мм	Поливной период		Межполивной период, сутки	Фазы развития растений
		начало	конец		

В среднесухой и сухой годы

Злагозарядковый	150					Стебление
Вегетационные: 1)	60	8/V	4/VII	21		Перед выбрасыванием метелки
2)	60	8/V	22/VII			
3)	70	23/VII	6/VIII	17		Перед молочной спелостью
4)	70	7/VIII	19/VIII	13		Перед молочно-восковой спелостью

Во влажный год

Злагозарядковый	150					Стебление
Вегетационные: 1)	60	6/VI	4/VII	28		Выбрасывание метелки
2)	70	5/VII	3/VIII			
3)	70	4/VIII	17/VIII	21		Молочная спелость

В маловодный год

Злагозарядковый	150					
Вегетационные: 1)	80	28/VI	27/VII	27		Перед выбрасыванием метелки
2)	80	28/VII	24/VIII			Молочная спелость

Число поливов сельскохозяйственных культур
на минеральных почвах Белоруссии

Обеспеченность, %	Северная зона		Центральная зона		Южная зона	
	супесчаные почвы	суглинистые почвы	супесчаные почвы	суглинистые почвы	супесчаные почвы	суглинистые почвы
1	2	3	4	5	6	7

Капуста среднепоздняя

50	3—4	2—3	4—5	3—4	5—6	4—5
25	5—6	3—4	7—8	5—6	8—9	6—7
10	7—8	5—6	9—10	6—7	11—12	9—10
5	8—9	6—7	10—11	7—8	12—13	10—11

Капуста ранняя

50	2—3	2	3—4	2—3	4—5	3—4
25	3—4	2—3	4—5	3—4	6—7	5—6
10	5—6	4—5	6—7	5—6	8—9	7—8
5	6—7	5—6	7—8	6—7	9—10	8—9

Огурцы

50	2—3	1—2	2—3	2—3	3—4	2—3
25	3—4	2—3	4—5	3—4	5—6	4—5
10	6—7	5—6	7—8	6—7	8—9	7—8
5	7—8	6—7	8—9	7—8	9—10	8—9

Томаты

50	2—3	1—2	2—3	2—3	3—4	2—3
25	3—4	2—3	3—4	2—3	4—5	3—4
10	4—5	3—4	5—6	4—5	6—7	5—6
5	5—6	4—5	6—7	5—6	7—8	6—7

Сахарная свекла

50	2—3	1—2	2—3	2—3	3—4	2—3
25	3—4	2—3	3—4	3—4	4—5	3—4
10	5—6	4—5	6—7	5—6	7—8	6—7
5	6—7	5—6	7—8	6—7	8—9	7—8

Продолжение приложения 5

1	2	3	4	5	6	7
Картофель среднепоздний						
50	2—3	1—2	2—3	2—3	3—4	2—3
25	3—4	2—3	4—5	3—4	5—6	4—5
10	5—6	4—5	6—7	5—6	7—8	6—7
5	6—7	5—6	7—8	6—7	8—9	7—8
Картофель						
50	2—3	1—2	2—3	2—3	3—4	2—3
25	3—4	2—3	3—4	3—4	4—5	3—4
10	4—5	3—4	5—6	4—5	6—7	5—6
5	5—6	4—5	6—7	5—6	7—8	6—7
Культурные пастбища						
50	3—4	2—3	4—5	3—4	5—6	4—5
25	4—5	3—4	5—6	4—5	7—8	5—6
10	6—7	5—6	8—9	6—7	9—10	7—8
5	7—8	6—7	9—10	7—8	10—11	8—9

Оросительные нормы (мм) основных сельскохозяйственных культур в среднесухом году (75% обеспеченности) по зонам УССР

Культура	Зона						
	Южная степь	Северная степь	Восточная степь	Лесостепь	Полесье	Прикарпатье	Закарпатье
Озимая пшеница	250	190	260	100	30	30	70
Зернобобовые	220	170	230	100	60	60	90
Кукуруза на зерно	330	270	340	200	60	30	110
Кукуруза на силос (после озимых на зеленый корм)	310	290	310	200	110	110	160
Кукуруза на силос (после озимых и зернобобовых на зерно)	220	180	210	120	50	70	90
Сахарная свекла	380	300	400	210	90	80	110
Многолетние травы	390	320	390	170	70	60	100
Просо пожнивное	190	160	190	100	40	40	70
Озимые на зеленый корм	200	150	210	80	40	40	50
Картофель весенней посадки	230	140	210	90	30	40	90
Овощи	390	330	420	250	140	130	180

Оросительные нормы озимой пшеницы на Украине в годы разной обеспеченности

Зона	Осенний период			Весенне-летний период			Весь период		
	обеспеченность, %								
	25	50	75	25	50	75	25	50	75
Южная степь	605	425	240	2250	1560	880	2855	1925	1120
Левобережная степь	485	300	140	1870	1100	500	2355	1400	640
Правобережная степь	330	130	140	1785	1150	500	2135	1280	640
Левобережная лесостепь	150	50	—	1170	475	—	1320	525	—
Правобережная лесостепь	120	30	—	1100	400	—	1220	430	—
Полесье	—	—	—	400	220	—	400	220	—
Предгорная зона Карпат	—	—	—	200	100	—	200	100	—

**Недостаток водопотребления (поливные и оросительные нормы)
по межфазным периодам и за период вегетации озимой пшеницы, мм**

Природно-экономические работы	Оросительная норма	Поливные нормы							
	вегетационные периоды	посев — полная спелость	всходы — 3-й лист	3-й лист — кущение	кущение — прекращение вегетации	возобновление вегетации — выход в трубку	выход в трубку — колошение	колошение — цветение	цветение — молочная спелость
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Северо-Западный район:									
Архангельская область									
Карельская АССР									
Псковская область	1							1	
Новгородская область	2							2	
Ленинградская область	4						1	3	
Вологодская область	6						1	5	
Прибалтика:									
Калининградская область	1							1	
Эстонская ССР	3							3	
Латвийская ССР	4							4	
Литовская ССР	6						1	5	
Белорусская ССР:									
Гродненская область	1						1	1	
Брестовская область	2						1	1	

1	2	3	4
Витебская область	2		
Минская область	3		
Могилевская область	6		
Гомельская область	10		
Центральный район:			
Ивановская область	10		
Калининская область	10		
Ярославская область	11		
Смоленская область	14		
Московская область	17		
Владимирская область	18		
Костромская область	19		
Калужская область	23		
Тульская область	24		
Брянская область	32		
Рязанская область	32		
Орловская область	40		
Волго-Вятский район:			
Марийская АССР	11		
Кировская область	14		
Чувашская АССР	15		

Продолжение приложения 8

5	6	7	8	9	10
			1	1	
			3	2	
			4	3	
		1	4	5	
			4	6	
		1	4	5	
			5	6	
		1	6	7	
		1	7	9	
		1	8	9	
			9	10	
		2	10	10	
		3	10	11	
		5	11	16	
		6	12	14	
		4	10	26	
			6	5	
		1	7	6	
		1	8	6	

1	2	3	4
Мордовская АССР	16		
Горьковская область	26		
Уральский район:			
Свердловская область	38		
Курганская область	59		
Удмуртская АССР	77		
Челябинская область	85		
Башкирская АССР	140		
Центрально-Черноземный район:			
Тамбовская область	51		
Курская область	60		
Липецкая область	90		
Белгородская область	172		
Воронежская область	233		
Украинская ССР:			
Закарпатская область	76		
Ровенская область	95		
Ивано-Франковская область	99		
Киевская область	102		
Черновицкая область	102		

Продолжение приложения 8

5	6	7	8	9	10
		1	8	7	
		5	11	10	
		11	23	4	
		14	40	5	
		21	50	6	
		17	60	8	
		29	94	17	
		16	30	5	
		17	38	6	
		20	50	20	
		20	87	65	
	6	26	99	102	
		34	40	2	
		42	50	3	
		47	49	3	
		44	51	7	
		44	52	6	

1	2	3
Хмельницкая область	106	
Волынская область	106	
Житомирская область	127	
Винницкая область	132	
Тернопольская область	142	
Полтавская область	169	2
Сумская область	170	3
Донецкая область	174	2
Черкасская область	183	3
Днепропетровская область	188	4
Черниговская область	185	4
Запорожская область	205	5
Одесская область	235	12
Харьковская область	238	5
Ворошиловградская область	242	11
Кировоградская область	255	11
Николаевская область	271	12
Херсонская область	275	12
Крымская область	282	15
Молдавская ССР	93	

Продолжение приложения 8

4	5	6	7	8	9	10
			46	50	10	
			40	54	12	
			57	60	10	
			55	65	12	
			62	66	14	
3			66	76	18	2
1			67	76	20	3
			67	74	29	2
1			65	82	31	1
2		1	63	78	38	2
			74	71	35	1
5	1	2	70	76	43	3
5	4	4	95	78	27	10
4		2	78	86	61	2
10	6	4	90	90	31	10
10	3	4	96	95	30	6
11	8	6	106	88	29	11
15	10	8	100	88	18	15
15	10	10	110	85	22	15
	9	10	54	14	5	1

1	2	3	4
Поволжье:			
Пензенская область	52		
Татарская АССР	106		
Ульяновская область	214	5	
Астраханская область	258	9	4
Волгоградская область	300	6	1
Калмыцкая АССР	333	7	3
Саратовская область	376	6	2
Куйбышевская область	349	5	2
Северо-Кавказский район:			
Ставропольский край	84		
Краснодарский край	102		
Чечено-Ингушевская АССР	109		
Северо-Осетинская АССР	110		
Кабардино-Балкарская АССР	121		
Дагестанская АССР	201	3	
Ростовская область	386	6	
Закавказский район:			
Аджарская АССР	126		
Абхазская АССР	108		
Грузинская ССР	140		
Армянская ССР	160		
Азербайджанская ССР	185		

Продолжение приложения 8

5	6	7	8	9	10
			12	40	
		8	46	52	
		11	53	140	5
	5	20	45	145	34
	8	21	90	160	14
	7	32	94	165	25
	13	78	98	164	15
	5	70	95	162	10
	18	31	31	4	
	2	18	70	12	
	6	15	74	14	
	4	8	70	28	
	5	9	77	25	5
	18	50	85	41	4
	14	90	138	120	18
	3	26	71	22	4
	2	18	67	19	2
	1	26	86	25	3
	3	20	97	30	4
	4	27	102	48	4

Приложение 9

Связь водного дефицита высечек листьев кукурузы с температурой (T°), относительной влажностью ($r\%$) и дефицитом упругости водяного пара ($d\%$)

Год	Число случаев	Элемент	Пределы изменения элемента	Коэффициент парной корреляции
1967	65	T	12—29	0,800
	65	T	37—90	—0,380
	65	T	2—24	0,640
1963	178	r	10—30	0,744
	178	r	18—98	—0,610
	178	r	3—38	0,730
1967	250	d	13—100	—0,634
1968	250	d	10—34	0,745
1970	250	d	2—38	0,720

ЛИТЕРАТУРА

1. Константинов А. Р. О метеорологических основах нормирования орошения. Метеорология, Обнинск, Изд. ВНИИГМИ-МЦД, 1977. — 44 с.
2. Константинов А. Р., Субботин А. С. Водный и тепловой режим орошаемых полей. — Учебное пособие. Изд. ЛПИ им. М. И. Калинина, 1979 — 80 с. (ЛГМИ).
3. Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 371 с.
4. Дементьев В. Г. Орошение. — М.: Колос, 1979. — 303 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение		3
Глава I.		
	Методы определения типовых поливных и оросительных режимов	
	1.1. Методы определения режима орошения по опытным данным и характеристикам засушливости климата	5
	1.2. Методы расчета режима орошения по планируемой урожайности	14
Глава II.		
	Методы определения норм и сроков поливов	19
	2.1. Определение норм и сроков поливов по метеорологическим данным и влагозапасам почвы	19
	2.1.1. Расчет испарения с сельскохозяйственных полей и продолжительности межполивного периода по температуре и влажности воздуха	20
	2.1.2. Расчет испарения с сельскохозяйственных полей и поливных норм по комплексу метеорологических данных и «уровнению связи»	25
	2.1.3. Тепло-воднобалансовые методы расчета испарения с сельскохозяйственных полей и поливного режима	29
	2.1.4. Методы расчета испарения и сроков поливов с использованием биологических кривых водопотребления	31
	2.1.5. Учет влагозапасов почвы с целью определения поливных режимов при программировании урожайности	35
	2.2. Методы оценки потребности растений в воде с использованием их физиологических характеристик	42
Глава III.		
	Математическое моделирование процессов энергомассообмена на богарных и мелиорируемых полях в системе почва—растение—атмосфера	49
	3.1. Модель влагообмена в почве	49
	3.2. Модель поглощения воды корневой системой	51
	3.3. Модель влагообмена почвы и растений с атмосферой	53
	3.4. Некоторые полные динамические модели водного режима территорий и продукционного процесса	55
Приложения		59
Литература		75

стр. 4-5

А. Р. КОНСТАНТИНОВ, А. С. СУББОТИН

Методы нормирования орошения

Учебное пособие

Редактор *Т. В. Иващенко*

Сдано в набор 25.05.81. Подписано в печать 29.12.81. М-21693.

Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая.

Объем 4,7 п. л. Уч.-изд. л. 4,7. Тираж 700 экз. Темплан 1981 г. поз. 228.

Заказ № 3922. Цена 20 коп.

СППО-2 Ленуприздата, Парголово, ул. Ломоносова, д. 115